

Лабораторная работа № 11

(Глава 2.2 в [1])

Изучение работы источника постоянного тока

Цель работы – экспериментально определить электродвижущую силу (ЭДС) источника \mathcal{E} и его внутреннее сопротивление r , измерить зависимость напряжения на переменном сопротивлении нагрузки и выделяющейся на ней мощности от тока. Определить, при каком сопротивлении внешней нагрузки на ней выделяется максимальная мощность.

Теория

Схема [экспериментальной установки](#) показана на рис. 2.6а. Реальный источник ЭДС (обведён штриховым контуром) имеет конечное внутреннее сопротивление r . К выходным полюсам источника присоединена внешняя нагрузка — переменное сопротивление R (резистор, переменное сопротивление – реостат). Ток в этой цепи измеряется амперметром A , реальный амперметр (обведён штриховым контуром) имеет конечное сопротивление r_A . С помощью вольтметра V измеряют электрическое напряжение, реальный вольтметр (обведён штриховым контуром) также имеет конечное сопротивление r_V .

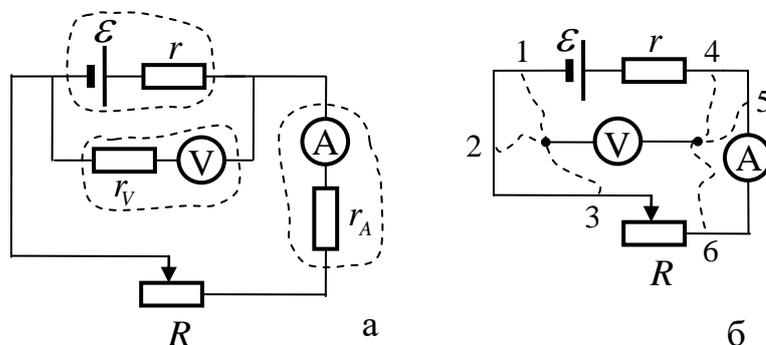


Рис. 2.6

Закон Ома для однородного участка цепи

$$U = IR_{\Pi} \quad (2.16)$$

где U - электрическое напряжение (разность потенциалов) на концах проводника, I - ток через проводник, R_{Π} - сопротивление проводника.

Преобразуем цепь на рис. 2.6а в эквивалентную схему (рис. 2.6б), более простую для понимания. Все измерительные приборы должны как можно меньше искажать состояние измеряемого объекта. Сопротивление амперметра, включаемого в цепь последовательно, увеличивает её общее сопротивление, поэтому ток в цепи при наличии амперметра будет меньше, чем в его отсутствие. Это означает, что сопротивление идеального амперметра должно быть равно нулю. *Сопротивление реального амперметра должно быть много меньше сопротивления измеряемой цепи.*

Вольтметр присоединяется к цепи параллельно. Эквивалентное сопротивление $R_{\text{экр}}$ участка цепи с присоединённым параллельно вольтметром находят по формуле

$$\frac{1}{R_{\text{экр}}} = \frac{1}{R_{\Pi}} + \frac{1}{R_V}; \quad R_{\text{экр}} = \frac{R_{\Pi} R_V}{R_{\Pi} + R_V} \quad (2.17)$$

Это $R_{\text{экр}}$ всегда меньше R_{Π} . Только при $R_V \rightarrow \infty$ $R_{\text{экр}} \rightarrow R_{\Pi}$. Следовательно, сопротивление идеального вольтметра должно быть бесконечным. На практике, *сопротивление вольтметра должно быть намного больше сопротивления участка цепи, к которому он присоединяется параллельно.*

На эквивалентной схеме рис. 2.6б показаны идеальные амперметр и вольтметр.

Рассмотрим влияние конечного сопротивления соединительных проводов. Обычно соединительные провода делают из металлов с малым удельным сопротивлением (медь, алюминий), поэтому их общее сопротивление $R_{\Pi p}$ намного меньше сопротивлений r и R . Оценка: ток $I = 20$ мА, сопротивление проводов $R_{\Pi p} = 0,01 \div 0,1$ Ом. Тогда по закону Ома

(2.16) $U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}}$ напряжение $U_{\text{пр}}$, т.е. разность потенциалов между крайними точками провода, равно $= 0,0002 \div 0,002$ В, что, как правило, не превышает цены деления вольтметра. Таким образом, если левый щуп вольтметра подключать к точкам 1, 2 или 3 провода, то показания вольтметра меняться не будут. Аналогично, правый щуп вольтметра можно подключать к точкам 4 или 5. Поскольку сопротивление амперметра пренебрежимо мало, по закону Ома (2.16) разность потенциалов на контактах амперметра должна быть намного меньше напряжений на сопротивлениях цепи r и R . Поэтому, если перенести контакт вольтметра из точки 5 в точку 6, показание вольтметра изменится незначительно. Таким образом, замкнутая цепь с подключением вольтметра к точкам 3 и 6 практически эквивалентна исходной цепи. Следовательно, *вольтметр показывает напряжение на внешней нагрузке R* , соответствующее формуле (2.16),

$$U = IR$$

Если цепь «источник – амперметр – сопротивление нагрузки» разомкнута, ток равен нулю, вольтметр показывает разность потенциалов на полюсах источника, равную электродвижущей силе - ЭДС источника \mathcal{E} .

Вольтамперная характеристика. Закон Ома для замкнутой цепи: сумма напряжений в замкнутой цепи равна сумме ЭДС,

$$I \sum R_k = \sum \mathcal{E}_m \quad (2.18)$$

Для замкнутой цепи рис. 2.6 в приближении малого сопротивления соединительных проводов и амперметра и большого сопротивления вольтметра уравнение (2.18) можно записать в виде:

$$IR + Ir = U + Ir = \mathcal{E} \quad (2.19)$$

Тогда зависимость напряжения U от тока I , *вольтамперная характеристика (ВАХ) цепи*

$$U = \mathcal{E} - Ir \quad (2.20)$$

является линейной функцией (рис. 2.7а).

Рассмотрим две точки пересечения ВАХ с осями: $I = 0$ и $U = 0$. Первая соответствует разомкнутой цепи, и из (2.19) следует, что $U = \mathcal{E}$. Вторая точка при $I \neq 0$ возможна только при $R = 0$. Такой режим называется «коротким замыканием», ток короткого замыкания $I_{KЗ}$. Тогда из (5) при $U = 0$ получаем внутреннее сопротивление источника

$$\boxed{r = \mathcal{E}/I_{KЗ}} \quad (2.21)$$

Электрическая мощность. При протекании тока в цепи на сопротивлениях R и r выделяется тепловая энергия, полная мощность которой

$$P = P_1 + P_2 = I^2 R + I^2 r = IU + I^2 r \quad (2.22)$$

Полезная мощность P_1 - это электрическая мощность, выделяющаяся на внешней нагрузке R , а P_2 - мощность потерь внутри источника. С учётом формул (2.17) и (2.20) полезная мощность будет равна

$$P_1 = IU = I\mathcal{E} - I^2 r \quad (2.23)$$

Видно, что полезная мощность - квадратичная функция тока. Нули параболы $P_1(I)$ - это точки $I = 0$ и $U = 0$. Максимальное значение полезной мощности, вершина параболы, лежит посередине между нулями (Рис. 2.7б), т.е. при

$$I(P_{1\max}) = I_{KЗ}/2 = \mathcal{E}/2r \quad (2.24)$$

Подставив это значение тока в (2.19),

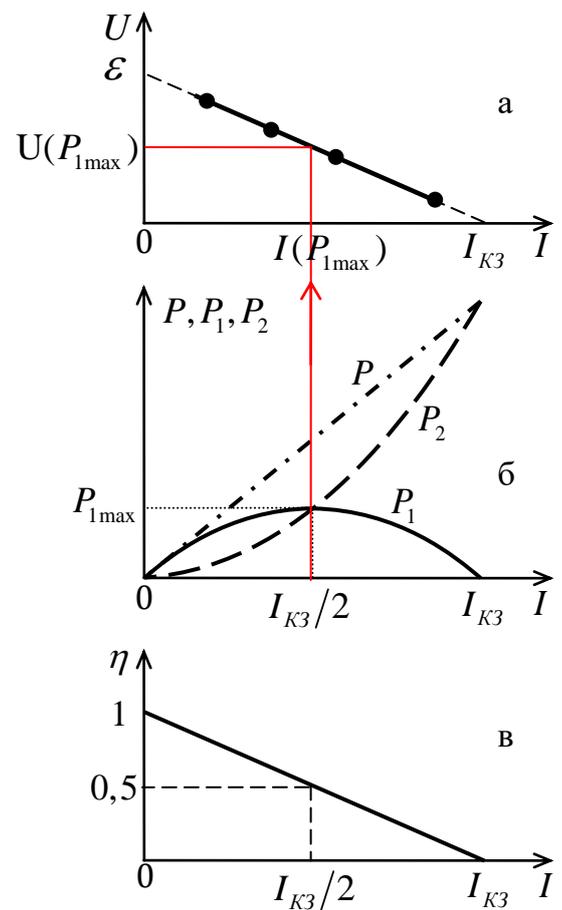


Рис. 2.7

получаем, что *полезная мощность максимальна, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника*

$$R(P_{1\max}) = r \quad (2.25)$$

При этом очевидно, что $P_1 = P_2$. Мощность потерь пропорциональна квадрату тока, следовательно, при максимальном токе I_{K3} она вчетверо больше, чем при токе $I_{K3}/2$, и равна полной мощности P , т.к. $P_1(I_{K3}) = 0$. Полная мощность $P = I\mathcal{E}$ – линейная функция тока. Все три графика мощности показаны на рис. 2.7б.

КПД источника — это отношение полезной мощности к полной

$$\eta = \frac{P_1}{P} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I \quad (2.26)$$

Видно, что КПД зависит от тока линейно (Рис. 2.7в). При оптимальной нагрузке, т.е. при $I(P_1 = \max) = I_{K3}/2 = \mathcal{E}/2r$, КПД равен 50 %. Действительно, при $R = r$ выделяется одинаковая тепловая мощность внутри источника и на нагрузке.

Погрешность измерения мощности

Из выражения (2.22) по формуле погрешности косвенных измерений

$$\begin{aligned} \sigma_P &= \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \sigma_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2} = \sqrt{I^2 \sigma_U^2 + U^2 \sigma_I^2} = \\ &= IU \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} = P \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Задание к лабораторной работе

1. Оформить заготовку протокола лабораторной работы: цель работы, таблица приборов с наименованиями измерительных приборов, рабочие формулы, график ожидаемой зависимости, таблица измерений.

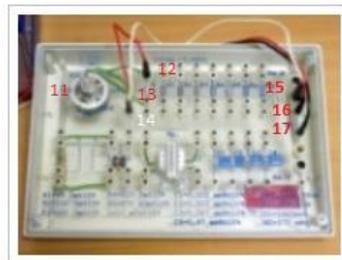
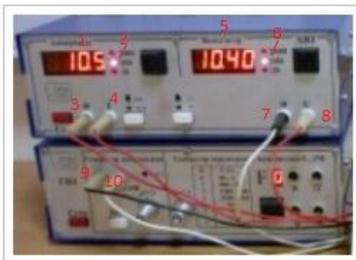
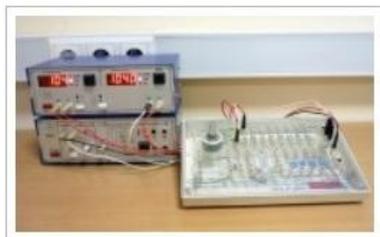
2. Получить допуск к лабораторной работе у преподавателя: рассказать - что, чем и как вы будете измерять, т.е. какие величины, какими приборами, и какие особенности измерений существуют.
3. Собрать электрическую цепь. Получить у преподавателя разрешение на включение источника питания и измерительного прибора. После включения циклическим переключением клавиш на измерительном приборе установить пределы измерения вольтметра 20 В и амперметра 200 мА. Регулятором плавной регулировки выходного напряжения источника установить напряжение в пределах 15 – 18 В. **При дальнейших измерениях положение этого регулятора не менять!** Плавную регулировку тока в цепи производить реостатом сопротивления нагрузки R .
4. **Обратите внимание**, что в таблицу измерений первичные показания приборов заносятся «de visu = увиденное», т.е. как вижу, - в вольтах и миллиамперах, а все преобразования первичных данных в основные единицы СИ, если таковые необходимы, записываются в последующих, дополнительных, ячейках таблицы.
5. Провести прямое измерение ЭДС источника. Для этого разомкнуть цепь, например, разомкнув один из проводов от сопротивления нагрузки.
6. Снять вольтамперную характеристику ВАХ $U(I)$ источника. Общее количество точек задаёт преподаватель, обычно более 10. Значения тока распределить равномерно во всём доступном диапазоне изменения тока.
7. По первичным результатам измерений I и U рассчитать и записать в таблицу измерений полезную мощность $P_1 = IU$. Рассчитать мощность потерь $P_2 = I^2 r$ и полную мощность $P = P_1 + P_2$.
8. Рассчитать КПД источника формуле (11) $\eta = P_1/P$.

9. На листе А4 миллиметровки с книжной ориентацией построить вольтамперную характеристику источника тока ($I;U$), графики мощности P, P_1, P_2 и график КПД. Максимальное значение тока по горизонтальной оси выбрать больше максимального измеренного, ориентировочно 25 – 30 мА. Масштаб по горизонтальной оси тока у всех графиков одинаковый. Нанести точки ($I;U$) на график, провести прямую, наименее отклоняющуюся от точек (Рис. 2.7а).
10. Продолжив ВАХ до пересечения с осями, определить расчётное значение ЭДС источника и ток короткого замыкания $I_{кз}$.
11. Рассчитать внутреннее сопротивление r по формуле (2.21).
12. По графику P_1 определить ток максимальной полезной мощности $I(P_1 = \max)$, сравнить его с $I_{кз}/2$ (формула 2.24). Обратный переход от графика мощности к ВАХ показан на рис. 2.7 красными линиями. Для $I(P_1 = \max)$ по ВАХ графически определить напряжение на нагрузке $U(P_1 = \max)$, а по нему рассчитать оптимальное сопротивление нагрузки $R(P_1 = \max)$. Сравнить его с внутренним сопротивлением источника r , полученным в п. 10.
13. По графику КПД определить значение при $I(P_1 = \max)$. Сравнить его с теоретическим значением.

Контрольные вопросы

1. На [фотографиях](#) реальной экспериментальной установки показаны: общий вид установки, источник постоянного тока и измерительный блок амперметр - вольтметр, стенд с переменным резистором и клеммами для подключения соединительных проводов. При нажатии курсором мыши на миниатюру фото 1,2 или 3 появляется увеличенное фото. По этим фотографиям описать назначение кнопок, клемм,

индикаторов вольтметра-амперметра и источника. Объяснить, какие элементы схемы соединяет каждый провод.



2. Как в электрическую цепь включается амперметр? Каким должно быть внутреннее сопротивление амперметра: а) идеального, б) реального?
3. Как в электрическую цепь включается вольтметр? Каким должно быть внутреннее сопротивление вольтметра: а) идеального, б) реального?
4. При каких условиях вольтметр, присоединённый к выводам источника ЭДС, показывает напряжение на внешней нагрузке?
5. **Вывести** вольтамперную характеристику $U(I)$ для цепи «реальный источник ЭДС + нагрузка». Как по ВАХ определить ЭДС источника и его внутреннее сопротивление?
6. **Вывести** зависимость полезной мощности, выделяющейся на нагрузке, от тока для цепи «реальный источник ЭДС + нагрузка». Вывести значение сопротивления нагрузки, при котором на нагрузке выделяется максимальная мощность.
7. **Вывести** зависимость КПД от тока для цепи «реальный источник тока + нагрузка». Определить теоретическое значение КПД при оптимальной нагрузке.

Литература

1. *Суханов И.И.* Электричество и магнетизм, Изд-во НГТУ, 2022.
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики, т. 2.
4. *Калашиников С.Г.* Электричество