

Заикин А.Д., Суханов И.И.

Лабораторная работа № 11

Изучение работы источника постоянного тока

Цель работы – экспериментально определить 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. 1а. 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 имеет конечное сопротивление r_A . С помощью вольтметра V измеряют электрическое напряжение, реальный вольтметр также имеет конечное сопротивление r_V .

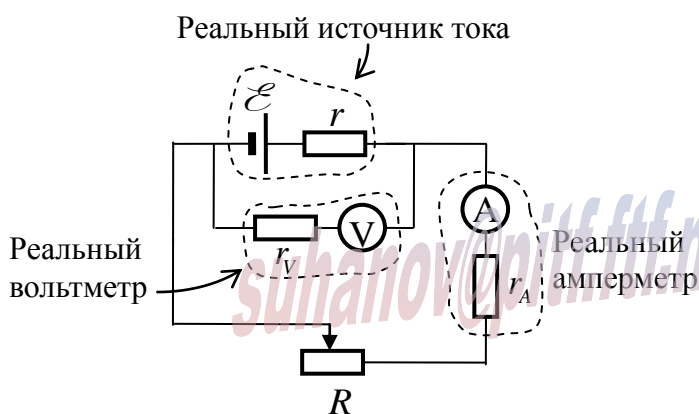


Рис. 1а

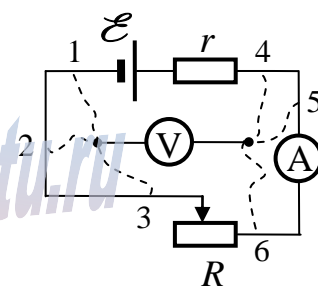


Рис. 1б

Закон Ома для участка цепи, не содержащего внешних источников,

$$U = IR_{\Pi} \quad (1)$$

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

Преобразуем цепь на рис. 1а в эквивалентную схему (рис. 1б), 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, следовательно, 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 $R_{\text{экв}}$ участка цепи с присоединённым параллельно вольтметром находят по формуле

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_{\Pi}} + \frac{1}{R_V}; \quad R_{\text{экв}} = \frac{R_{\Pi} R_V}{R_{\Pi} + R_V} \quad (2)$$

Это $R_{\text{экв}}$ всегда меньше R_{Π} . Только при $R_V \rightarrow \infty$ $R_{\text{экв}} \rightarrow R_{\Pi}$. 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. 1б 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 $R_{\text{пр}}$ намного меньше сопротивлений r и R . Оценка: ток $I = 20$ мА, сопротивление проводов $R_{\text{пр}} = 0,01 \div 0,1$ Ом. Тогда по закону Ома для участка цепи $U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}}$ 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

А.Д.Заикин, И.И.Суханов

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 (1) 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 (1),

$$U = IR$$

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

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

$$\sum I_k R_k = \sum \mathcal{E}_k \quad (3)$$

Здесь I_k, R_k - ток и сопротивление k – го проводника, а \mathcal{E}_k – электродвижущая сила, действующая на k – ом участке замкнутого контура.

Для замкнутой цепи рис. 1 в приближении малого сопротивления соединительных проводов и амперметра и большого сопротивления вольтметра уравнение (3) можно записать в виде:

$$IR + Ir = U + Ir = \mathcal{E} \quad (4)$$

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

$$U = \mathcal{E} - Ir \quad (5)$$

является линейной функцией (рис. 2а).

Рассмотрим две точки пересечения ВАХ с осями: $I = 0$ и $U = 0$. Первая соответствует разомкнутой цепи, и из (4) следует, что $U = \mathcal{E}$. Вторая точка при $I \neq 0$ возможна только при $R = 0$. Такой режим называется «коротким замыканием», ток короткого замыкания $I_{кз}$. Тогда из (5) при $U = 0$ получаем внутреннее сопротивление источника

$$r = \mathcal{E}/I_{кз} \quad (6)$$

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

$$P = P_1 + P_2 = I^2 R + I^2 r = IU + I^2 r \quad (7)$$

Полезная мощность P_1 - это электрическая мощность, выделяющаяся на внешней нагрузке R , а P_2 - мощность потерь внутри источника. С учётом (2) и (5) полезная мощность

$$P_1 = IU = I\mathcal{E} - I^2 r \quad (8)$$

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. 2б), т.е. при

$$I(P_{1max}) = I_{кз}/2 = \mathcal{E}/2r \quad (9)$$

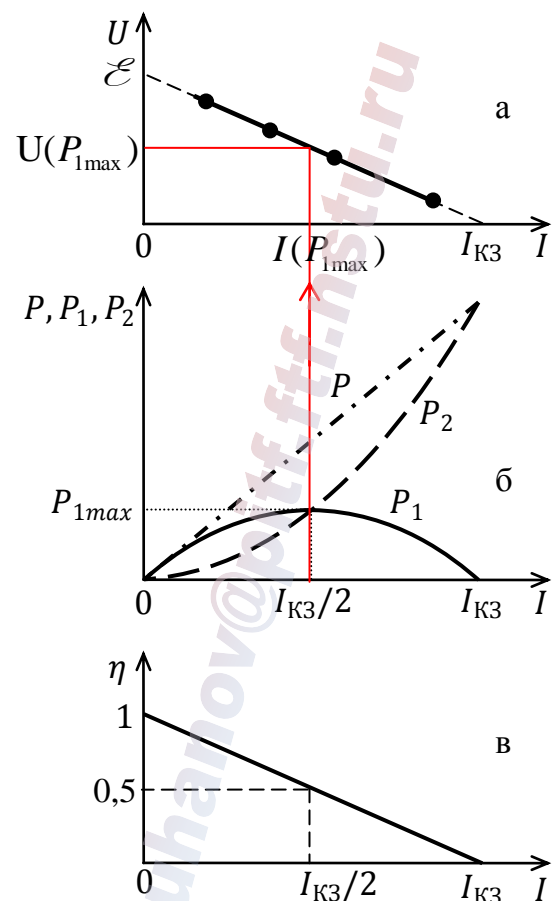


Рис. 2

Подставив это значение тока в (4), получаем, что *полезная мощность максимальна, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника*

$$R(P_{\text{max}}) = r \quad (10)$$

При этом, очевидно, $P_1 = P_2$. 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. 2б.

КПД источника — это отношение полезной мощности к полной

$$\eta = \frac{P_1}{P} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I \quad (11)$$

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

Погрешность измерения мощности

Из (7) по формуле погрешности косвенных измерений

$$\begin{aligned} \sigma_P &= \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \sigma_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2} = \sqrt{I^2 \sigma_U^2 + U^2 \sigma_I^2} = \\ &= IU \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} = P \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Описание экспериментальной установки

Компьютерный симулятор лабораторной работы № 11 размещён на странице

<http://pitf.ftf.nstu.ru/people/zaikin/>

На экране симулятора показана принципиальная электрическая схема и элементы управления и индикации (Рис. 3). Нажав курсором на бегунок «Реостат» и перемещая его, плавно изменяем показания вольтметра и амперметра, что в реальной

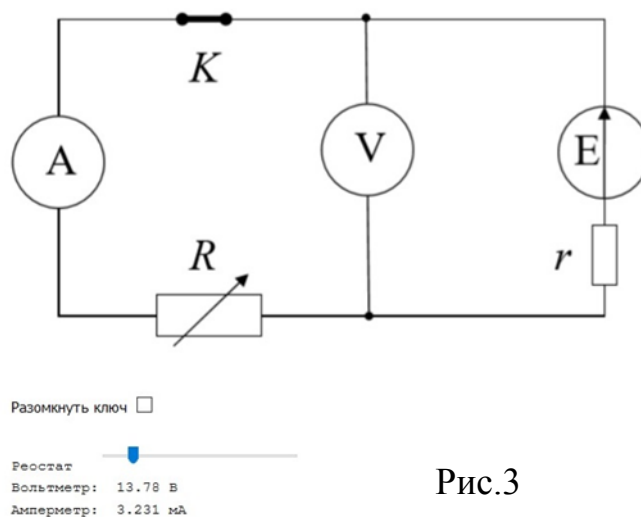


Рис.3

установке достигается перемещением подвижного контакта реостата R . Минимальное значение тока определяется максимальным сопротивлением цепи с реостатом. Максимально допустимое значение тока ограничивается защитой от перегрева элементов цепи, при этом появляется надпись «Внимание! Перегрузка по току». Отметив курсором квадрат «Разомкнуть ключ», размыкаем электрическую цепь с помощью ключа K .

Задание к лабораторной работе

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

А.Д.Заикин, И.И.Суханов

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. Получив допуск, войти на страницу работы, записать в таблицу приборов цены деления вольтметра и амперметра.
4. Нажать «Ключ», разомкнуть цепь, записать ЭДС источника и сделать фотографию экрана компьютера, включить её затем в протокол.
5. Снова нажать «Ключ», замкнуть цепь. Перемещая бегунок «Реостат», измерить значения тока и напряжения. Общее количество точек задаёт преподаватель, обычно не менее десяти.

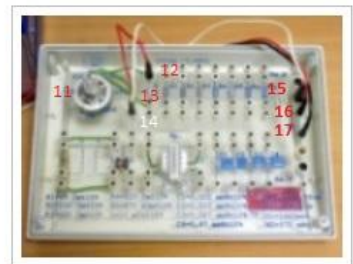
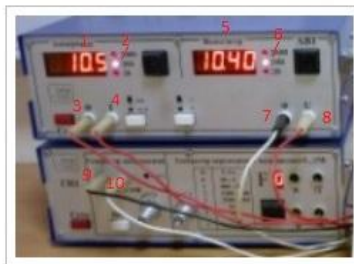
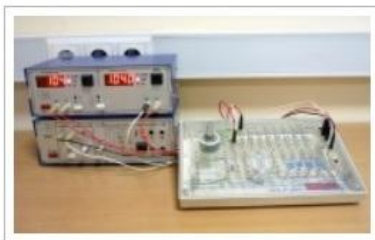
Обратите внимание, что в таблицу измерений первичные показания приборов заносятся «de visu = как вижу» - в вольтах и миллиамперах, а все преобразования первичных данных в основные единицы системы СИ, если таковые необходимы (и ошибки в расчётах!), записываются в последующих, дополнительных, ячейках таблицы.

6. На листе А4 миллиметровки с книжной ориентацией построить вольтамперную характеристику источника тока. Масштабы по осям выбирать «с запасом», чтобы на оси попали неизвестные при первом построении значения ЭДС и тока короткого замыкания, явно превышающие измеренные значения напряжения и тока. Нанести точки ($I;U$) на график, наложить на них прямую ВАХ.
7. Продолжив ВАХ до пересечения с осью напряжения, определить расчётное значение ЭДС источника. На эту же ось нанести измеренное значение ЭДС.
8. Продолжив ВАХ до пересечения с осью тока, определите ток короткого замыкания $I_{кз}$.
9. Дополнительно измерить три точки ($I;U$) вблизи значения тока $I_{кз}/2$, нанести их на ВАХ.

10. Рассчитать внутреннее сопротивление r по формуле (6).
11. По первичным результатам измерений I и U рассчитать и записать в таблицу измерений полезную мощность $P_1 = IU$. Сделать вывод, подтверждается ли квадратичная зависимость полезной мощности от тока (рис. 2б). Рассчитать мощность потерь $P_2 = I^2 r$ и полную мощность $P = P_1 + P_2$. На одном рисунке построить графики P_1 , P_2 и P в зависимости от тока. Масштаб на оси тока должен быть таким же, как и на графике ВАХ. Проверить, подтверждается ли теоретический вывод о линейной зависимости полной мощности от тока.
12. По графику P_1 определить ток максимальной полезной мощности $I(P_1 = \max)$, сравнить его с $I_{K3}/2$ (9). Обратный переход от графика мощности к ВАХ показан на рис. 2 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 (11) построить график КПД источника и определить по нему КПД при $I(P_1 = \max)$. Сравнить его с теоретическим значением.

Контрольные вопросы

1. Описать устройство реостата с подвижным контактом. Гугл – картинки вам в помощь.
2. 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. (Не люблю я всякие новомодные словечки типа превьюшка. То ли дело исконно русское – миниатюра!). По этим фотографиям описать назначение кнопок, клемм, индикаторов вольтметра-амперметра и источника, **проводов**, всего 17 позиций. Объяснить, какие элементы схемы соединяет каждый провод.



3. Как в электрическую цепь включается амперметр? Каким должно быть внутреннее сопротивление амперметра: а) идеального, б) реального?
4. Как в электрическую цепь включается вольтметр? Каким должно быть внутреннее сопротивление вольтметра: а) идеального, б) реального?
5. При каких условиях вольтметр, присоединённый к выводам источника ЭДС, показывает напряжение на внешней нагрузке?
6. **Вывести** вольтамперную характеристику $U(I)$ для цепи «реальный источник ЭДС + нагрузка». Как по ВАХ определить ЭДС источника и его внутреннее сопротивление?
7. **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.

8. **Вывести** зависимость КПД от тока для цепи «реальный источник тока + нагрузка». Определить теоретическое значение КПД при оптимальной нагрузке.