

Лабораторная работа №312

ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ТОКА ОТ НАГРУЗКИ

Приборы и принадлежности: лабораторная панель, два аккумулятора, миллиамперметр, вольтметр, переменные резисторы.

Введение. Наиболее широко распространенными источниками постоянного тока являются гальванические элементы, аккумуляторы, выпрямители. Присоединим к источнику тока ту часть, которая нуждается в его электрической энергии (лампочка, радиоприемник, микрокалькулятор и т.п.). Эта часть электрической цепи называется общим словом – нагрузкой. Нагрузка обладает некоторым электрическим сопротивлением R и потребляет от источника ток силой I (рис.1).

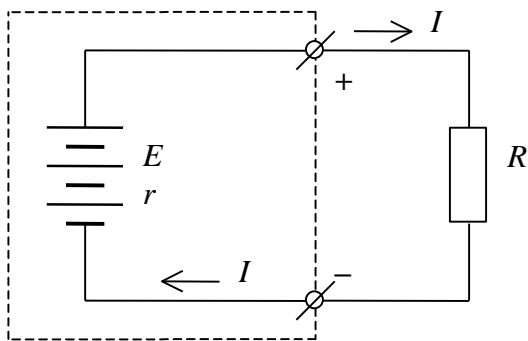


Рис.1

Нагрузка образует внешнюю часть электрической цепи. Но есть и внутренняя часть цепи – это фактически сам источник тока, он имеет электрическое сопротивление r , в нем протекает тот же ток I . Границей между внутренним и внешним участками цепи являются клеммы “+” и “-” источника тока, к которым присоединяется потребитель электрической энергии (нагрузка).

На рисунке 1 источник тока охвачен штриховым контуром.

Источник тока с электродвижущей силой E создает в замкнутой цепи ток, сила которого определяется *законом Ома*:

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1)$$

При протекании тока по сопротивлениям R и r в них выделяется тепловая энергия, определяемая *законом Джоуля-Ленца*. Мощность во внешней части цепи P_e – *внешняя мощность*

$$P_e = I^2 R. \quad (2)$$

Эта мощность является *полезной*.

Мощность во внутренней части P_i – *внутренняя мощность*. Она недоступна для использования и поэтому составляет *потери* мощности источника

$$P_i = I^2 r. \quad (3)$$

Полная мощность источника тока P есть сумма этих двух слагаемых,

$$P = P_e + P_i, \quad P = I^2 R + I^2 r, \quad P = I(IR + Ir). \quad (4)$$

Как видно из определений (2,3,4), каждая из мощностей зависит и от протекающего тока и от сопротивления соответствующей части цепи. Рассмотрим эту зависимость по отдельности.

Зависимость мощности P_e, P_i, P от тока нагрузки.

С учетом закона Ома (1) полную мощность можно записать так:

$$P = I(IR + Ir) = IE. \quad (5)$$

Таким образом, *полная мощность источника прямо пропорциональна потребляемому току.*

Мощность, выделяющаяся на нагрузке (*внешняя*), есть

$$P_e = P - P_i = IE - I^2 r = I(E - Ir). \quad (6)$$

Она равна нулю в двух случаях:

$$1) I = 0 \text{ и } 2) E - Ir = 0. \quad (7)$$

Первое условие справедливо для разомкнутой цепи, когда $R \rightarrow \infty$, второе соответствует так называемому *короткому замыканию* источника, когда сопротивление внешней цепи $R = 0$. При этом ток в цепи (см. формулу (1)) достигает наибольшего значения – *тока короткого замыкания*.

$$I_{кз} = E/r. \quad (8)$$

При этом токе *полная* мощность становится наибольшей

$$P_{нб} = EI_{кз} = E^2/r. \quad (9)$$

Однако вся она выделяется *внутри* источника.

Выясним, при каких условиях внешняя мощность становится *максимальной*. Зависимость мощности P_e от тока является (см. формулу (6)) *параболической*:

$$P_e = IE - I^2 r.$$

Положение максимума функции $P_e(I)$ определим из условия:

$$dP_e/dI = 0, \quad dP_e/dI = E - 2Ir.$$

Полезная мощность достигает максимального значения при токе

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \frac{E}{r}, \quad (10)$$

что составляет половину тока короткого замыкания (8), (см. рис. 2):

$$I_{\max} = \frac{1}{2} I_{кз}. \quad (11)$$

Внешняя мощность при этом токе составляет

$$P_{e\max} = E \frac{I_{кз}}{2} - \frac{I_{кз}^2}{4} \frac{E}{I_{кз}}; \quad P_{e\max} = \frac{1}{4} E I_{кз} = \frac{1}{4} P_{нб}, \quad (12)$$

т.е. максимальная внешняя мощность составляет четвертую часть наибольшей полной мощности источника.

Мощность, выделяющаяся на внутреннем сопротивлении при токе I_{\max} , определяется следующим образом:

$$P_i = I_{\max}^2 r = \frac{I_{K3}^2}{4} r = \frac{I_{K3}^2}{4} \frac{E}{I_{K3}} = \frac{1}{4} E I_{K3}, \quad P_i = \frac{1}{4} P_{нб}, \quad (13)$$

т.е. составляет тоже одну четверть наибольшей полной мощности источника тока. Заметим, что при токе I_{\max}

$$P_e = P_i. \quad (14)$$

Когда ток в цепи стремится к наибольшему значению I_{K3} , внутренняя мощность

$$P_{инб} = I_{K3}^2 r = I_{K3}^2 \frac{E}{I_{K3}} = E I_{K3},$$

т.е. равна наибольшей мощности источника (9). Это означает, что вся мощность источника выделяется на его *внутреннем* сопротивлении, что, разумеется, вредно с точки зрения сохранности источника тока.

Характерные точки графика зависимости $P_e = P_e(I)$ показаны на рис. 2.

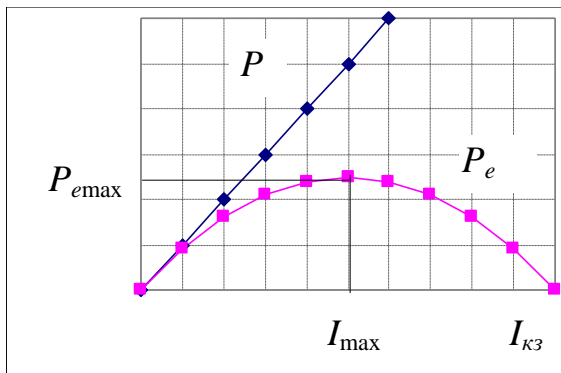


Рис.2

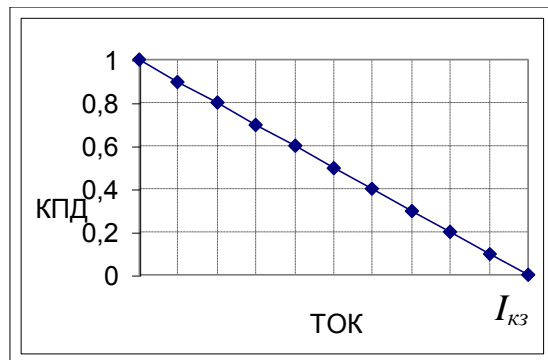


Рис. 3

Эффективность работы источника тока оценивается его *коэффициентом полезного действия*. КПД есть отношение полезной мощности к полной мощности источника:

$$\eta = P_e / P.$$

Используя формулу (6), выражение для КПД можно записать следующим образом:

$$\eta = \frac{IE - I^2 r}{IE} = \frac{E - Ir}{E}. \quad (15)$$

Из формулы (1) видно, что $E - Ir = IR$ есть напряжение U на внешнем сопротивлении. Следовательно, КПД

$$\eta = U/E. \quad (16)$$

Из выражения (15) также следует, что

$$\eta = 1 - \frac{r}{E} I, \quad (17)$$

т.е. КПД источника зависит от тока в цепи и стремится к наибольшему значению, равному единице, при токе $I \rightarrow 0$ (рис.3). С увеличением силы тока КПД уменьшается по линейному закону и обращается в нуль при коротком замыкании, когда ток в цепи становится наибольшим $I_{кз} = E/r$.

Из параболического характера зависимости внешней мощности от тока (6) следует, что одна и та же мощность на нагрузке P_e может быть получена при двух различных значениях тока в цепи. Из формулы (17) и из графика (рис.3) видно, что с целью получения от источника большего КПД предпочтительна работа при меньших токах нагрузки, там этот коэффициент выше.

2. Зависимость мощности P_e, P_i, P от сопротивления нагрузки.

Рассмотрим зависимость полной, полезной и внутренней мощности от внешнего сопротивления R в цепи источника с ЭДС E и внутренним сопротивлением r .

Полная мощность, развиваемая источником, может быть записана следующим образом, если в формулу (5) подставить выражение для тока (1):

$$P = \frac{E^2}{R + r}. \quad (18)$$

Так полная мощность зависит от сопротивления нагрузки R . Она наибольшая при коротком замыкании цепи, когда сопротивление нагрузки обращается в нуль (9). С ростом сопротивления нагрузки R полная мощность уменьшается, стремясь к нулю при $R \rightarrow \infty$.

На внешнем сопротивлении выделяется

$$P_e = I^2 R = \frac{E^2}{(R + r)^2} R = \frac{E^2}{(R + r)} \cdot \frac{R}{(R + r)}, \quad (19)$$

$$P_e = P \frac{R}{R + r}. \quad (20)$$

Внешняя мощность P_e составляет часть полной мощности P и ее величина зависит от отношения сопротивлений $R/(R+r)$. При коротком замыкании внешняя мощность равна нулю. При увеличении сопротивления R она сначала увеличивается. При $R \gg r$ внешняя мощность по величине стремится к полной. Но сама полезная мощность при этом становится малой, так как уменьшается полная мощность (см. формулу 18). При $R \rightarrow \infty$ внешняя мощность стремится к нулю как и полная.

Каково должно быть сопротивление нагрузки, чтобы получить от данного источника максимальную внешнюю (полезную) мощность (19)?

$$P_e = \frac{E^2}{(R + r)^2} R.$$

Найдем максимум этой функции из условия:

$$\frac{dP_e}{dR} = 0, \quad E^2 \frac{r^2 - R^2}{(R+r)^4} = 0.$$

Решая это уравнение, получаем $R_{\max} = r$.

Таким образом, во внешней цепи выделяется максимальная мощность, если ее сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника тока. При этом условии ток в цепи равен $E/2r$, т.е. половине тока короткого замыкания (8). Максимальная полезная мощность при таком сопротивлении

$$P_{e\max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{1}{4} P_{нб}, \quad (21)$$

что совпадает с тем, что было получено выше (12).

Мощность, выделяющаяся на внутреннем сопротивлении источника

$$P_i = I^2 r = \frac{E^2}{(R+r)^2} r = \frac{E^2}{(R+r)} \cdot \frac{r}{(R+r)} = P \frac{r}{R+r}. \quad (22)$$

При $R \rightarrow 0$ $P_i \rightarrow P$, а при $R=0$ достигает наибольшей величины $P_{i\ нб} = P_{нб} = E^2/r$. При $R=r$ внутренняя мощность составляет половину полной, $P_i = P/2$. При $R \gg r$ она уменьшается почти так же, как и полная (18).

Зависимость КПД от сопротивления внешней части цепи выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{I^2 R}{I^2 (R+r)} = \frac{R}{R+r}. \quad (23)$$

Из полученной формулы вытекает, что КПД стремится к нулю при приближении сопротивления нагрузки к нулю, и КПД стремится к наибольшему значению, равному единице, при возрастании сопротивления нагрузки до $R \gg r$. Но полезная мощность при этом уменьшается почти как $1/R$ (см. формулу 19).

Мощность P_e достигает максимального значения при $R_{\max} = r$, КПД при этом равен, согласно формуле (23), $\eta = r/(r+r) = 1/2$. Таким образом, условие получения максимальной полезной мощности не совпадает с условием получения наибольшего КПД.

Наиболее важным результатом проведенного рассмотрения является оптимальное согласование параметров источника с характером нагрузки. Здесь можно выделить три области: 1) $R \gg r$, 2) $R \ll r$, 3) $R \approx r$. Первый случай имеет место там, где от источника требуется малая мощность в течение длительного времени, например, в электронных часах, микрокалькуляторах. Размеры таких источников малы, запас электрической энергии в них небольшой, она должна расходоваться экономно, поэтому они должны работать с высоким КПД.

Второй случай – короткое замыкание в нагрузке, при котором вся мощность источника выделяется в нем и проводах, соединяющих источник с нагрузкой. Это приводит к их чрезмерному нагреванию и является довольно распространенной причиной возгораний и пожаров. Поэтому короткое

замыкание источников тока большой мощности (динамо-машины, аккумуляторные батареи, выпрямители) крайне опасно.

В третьем случае от источника хотят получить максимальную мощность хотя бы на *короткое* время, например, при запуске двигателя автомобиля с помощью электростартера, величина КПД при этом не так уж важна. Стартер включается на короткое время. Длительная эксплуатация источника в таком режиме практически недопустима, так как она приводит к быстрому разряду автомобильного аккумулятора, его перегреву и прочим неприятностям.

Для обеспечения работы химических источников тока в нужном режиме их соединяют между собой определенным образом в так называемые батареи. Элементы в батарее могут соединяться последовательно, параллельно и по смешанной схеме. Та или иная схема соединения определяется сопротивлением нагрузки и величиной потребляемого тока.

Важнейшим эксплуатационным требованием к энергетическим установкам является высокий КПД их работы. Из формулы (23) видно, что КПД стремится к единице, если внутреннее сопротивление источника тока мало по сравнению с сопротивлением нагрузки

Параллельно можно соединять элементы, имеющие **одинаковые** ЭДС. Если соединено n одинаковых элементов, то от такой батареи можно получить ток

$$I = \frac{E_1}{R + \frac{r_1}{n}}. \quad (24)$$

Здесь r_1 – сопротивление одного элемента, E_1 – ЭДС одного элемента.

Такое соединение выгодно применять при низкоомной нагрузке, т.е. при $R < r$. Так как общее внутреннее сопротивление батареи при параллельном соединении уменьшается в n раз по сравнению с сопротивлением одного элемента, то его можно сделать близким сопротивлению нагрузки. Благодаря этому увеличивается КПД источника. Возрастает в n раз и энергетическая емкость батареи элементов.

Если нагрузка высокоомная, т.е. $R \gg r$, то выгоднее соединять элементы в батарею последовательно. При этом ЭДС батареи будет в n раз больше ЭДС одного элемента и от источника можно получить необходимый ток

$$I = \frac{nE_1}{R + nr_1}. \quad (25)$$

Целью данной лабораторной работы является *экспериментальная проверка* полученных выше теоретических результатов о зависимости полной, внутренней и внешней (полезной) мощности и КПД источника как от силы потребляемого тока, так и от сопротивления нагрузки.

Описание установки. Для исследования рабочих характеристик

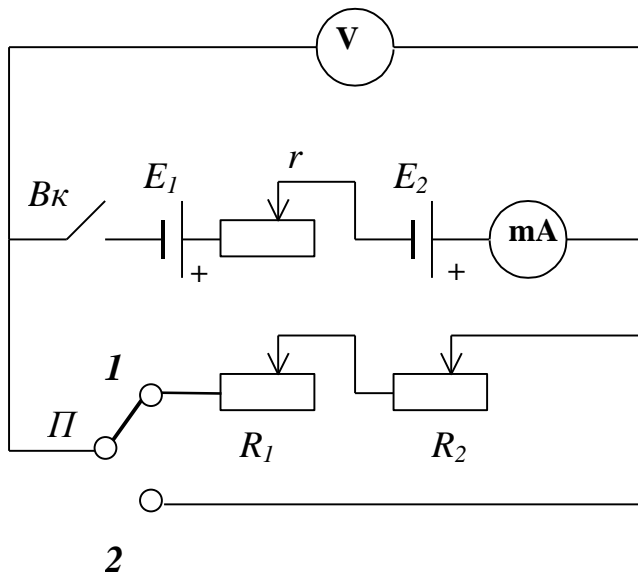


Рис.4

источника тока применяется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 4. В качестве источника тока используются два щелочных аккумулятора НКН-45, которые соединяются последовательно в одну батарею через резистор r , моделирующий внутреннее сопротивление источника. Его включение искусственно увеличивает внутреннее сопротивление аккумуляторов, что 1) защищает их от перегрузки при переходе в режим короткого замыкания и 2) дает возможность изменять внутреннее сопротивление источника по

желанию экспериментатора. В качестве нагрузки (внешнего сопротивления цепи) применяются два переменных резистора R_1 и R_2 . (один грубой регулировки, другой – тонкой), что обеспечивает плавное регулирование тока в широком диапазоне.

Все приборы смонтированы на лабораторной панели. Резисторы закреплены под панелью, наверх выведены их ручки управления и клеммы, около которых имеются соответствующие надписи.

Измерения. 1. Установите переключатель Π в нейтральное положение, выключатель $Bк$ разомкните. Ручки резисторов поверните против часовой стрелки до упора (это соответствует наибольшему сопротивлению нагрузки).

2. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 4), не присоединяя пока источники тока.

3. После проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом присоедините аккумуляторы E_1 и E_2 , соблюдая полярность.

4. Установите ток короткого замыкания. Для этого поставьте переключатель Π в положение 2 (внешнее сопротивление равно нулю) и с помощью резистора r установите стрелку миллиамперметра на предельное (правое крайнее) деление шкалы прибора – 75 или 150 мА. Благодаря резистору r в лабораторной установке есть возможность регулировать внутреннее сопротивление источника тока. На самом деле внутреннее сопротивление – величина постоянная для данного типа источников и изменить его невозможно.

5. Поставьте переключатель Π в положение 1, включив тем самым внешнее сопротивление (нагрузку) $R=R_1+R_2$ в цепь источника.

6. Изменяя ток в цепи через 5...10 мА от наибольшего до наименьшего значения с помощью резисторов R_1 и R_2 , запишите показания миллиамперметра и вольтметра (напряжение на нагрузке U) в таблицу.

7. Поставьте переключатель Π в нейтральное положение. В этом случае к источнику тока присоединен только вольтметр, который обладает довольно большим сопротивлением по сравнению с внутренним сопротивлением источника, поэтому показание вольтметра будет чуть-чуть меньше ЭДС источника. Поскольку у вас нет другой возможности определить ее точное значение, остается принять показание вольтметра за E . (Подробнее об этом см. в лабораторной работе № 311).

№ <i>пп</i>	I , <i>мА</i>	U , <i>В</i>	E , <i>В</i>	P , <i>Вт</i>	P_e , <i>Вт</i>	P_i , <i>Вт</i>	R , <i>Ом</i>	η

Обработка результатов. 1. Для каждого значения тока вычислите:

- * полную мощность по формуле (5),
- * внешнюю (полезную) мощность по формуле $P_e = IU$,
- * внутреннюю мощность из соотношения $P_i = P - P_e$,
- * сопротивление внешнего участка цепи из закона Ома $R = U/I$,
- * КПД источника тока по формуле (16).

2. Постройте графики зависимостей:

- * полной, полезной и внутренней мощности от тока I (на одном планшете),
- * полной, полезной и внутренней мощности от сопротивления R (также на одном планшете); разумней построить только часть графика, соответствующего его низкоомной части, и отбросить 4-5 экспериментальных точек из 15 в высокоомной области,
- * КПД источника от величины потребляемого тока I ,
- * КПД от сопротивления нагрузки R .

3. Из графиков P_e от I и P_e от R определите максимальную полезную мощность во внешней цепи $P_{e \max}$.

4. Из графика P_e от R определите внутреннее сопротивление источника тока r .

5. Из графиков P_e от I и P_e от R найдите КПД источника тока при I_{\max} и при R_{\max} .

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему электрической цепи, применяемой в работе.

2. Что собой представляет источник тока? Что является нагрузкой? Что такое внутренний участок цепи? Откуда начинается и где заканчивается внешний участок цепи? Для чего установлен переменный резистор r ?

3. Что называется внешней, полезной, внутренней, полной мощностью? Какая мощность составляет потери?

4. Почему полезную мощность в этой работе предлагают рассчитывать по формуле $P_e = IU$, а не по формуле (2)? Обоснуйте эти рекомендации.

5. Сравните экспериментальные результаты, полученные Вами, с расчетными, приведенными в методическом руководстве, как при исследовании зависимости мощности от тока, так и от сопротивления нагрузки.

6. Чем опасны на практике короткие замыкания в цепи? Какие меры предосторожности следует соблюдать, чтобы не допустить короткого замыкания?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1973. Т.2. §37.
2. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977. §71.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. §25–26.