

Основы электротехники

Отчёт по лабораторной работе №1

Исследование характеристик источника электрической энергии постоянного тока

Группа *P3331*
Вариант *5*

Выполнил: *Нодири Хисравхон*

Дата сдачи отчёта: *08.10.2024*

Дата защиты: *08.10.2024*

Контрольный срок защиты: 09.10.2024

Количество баллов:

1 Цель работы

Исследование режимов работы и экспериментальное определение параметров схемы замещения источника электрической энергии. К выполнению работы следует приступить после изучения раздела «Источники электрической энергии».

2 Схема эксперимента

На рисунке 1.1 представлена схема замещения источника электрической энергии постоянного тока и нагрузки, созданная в приложении LTspice.

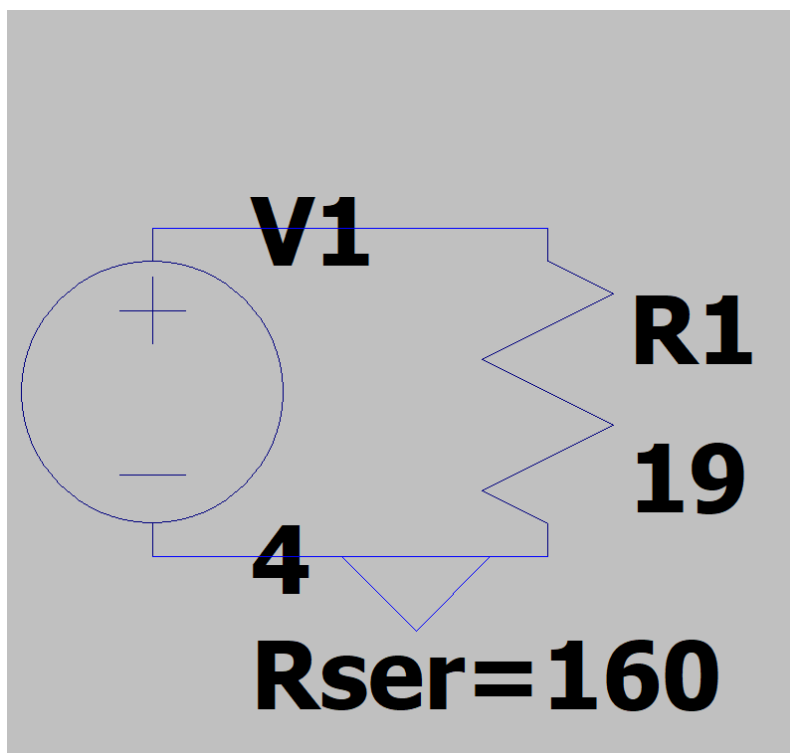


Рис. 1: Схема замещения источника электрической энергии в LTspice.

3 Заполненная таблица 1.1

3.1 Формулы для расчёта

Ток через нагрузку рассчитывается по формуле:

$$I_n = \frac{U_n}{R_n} [\text{A}],$$

где U_n — напряжение на нагрузке, а R_n — сопротивление нагрузки.

Абсолютная погрешность тока:

$$\Delta I_n = \frac{\Delta U_n}{R_n},$$

где ΔU_n — абсолютная погрешность измерения напряжения.

Внутреннее сопротивление источника для каждого промежутка между измерениями рассчитывается по формуле:

$$r_k = \frac{U_{n_k} - U_{n_{k+1}}}{I_{n_{k+1}} - I_{n_k}} [\text{Ом}].$$

Абсолютная погрешность внутреннего сопротивления Δr_k :

$$\Delta r_k = \frac{|\Delta(U_{n_k} - U_{n_{k+1}}) \cdot (I_{n_{k+1}} - I_{n_k}) + \Delta(I_{n_{k+1}} - I_{n_k}) \cdot (U_{n_k} - U_{n_{k+1}})|}{(I_{n_{k+1}} - I_{n_k})^2}.$$

Абсолютная погрешность разности напряжений:

$$\Delta(U_{n_k} - U_{n_{k+1}}) = \Delta U_{n_k} + \Delta U_{n_{k+1}}.$$

Абсолютная погрешность разности токов:

$$\Delta(I_{n_{k+1}} - I_{n_k}) = \Delta I_{n_{k+1}} + \Delta I_{n_k}.$$

Абсолютная погрешность измерения напряжения (округляем до тысячных):

$$\Delta U_n = \frac{\text{цена младшего разряда}}{2} = \frac{0,001 \text{ В}}{2} = 0,0005 \text{ В}.$$

3.2 Пример расчёта для $k = 2$

1. *Вычисляем напряжения на нагрузке:*

$$U_{n_2} = E \cdot \frac{R_{n_2}}{R_{n_2} + r} = 4 \text{ В} \cdot \frac{1440 \text{ }\Omega}{1440 \text{ }\Omega + 160 \text{ }\Omega} = 3,600 \text{ В}.$$

$$U_{n_3} = E \cdot \frac{R_{n_3}}{R_{n_3} + r} = 4 \text{ В} \cdot \frac{640 \text{ }\Omega}{640 \text{ }\Omega + 160 \text{ }\Omega} = 3,200 \text{ В}.$$

2. Вычисляем разность напряжений и её погрешность:

$$U_{n_2} - U_{n_3} = 3,600 \text{ В} - 3,200 \text{ В} = 0,400 \text{ В},$$

$$\Delta(U_{n_2} - U_{n_3}) = \Delta U_{n_2} + \Delta U_{n_3} = 0,0005 \text{ В} + 0,0005 \text{ В} = 0,0010 \text{ В}.$$

3. Вычисляем токи и их погрешности:

$$I_{n_2} = \frac{3,600 \text{ В}}{1440 \Omega} = 0,0025 \text{ А},$$

$$\Delta I_{n_2} = \frac{0,0005 \text{ В}}{1440 \Omega} \approx 3,472 \times 10^{-7} \text{ А},$$

$$I_{n_3} = \frac{3,200 \text{ В}}{640 \Omega} = 0,0050 \text{ А},$$

$$\Delta I_{n_3} = \frac{0,0005 \text{ В}}{640 \Omega} \approx 7,813 \times 10^{-7} \text{ А}.$$

4. Вычисляем разность токов и её погрешность:

$$I_{n_3} - I_{n_2} = 0,0050 \text{ А} - 0,0025 \text{ А} = 0,0025 \text{ А},$$

$$\Delta(I_{n_3} - I_{n_2}) = \Delta I_{n_3} + \Delta I_{n_2} = 7,813 \times 10^{-7} \text{ А} + 3,472 \times 10^{-7} \text{ А} = 1,128 \times 10^{-6} \text{ А}.$$

5. Вычисляем r_2 и его погрешность:

$$r_2 = \frac{0,400 \text{ В}}{0,0025 \text{ А}} = 160,000 \Omega.$$

$$\Delta r_2 = \frac{|\Delta(U_{n_2} - U_{n_3}) \cdot (I_{n_3} - I_{n_2}) + \Delta(I_{n_3} - I_{n_2}) \cdot (U_{n_2} - U_{n_3})|}{(I_{n_3} - I_{n_2})^2}.$$

Подставляем значения:

$$\begin{aligned} \Delta r_2 &= \frac{|0,0010 \text{ В} \cdot 0,0025 \text{ А} + 1,128 \times 10^{-6} \text{ А} \cdot 0,400 \text{ В}|}{(0,0025 \text{ А})^2} \\ &= \frac{(2,5 \times 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{А} + 4,512 \times 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{А})}{6,25 \times 10^{-6} \text{ А}^2} \\ &= \frac{2,9512 \times 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{А}}{6,25 \times 10^{-6} \text{ А}^2} = 0,4722 \Omega \approx 0,472 \Omega. \end{aligned}$$

3.3 Результаты расчётов

Проводим аналогичные расчёты для всех k от 2 до 10 и получаем:

Значения r_k и их абсолютные погрешности Δr_k

k	r_k , Ом	Δr_k , Ом
2	160,000	$\pm 0,472$
3	160,000	$\pm 0,543$
4	160,000	$\pm 0,638$
5	160,000	$\pm 0,756$
6	160,000	$\pm 0,944$
7	160,110	$\pm 1,227$
8	159,899	$\pm 1,752$
9	160,404	$\pm 3,167$
10	159,191	$\pm 2,274$

3.4 Вычисление значения внутреннего сопротивления и его погрешности

Среднее значение внутреннего сопротивления:

$$r = \frac{\sum_{k=2}^{10} r_k}{9} = \frac{160,000 \times 5 + 160,110 + 159,899 + 160,404 + 159,191}{9} = 160,056 \Omega.$$

Абсолютная погрешность Δr вычисляется как среднеквадратическое отклонение:

$$\Delta r = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{10} (\Delta r_k)^2}{9}}.$$

Подставляем значения:

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^{10} (\Delta r_k)^2 &= (0,472)^2 + (0,543)^2 + (0,638)^2 + (0,756)^2 + (0,944)^2 \\ &\quad + (1,227)^2 + (1,752)^2 + (3,167)^2 + (2,274)^2 \\ &= 0,2227 + 0,2949 + 0,4079 + 0,5715 + 0,8911 \\ &\quad + 1,5050 + 3,0695 + 10,0289 + 5,1705 \\ &= 22,1619. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\Delta r = \sqrt{\frac{22,1619}{9}} = \sqrt{2,4624} = 1,57 \Omega.$$

3.5 Вычисление тока короткого замыкания и его погрешности

Ток короткого замыкания:

$$I_{sc} = \frac{E}{r} = \frac{4,000 \text{ В}}{160,056 \Omega} \approx 0,02499 \text{ А} = 24,99 \text{ мА}.$$

Абсолютная погрешность ΔI_{sc} :

$$\Delta I_{sc} = I_{sc} \left(\frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta r}{r} \right).$$

Абсолютная погрешность ЭДС:

$$\Delta E = \frac{0,001 \text{ В}}{2} = 0,0005 \text{ В}.$$

Вычисляем:

$$\Delta I_{sc} = 24,99 \text{ мА} \left(\frac{0,0005 \text{ В}}{4,000 \text{ В}} + \frac{1,57 \Omega}{160,056 \Omega} \right) \approx 0,246 \text{ мА}.$$

Итоговое значение:

$$I_{sc} = (24,99 \pm 0,25) \text{ мА}.$$

3.6 Результат

Среднее внутреннее сопротивление:

$$r = (160,06 \pm 1,57) \Omega.$$

Ток короткого замыкания:

$$I_{sc} = (24,99 \pm 0,25) \text{ мА}.$$

Экспериментальные значения совпадают с расчётными в пределах погрешности, что подтверждает корректность проведённых измерений и расчётов.

3.7 Заполненная таблица 1.1

Таблица 1.1: Результаты измерений и расчётов для варианта 5 ($E = 4\text{ В}$, $r = 160\ \Omega$)

k	$R_n\ [\Omega]$	$U_n\ [\text{В}]$	$I_n\ [\text{мА}]$	$P_n\ [\text{Вт}]$	η	$r\ [\Omega]$
1	∞	4,000	0,00	0,00	1,0	—
2	1440	3,600	2,50	0,0090	0,9	160,000
3	640	3,200	5,00	0,0160	0,8	160,000
4	373	2,802	7,51	0,0210	0,7	160,000
5	240	2,400	10,00	0,0240	0,6	160,000
6	160	2,000	12,50	0,0250	0,5	160,000
7	107	1,603	14,98	0,0240	0,4	160,110
8	69	1,205	17,46	0,0210	0,3	159,899
9	40	0,800	20,00	0,0160	0,2	160,404
10	18	0,405	22,47	0,0091	0,1	159,191
11	0	0,000	25,00	0,0000	0,0	—

4 Пример расчёта для одной строки таблицы

Для расчёта параметров используем следующие формулы:

- Ток через нагрузку:

$$I_n = \frac{U_n}{R_n}$$

- Мощность, рассеиваемая на нагрузке:

$$P_n = \frac{U_n^2}{R_n}$$

- Коэффициент полезного действия:

$$\eta_n = \frac{R_n}{R_n + r}$$

- Внутреннее сопротивление источника:

$$r_k = \frac{U_k - U_{k+1}}{I_{k+1} - I_k}$$

Рассчитаем значения для строки $n = 2$:

$$\begin{aligned} U_2 &= E \cdot \frac{R_2}{R_2 + r} = 4 \text{ В} \cdot \frac{1440 \Omega}{1440 \Omega + 160 \Omega} = 3,600 \text{ В}, \\ I_2 &= \frac{U_2}{R_2} = \frac{3,600 \text{ В}}{1440 \Omega} = 0,0025 \text{ А} = 2,500 \text{ мА}, \\ P_2 &= \frac{U_2^2}{R_2} = \frac{(3,600 \text{ В})^2}{1440 \Omega} = \frac{12,96 \text{ В}^2}{1440 \Omega} = 0,009 \text{ Вт}, \\ \eta_2 &= \frac{R_2}{R_2 + r} = \frac{1440 \Omega}{1440 \Omega + 160 \Omega} = \frac{1440}{1600} = 0,9, \\ r_2 &= \frac{U_2 - U_3}{I_3 - I_2} = \frac{3,600 \text{ В} - 3,200 \text{ В}}{5,000 \text{ мА} - 2,500 \text{ мА}} = \frac{0,400 \text{ В}}{2,500 \text{ мА}} = 160 \Omega. \end{aligned}$$

Таким образом, для строки $n = 2$ были рассчитаны следующие значения:

$$I_2 = 2,500 \text{ мА}, \quad P_2 = 0,009 \text{ Вт}, \quad \eta_2 = 0,9, \quad r_2 = 160 \Omega.$$

5 Расчётная внешняя характеристика источника

На рисунке 2 представлена расчётная и экспериментальная внешняя характеристика источника. Расчётная характеристика изображена в виде синей линии, которая соединяет точки $(0, E = 4 \text{ В})$ и $(I_{sc} = 25 \text{ мА}, 0)$. Эта линия отражает теоретическую зависимость напряжения на нагрузке U_n от тока I_n , поступающего от источника, при идеальных условиях.

Экспериментальные точки, отмеченные на графике красными квадратами, соответствуют измеренным значениям напряжения U_n для разных токов I_n , согласно данным из таблицы 1.1. Эти точки показывают реальные данные, полученные при изменении сопротивления нагрузки, и их отклонения от расчётной линии могут свидетельствовать о наличии потерь или неточностей в измерениях и/или вычислениях.

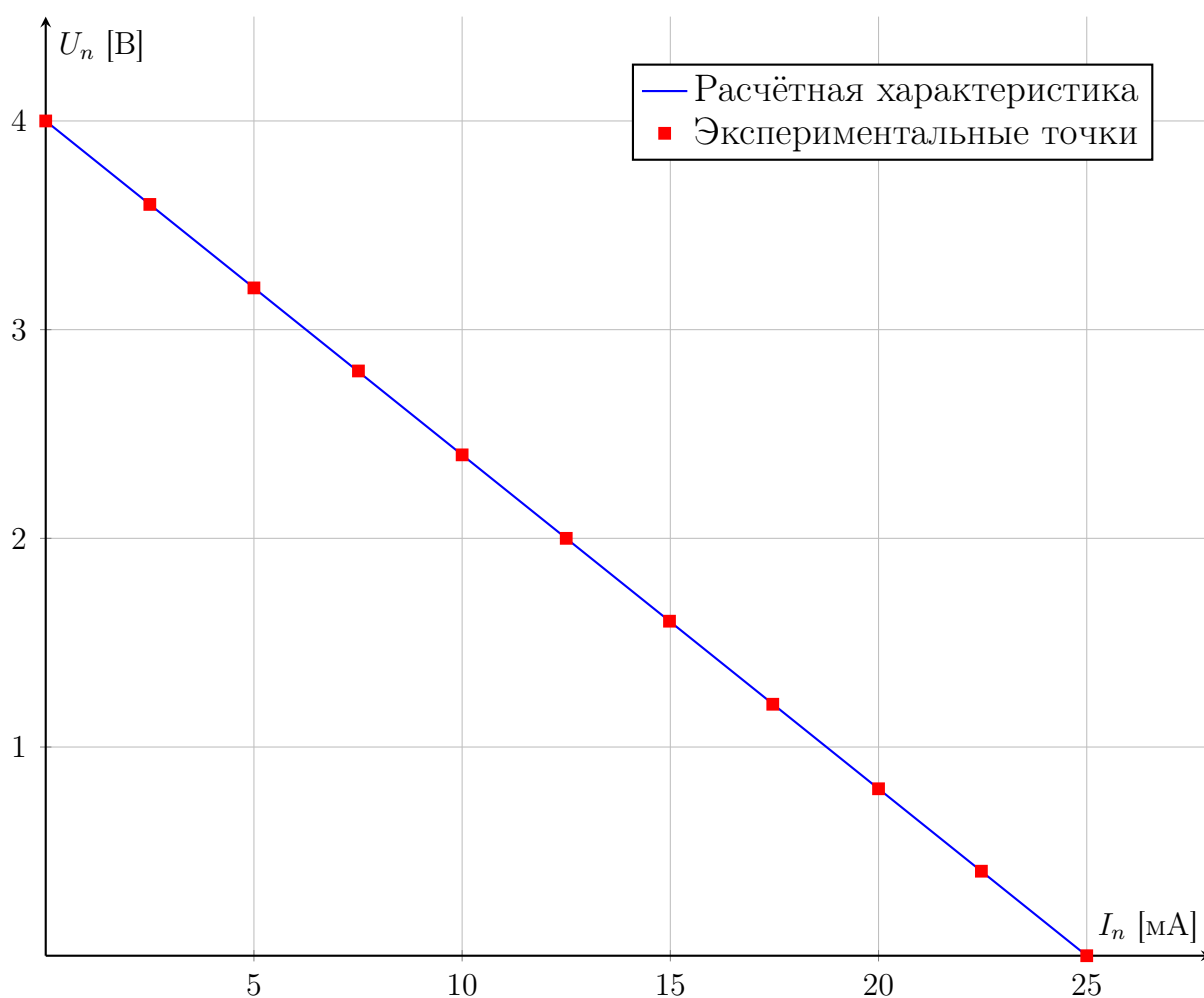


Рис. 2: График расчётной и экспериментальной внешней характеристики источника

6 Графики зависимости $P_n(I_n)$ и $\eta(I_n)$

На рисунке 3 представлена зависимость мощности в нагрузке P_n и КПД η от тока I_n .

Мощность P_n растёт с увеличением I_n до определённого предела, после чего начинает снижаться из-за значительного падения напряжения на нагрузке, вызванного потерями на внутреннем сопротивлении источника.

КПД η падает с увеличением тока I_n , так как больше энергии рассеивается на внутреннем сопротивлении источника (по закону Джоуля-Ленца), и меньше передаётся на нагрузку.

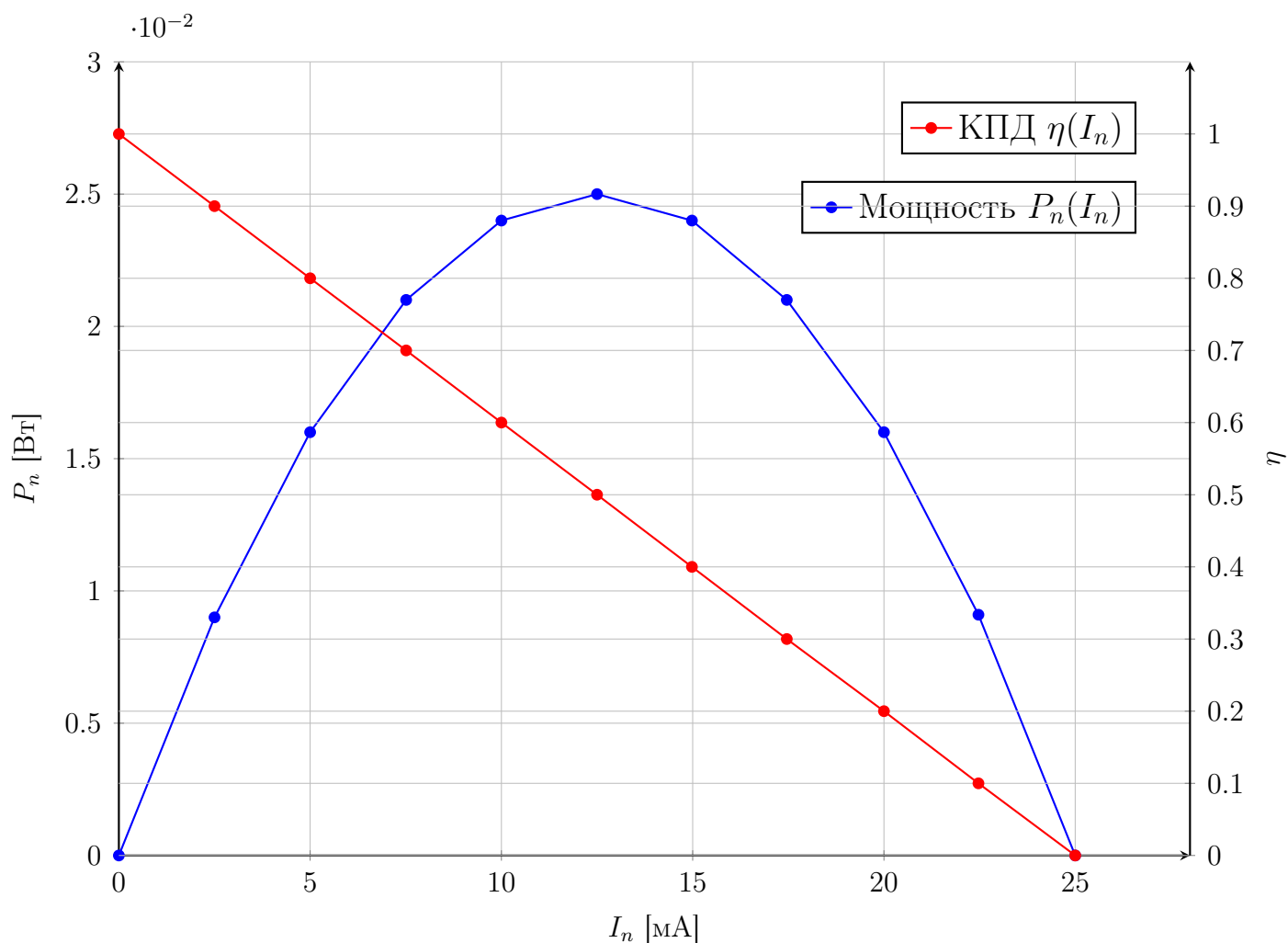


Рис. 3: Графики зависимости мощности $P_n(I_n)$ и КПД $\eta(I_n)$

7 Выводы по работе

В этой лабораторной работе я исследовал внешнюю характеристику источника постоянного тока и определил его внутреннее сопротивление и ЭДС, а также ток короткого замыкания. Я обнаружил, что при уменьшении сопротивления нагрузки напряжение на ней падает, а ток в цепи увеличивается. Это влияет на мощность в нагрузке и эффективность работы источника.

Рассчитанное внутреннее сопротивление $r = (160,06 \pm 1,57) \Omega$ совпадает с ожидаемым значением 160Ω в пределах погрешности измерений. Ток короткого замыкания $I_{sc} = (24,99 \pm 0,25) \text{ мА}$ также соответствует теоретическому значению 25 мА . Малые относительные погрешности показывают высокую точность эксперимента.

В заключение, внутреннее сопротивление существенно влияет на работу источника. При больших токах оно снижает эффективность и мощность, передаваемую на нагрузку. Эксперимент подтвердил теорию и позволил точно рассчитать параметры реальных электрических цепей.