

**ПГУПС**

**Лабораторная работа № 6**  
**«Исследование электрической цепи постоянного  
тока методом эквивалентного источника»**

Выполнил Круглов В.А.

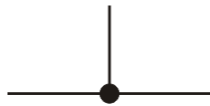
Проверил Костроминов А.А.

Санкт-Петербург  
2009

## Оглавление

Оглавление.....	1
Перечень условных обозначений:.....	2
Введение: .....	3
Цель работы: .....	3
Теоретическая часть:.....	3
Программа работы:.....	5
Таблица измерительных приборов: .....	6
Таблицы наблюдений и измерений .....	6
Теоретический расчет .....	7
Метод эквивалентного генератора.....	7
Метод эквивалентного источника тока .....	9
Выводы:.....	10
Проверка погрешностей измерений: .....	10

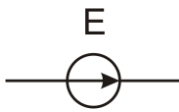
## Перечень условных обозначений:



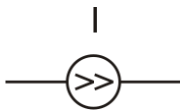
Узел соединения



Сопротивление



Источник ЭДС



Источник тока



Вольтметр



Направление тока



Обход контура (направление)

Электрическое напряжение —  $U$  [В]

Электрическое сопротивление —  $R$  [Ом]

Электрический ток —  $I$  [А]

Электрический потенциал —  $\varphi$  [В]

Электродвижущая сила —  $E$  [В]

Источник тока —  $J$  [А]

Электрическая проводимость —  $G$  [Ом<sup>-1</sup>]

## Введение:

### Цель работы:

Экспериментальное исследование цепи постоянного тока методом эквивалентного источника.

### Теоретическая часть:

Любой источник электромагнитной энергии, используемый в электрической цепи, может быть представлен в виде эквивалентного источника ЭДС, либо в виде эквивалентного источника тока. На рис. 1, а изображена схема источника ЭДС с подключенной к нему нагрузкой. Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение равновесия в этой цепи имеет вид

$$E = U + I r_{\text{вн}} \quad (1)$$

где  $E$  — ЭДС источника энергии;  
 $r_{\text{вн}}$  — внутреннее сопротивление источника энергий;  
 $U$  — напряжение на сопротивлении нагрузки.

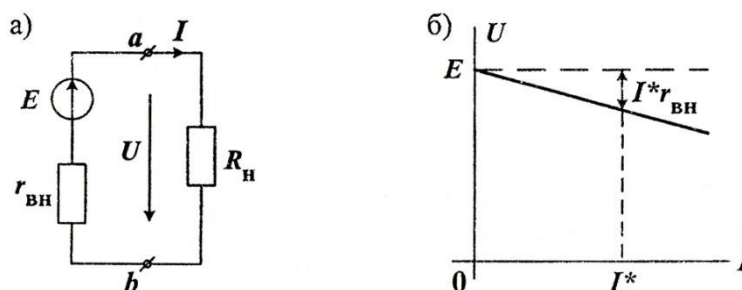


Рис. 1

Из уравнения (1) видно, что напряжение  $U$  зависит от тока  $I$ . Зависимость  $U(I)$ , называемая внешней характеристикой источника, изображена на рис. 1, б. При  $I = 0$ , т. е. при холостом ходе источника, напряжение на выводах источника равно его ЭДС. При некотором токе  $I^*$  напряжение  $U$  меньше ЭДС источника на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника  $\Delta U = I^* r_{\text{вн}}$ . (Заметим, что при  $r_{\text{вн}} = 0$ ,  $U = E$ .) Если напряжение на выводах источника не зависит от нагрузки и остается постоянным при любом значении  $R_{\text{н}}$ , такой источник называется идеальным источником ЭДС. его внешняя характеристика изображена штриховой линией на рис. 1, б.

Поделим все члены уравнения (1) на величину  $r_{\text{вн}}$  и обозначим  $E/r_{\text{вн}} = J$ . Тогда

$$J = \frac{U}{r_{\text{вн}}} + I \quad (2)$$

Полученному выражению (2) соответствует схема, изображенная на рис. 2, а, где  $J$  — величина источника тока, равная току короткого замыкания;  $g_{\text{вн}} = 1/r_{\text{вн}}$  — внутренняя проводимость эквивалентного источника тока.

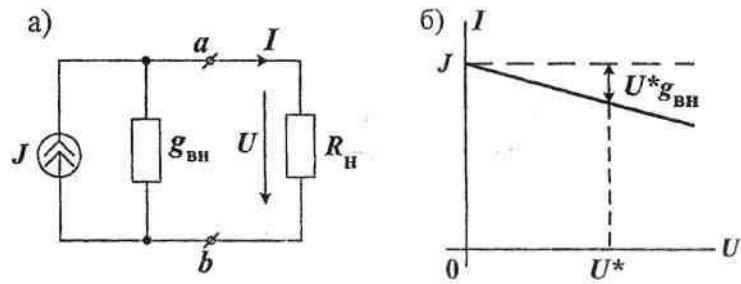


Рис. 2

Зависимость  $I(U)$ , называемая внешней характеристикой источника тока, изображена на рис. 2, б. При некотором напряжении  $U^*$  на выводах источника ток в нагрузке меньше тока  $J$  на величину  $U^* g_{BH}$ . Схемы, изображенные на рис. 1, а и 2, а, эквивалентны. Заметим, что при  $g_{BH} = 0$ , т. е. при  $r_{BH} = \infty$ ,  $I = J$ , ток в нагрузке не зависит от сопротивления нагрузки и остается постоянным при любом значении  $R_n$ . Такой источник называется идеальным источником тока, его внешняя характеристика изображена на рис. 2, б штриховой линией. Осуществление режима холостого хода источника тока сопряжено с увеличением напряжения на его выводах до бесконечности.

Одним из распространенных методов расчета электрических цепей является метод эквивалентного источника. Согласно этому методу, ток в любой ветви сколь угодно сложной цепи определяется путем замены части электрической цепи, к которой подключена рассматриваемая ветвь, эквивалентным источником ЭДС или тока. На рис. 3, а изображена схема электрической цепи, исследуемой в работе.

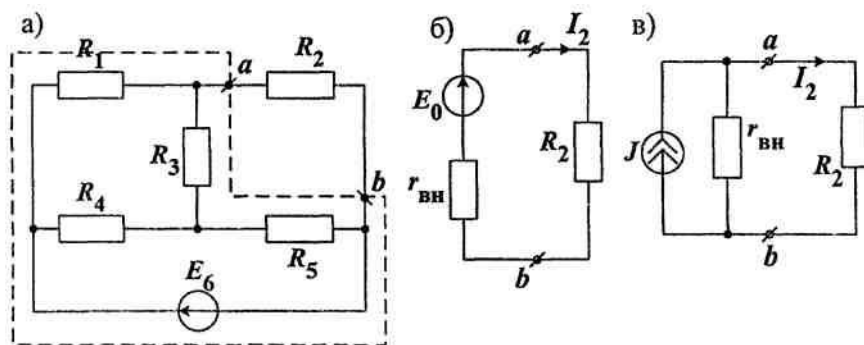


Рис.3

Пусть требуется определить ток  $I_2$ . Выделим ветвь с сопротивлением  $R_2$  выводами  $ab$  оставшуюся часть схемы, обведенную штриховой линией, представим в виде эквивалентного источника.

Если это эквивалентный источник ЭДС, то схеме получившейся эквивалентной цепи соответствует рис. 3, б. Как следует из рис. 3, а, величина ЭДС эквивалентного источника  $E_0$  равна напряжению холостого хода генератора (ветвь с сопротивлением  $R_2$  разомкнута). Величина внутреннего сопротивления генератора  $r_{BH}$  равна входному сопротивлению части цепи, обведенной штриховой линией (ЭДС  $E_6$  заменяется ее внутренним сопротивлением), со стороны разомкнутых зажимов  $ab$ .

Если часть цепи (рис. 3, а), обведенная штриховой линией, заменяется эквивалентным источником тока (рис. 3, в), то величина  $J$  есть ток между зажимами  $ab$  при замыкании сопротивления  $R_2$  накоротко.

Искомый ток в схеме рис. 3, б

$$I_2 = \frac{E_0}{r_{\text{вн}} + R_2}$$

в схеме рис. 3, в

$$I_2 = J \frac{r_{\text{вн}}}{r_{\text{вн}} + R_2}$$

Таким образом, для экспериментального исследования цепи методом эквивалентного источника (ЭДС и тока), например для определения тока  $I_2$ , необходимо:

измерить напряжение  $U_{\text{xx}}$  на разомкнутых зажимах ab ( $E_0 = U_{\text{xx}}$  — режим холостого хода);

измерить ток короткого замыкания ветви ab ( $J = I_{\text{кз}}$ );

измерить сопротивление между разомкнутыми зажимами ab, заменив ЭДС  $E_6$  ее внутренним сопротивлением  $r_6$  (внутреннее сопротивление эквивалентного генератора  $r_{\text{вн}} = r_{\text{ab}}$ ). Как следует из схемы рис. 3, в, сопротивление  $r_{\text{вн}}$  также может быть найдено из выражения

$$r_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{xx}}}{J}$$

Аналогично производится исследование цепи при определении тока в какой-либо другой ветви.

### Программа работы:

1. Экспериментальное исследование цепи — измерение всех величин, которые определяют при теоретическом расчете цепи методом эквивалентного генератора. К этим величинам относятся:
  - 1.1. ток в рассматриваемой ветви  $I_n$  ( $n$  — номер ветви) схемы рис. 3, а.
  - 1.2. ЭДС эквивалентного источника  $E_0$ .
  - 1.3. внутреннее сопротивление эквивалентного источника ЭДС  $r_{\text{вн}}$ .
  - 1.4. ток источника тока  $J$ .
2. Теоретический расчет заданной цепи методом эквивалентного генератора ЭДС и тока.
3. Программа УИРС — экспериментальное и теоретическое исследование цепи (рис. 3, а) методом эквивалентного источника при замене ветви  $E_6, r_6$  источником тока  $J_6$  с внутренней проводимостью  $g_6$ .

На рис. 4 изображена схема для определения тока в ветви с сопротивлением  $R_1$ .

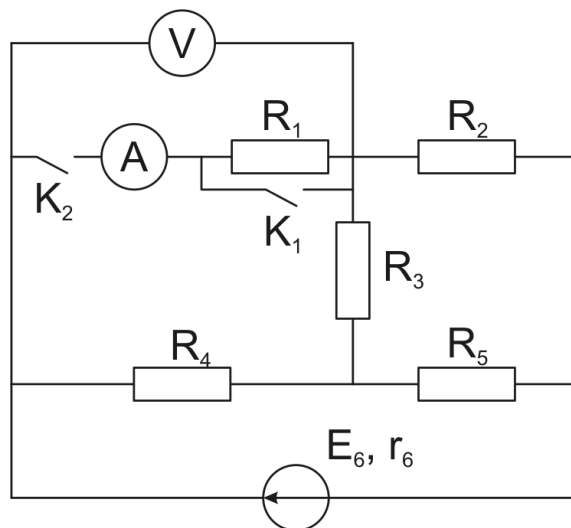


Рис.4

### Таблица измерительных приборов:

№	название	система прибора	заводской номер	класс точности прибора	предел измерения	цена деления
1	Амперметр	магнито-электрическая	9178	0.5	3 (А)	0.05 (А)
2	Вольтметр	магнито-электрическая	1252	0.5	30 (В)	0.5 (В)

### Таблицы наблюдений и измерений

Таблица 1

Режим исследования	Наблюдается		Вычисляются	
	I, А	U, В	I, А	U, В
Режим холостого хода	0	19	-	17,36667
Режим короткого замыкания	0,95	0	0,966934	-
Режим нагрузки	0,15	16	0,150456	14,44375
			0,162741	15,62315
Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора	20		19,42712057	

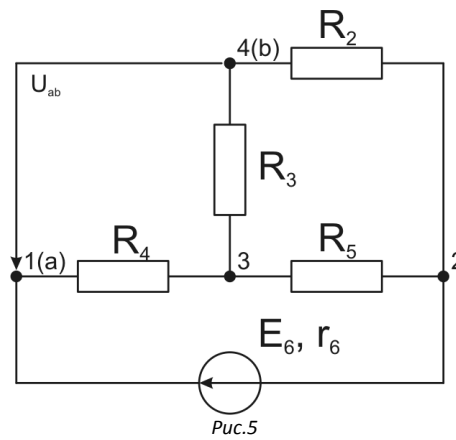
Таблица 2

Результаты измерений ЭДС и сопротивлений	E6	r6		R1	R2	R3	R4	R5	
	B								
	24,5	0,769231	U (В)=	24					
			I (А)=	0,25	0,7	1	0,65	0,65	
R (Ом)=			96	34,28571	24	36,92308	36,92308		

## Теоретический расчет

### Метод эквивалентного генератора

Исключаем из исходной схемы ветвь, в которой необходимо определить величину тока.



Методом узловых потенциалов рассчитаем потенциалы между узлами, к которым была присоединена ветвь с искомым током.

$$U_{ab}^{xx} = E_r$$

$$U_{ab}^{xx} = \varphi_b - \varphi_a$$

$$\varphi_1 \left( \frac{1}{R_4 + \left( \frac{1}{\frac{1}{R_3 + R_2} + \frac{1}{R_5}} \right)} + \frac{1}{r_6} \right) = \frac{E_6}{r_6}$$

$$\varphi_1 = \frac{E_6}{r_6} / \left( \frac{1}{R_4 + \left( \frac{1}{\frac{1}{R_3 + R_2} + \frac{1}{R_5}} \right)} + \frac{1}{r_6} \right) = 40,52 \text{ В}$$

$$I_4 = (\varphi_1 - \varphi_3) / R_4$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 - I_4 R_4, \quad I_4 = I_6 = E_6 / r_6, \quad \varphi_3 = 39,36 \text{ В}$$

$$I_{23} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{R_2 + R_3}, \quad \varphi_2 = 0, \quad I_{23} = 0,675 \text{ А}$$

$$I_{23} = I_2 = I_3, \quad I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R_3}, \quad \varphi_4 = \varphi_3 - I_3 R_3, \quad \varphi_4 = 23,15 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_1, \quad \varphi_b = \varphi_2, \quad U_{ab}^{xx} = \varphi_1 - \varphi_2 = 17,36(6)$$



Преобразуем исходный активный двухполюсник в пассивный (рис 6).

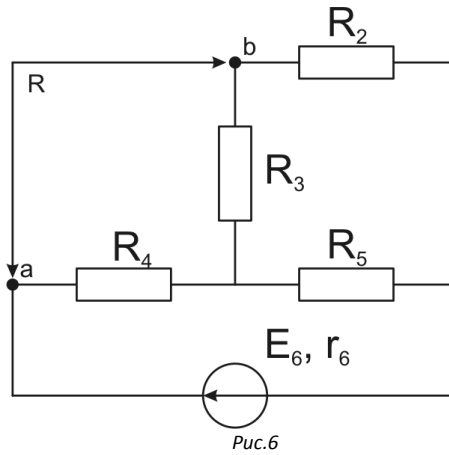


Рис.6

Рассчитаем входное сопротивление пассивного двухполюсника с помощью преобразований схемы (Это входное сопротивление определит внутреннее сопротивление эквив. источника напр.).

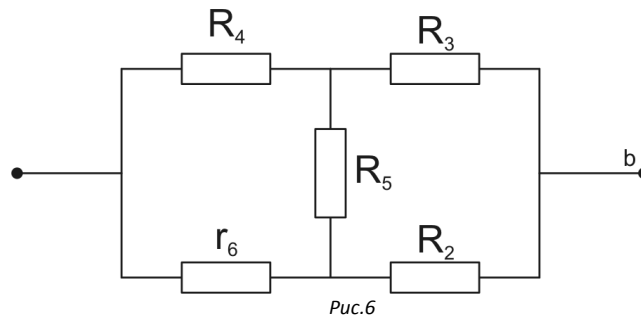


Рис.6

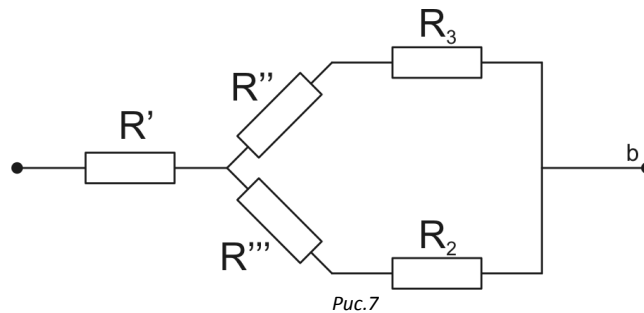


Рис.7

$$R_{\text{вх}ab} = R_{\text{вн}}$$

$$R' = R_4 \cdot r_6 / (R_4 + R_5 + r_6) = 0,38 \text{ Ом}$$

$$R'' = R_4 \cdot R_5 / (R_4 + R_5 + r_6) = 18,27 \text{ Ом}$$

$$R''' = r_6 \cdot R_5 / (R_4 + R_5 + r_6) = 0,38 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{вх}ab} = R' + \frac{1}{\left(\frac{1}{R''+R_3}\right) + \left(\frac{1}{R''' + R_2}\right)} = 19,43 \text{ Ом}$$

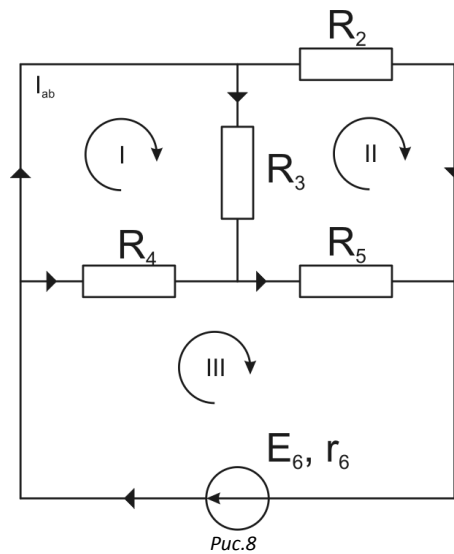
Применим теорему Тевинена:

$$I_{\text{нагр}} = \frac{U_{ab}^{xx}}{R_{\text{вх}} + R_1} = 0,15 \text{ А}$$

$$U_{\text{нагр}} = I_{\text{нагр}} \cdot R_1 = 14,44 \text{ В}$$

## Метод эквивалентного источника тока

Заменяем ветвь с током  $I_1$  в исходной схеме (рис. 5) коротким замыканием.



Методом контурных токов рассчитаем ток короткого замыкания между точками, к которым была присоединена ветвь с искомым током.

$$I: \quad I_1^K(R_3 + R_4) - I_2^K R_3 - I_3^K R_4 = 0$$

$$II: \quad I_2^K(R_2 + R_3 + R_5) - I_1^K R_3 - I_3^K R_5 = 0$$

$$III: \quad I_3^K(R_4 + R_5 + r_6) - I_1^K R_4 - I_2^K R_5 = E_6$$

$$\begin{vmatrix} R_3 + R_4 & -R_3 & -R_4 \\ -R_3 & R_2 + R_3 + R_5 & -R_5 \\ -R_4 & -R_4 & R_4 + R_5 + r_6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ E_6 \end{matrix}$$

$$I_1^K = 0,97 \text{ A}$$

$$I_2^K = 0,69 \text{ A}$$

$$I_3^K = 1,15 \text{ A}$$

$$I_{ab} = I_1^K = 0,97 \text{ A}$$

Применим теорему Нортон:

$$I_{\text{нагр}} = I_{ab} \cdot \left( \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_1} \right) = 0,162 \text{ A}$$

$$U_{\text{нагр}} = I_{\text{нагр}} \cdot R_1 = 15,62 \text{ В}$$

## Выводы:

В ходе лабораторной работы было проведено исследование электрической цепи постоянно-го тока двумя методами: методом эквивалентного источника ЭДС и методом эквивалентного источника тока.

При экспериментальном исследовании цепи были сняты показания измерительных приборов в трех режимах работы:

1. Режим холостого хода. Измерено напряжение:  $U_{ab}^{xx} = 19 \text{ В}$
2. Режим короткого замыкания. Измерен ток в ветви  $ab$ , равный току эквивалентного источника тока:  $I_{ab} = 0,95 \text{ А}$
3. Режим нагрузки. Измерено напряжение и ток в ветви  $ab$ :
4. Ток и напряжение в ветви  $ab$  в режиме нагрузки:  $I_{нагр} = 0,15 \text{ А}$   
 $U_{нагр} = 16 \text{ В}$

Значит  $R_{вн}$  эквивалентного генератора будет:  $R_{вх} = U_{ab}^{xx} / I_{ab} = 19 / 0,95 = 20 \text{ Ом}$

Результаты теоретического расчета методом эквивалентного источника ЭДС:

1. Напряжение в режиме холостого хода:  $U_{ab}^{xx} = 17,36 \text{ В}$
2. Входное сопротивление:  $R_{вх} = 19,42 \text{ Ом}$
3. Ток и напряжение в ветви  $ab$  в режиме нагрузки:  $I_{нагр} = 0,15 \text{ А}$   
 $U_{нагр} = 14,44 \text{ В}$

Результаты теоретического расчета методом эквивалентного источника тока:

1. Силу тока в режиме короткого замыкания:  $I^k = 0,97 \text{ А}$
2. Входное сопротивление:  $R_{вх} = 19,42 \text{ Ом}$
3. Ток и напряжение в ветви  $ab$  в режиме нагрузки:  $I_{нагр} = 0,16 \text{ А}$   
 $U_{нагр} = 15,62 \text{ В}$

## Проверка погрешностей измерений:

*Проверка погрешностей при сравнении теоретических измерений и практических показаний:*

1. Напряжение в режиме холостого хода:  
 $19 \Leftrightarrow 17,36$   
Погрешность равна  $(19 - 17,36) / 17,36 * 100\% = 9,40\%$
2. Ток в режиме короткого замыкания:  
 $0,95 \Leftrightarrow 0,96$   
Погрешность равна  $(0,95 - 0,96) / 0,96 * 100\% = 1,75\%$
3. Ток и напряжение в ветви  $ab$  в режиме нагрузки:  
 $0,15 \Leftrightarrow 0,15$   
 $0,15 \Leftrightarrow 0,16$   
Погрешность равна  $(0,15 - 0,155) / 0,15,5 * 100\% = 4,07\%$   
 $16 \Leftrightarrow 14,44$   
 $16 \Leftrightarrow 15,62$   
Погрешность равна  $(16 - 15) / 15 * 100\% = 6,59\%$
4. Входное сопротивление:  
 $20 \Leftrightarrow 19,43$

Погрешность равна  $(20 - 19,43) / 19,43 * 100\% = 2,59\%$