

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**"ЛЭТИ" ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**  
**Кафедра ТОЭ**

**ОТЧЕТ**  
**по лабораторной работе №2**  
**по дисциплине "Теоретические основы электротехники"**  
**Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ**

Студент гр. 9391

\_\_\_\_\_

Федоров А. Г.

Преподаватель

\_\_\_\_\_

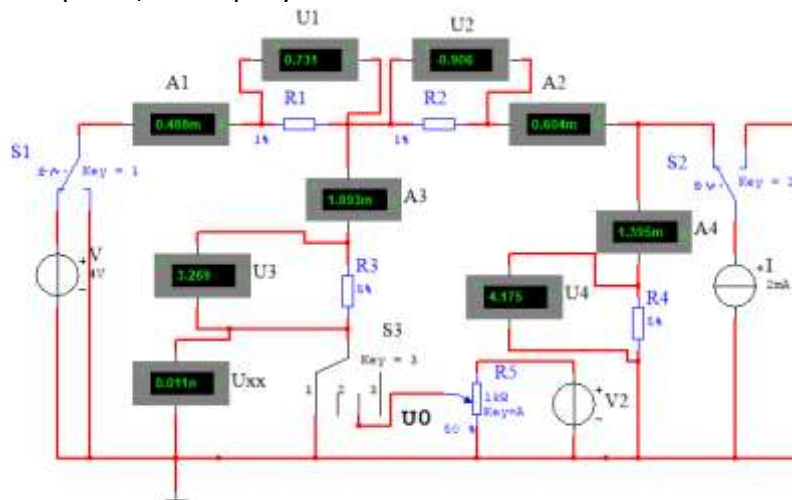
Езеров К.С

Санкт-Петербург

2021

Протокол  
к лабораторной работе №2

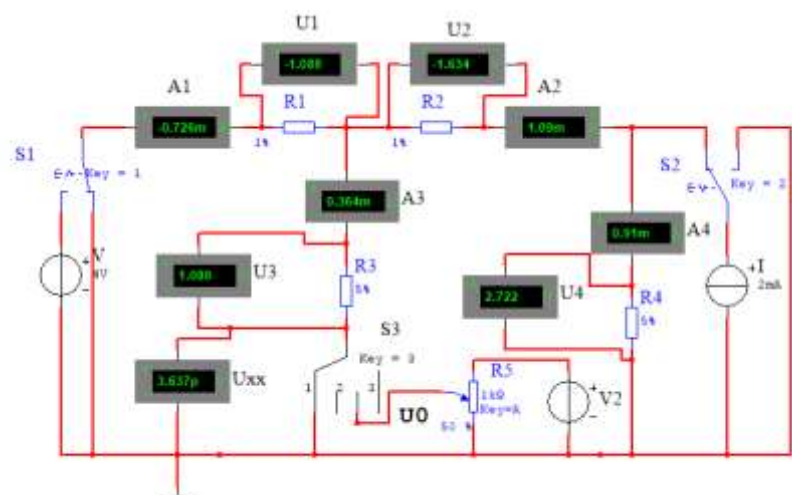
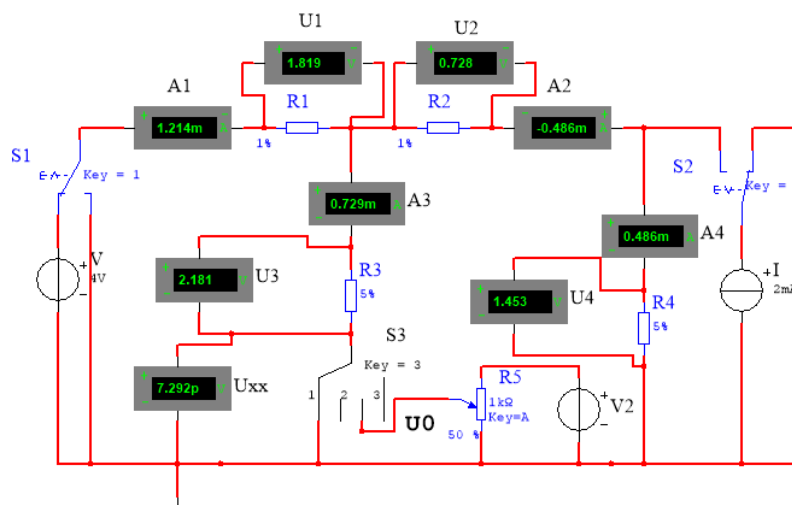
1. Соберем цепь из рисунка 2.1.



Внесем полученные данные в таблицу.

	1	2	3	4
$I_k$	0,488	0,604	1,093	1,395
$U_k$	0,731	-0,906	3,269	4,175

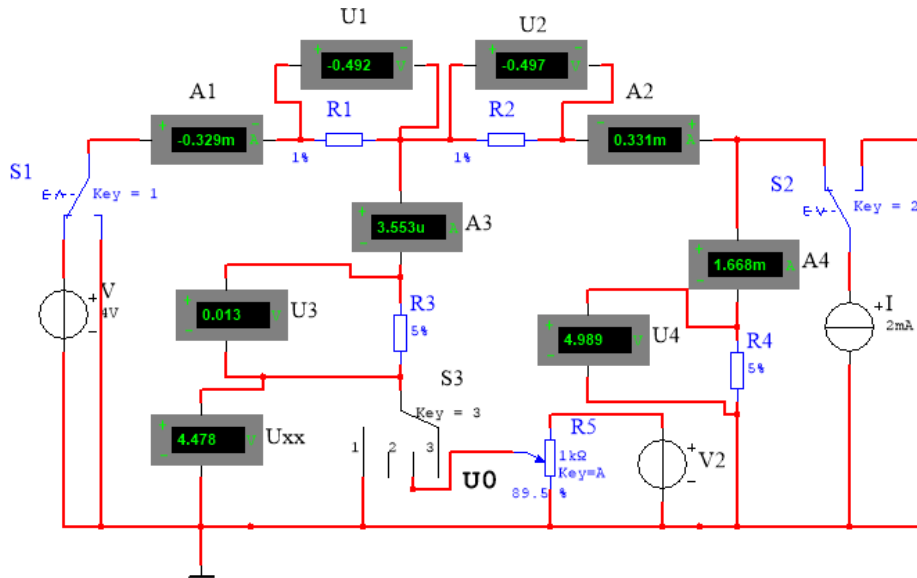
2. Соберем цепи из рисунков 2.2 а и 2.2 б.



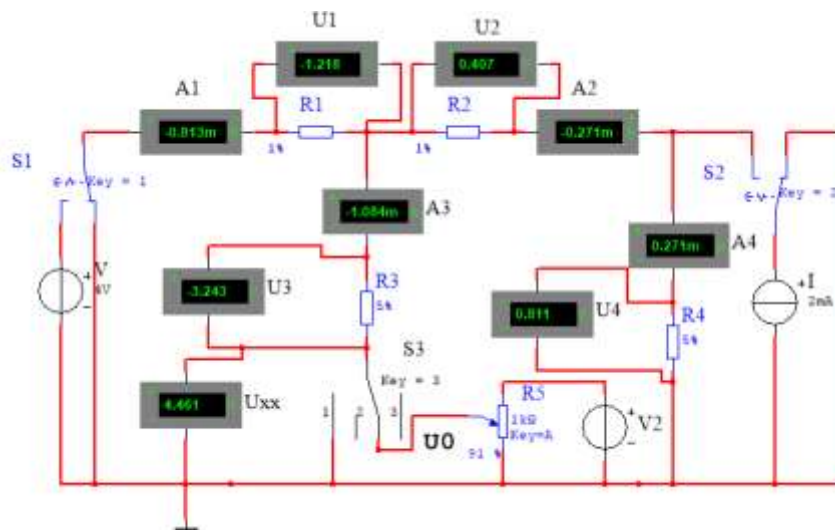
Внесем результаты в таблицу.

		1	2	3	4
$U = 4 \text{ V}; I = 0 \text{ mA}$	$I'_{\text{k}}$	1,214	0,486	0,729	0,486
$U = 4 \text{ V}; I = 0 \text{ mA}$	$I''_{\text{k}}$	0,726	1,09	0,364	0,91

3. Произведем разрыв цепи, а потом соберем цепь как на рисунке 2.3.



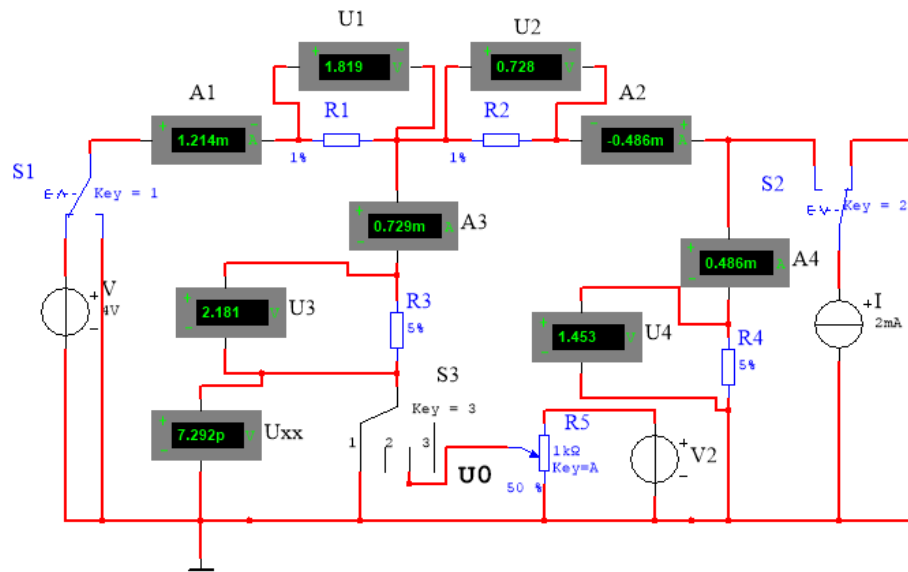
$U_{xx} = 4,478 \text{ V}$



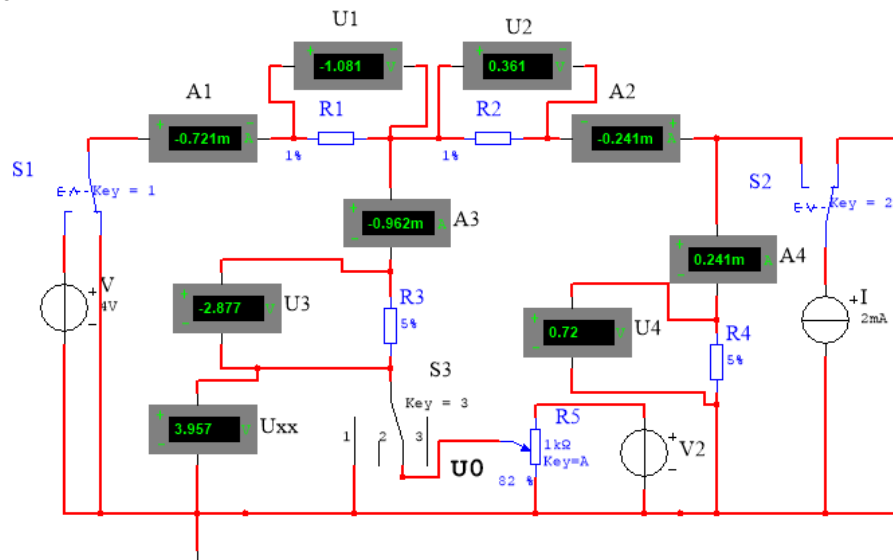
$U_0 = 4.461 \text{ V}$

$I_3 = -1.084 \text{ mA}$

4. Соберём цепь как на рисунке 2.4



$I_3 = 0.729 \text{ mA}$

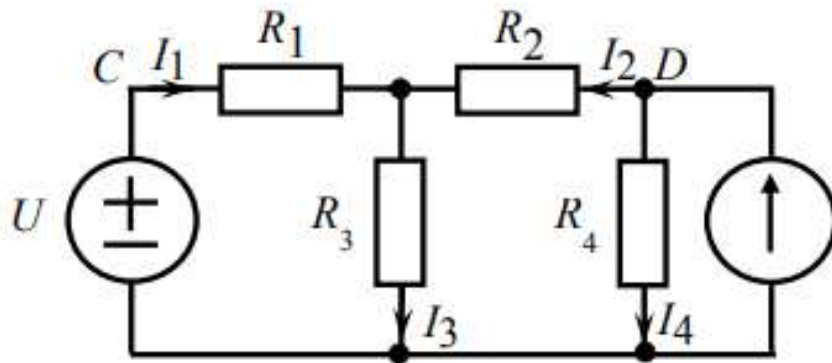


$I_1 = 0.721 \text{ mA}$

**Цель работы:** экспериментальное исследование линейных разветвленных резистивных цепей с использованием методов наложения, эквивалентного источника и принципа взаимности.

**Обработка результатов эксперимента.**

Исследование цепи при питании ее от двух источников



$U = 4\text{ В}$   
 $I = 2\text{ мА}$   
 $R_1 = R_2 = 1,5\text{ кОм}$   
 $R_3 = R_4 = 3\text{ кОм}$

$$\begin{cases} U_1 + U_3 - U = 0 \\ U_2 + U_3 - U_4 = 0 \\ I_1 + I_2 = I_3 \\ I_3 + I_4 = I + I_1 \\ I_1 = I_2 = I_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 R_1 + I_3 R_3 = 4\text{ В} \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 = I_4 R_4 \\ I_1 + I_2 = I_3 \\ I_3 + I_4 = 2\text{ мА} + I_1 \\ 2\text{ мА} = I_2 - I_4 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1,5 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1,5 & 3 & -3 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4\text{ мА} \\ 0 \\ 0 \\ 2\text{ мА} \end{pmatrix}$$

$I_1 = \frac{16}{33}\text{ мА} = 0,485\text{ мА}$   
 $I_2 = \frac{20}{33}\text{ мА} = 0,606\text{ мА}$   
 $I_3 = \frac{12}{11}\text{ мА} = 1,091\text{ мА}$   
 $I_4 = \frac{44}{33}\text{ мА} = 1,334\text{ мА}$

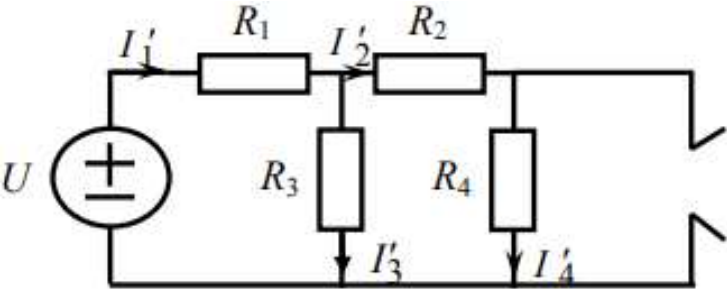
$U_1 = I_1 R_1 = 0,485\text{ мА} \cdot 1,5\text{ кОм} = 0,728\text{ В}$   
 $U_2 = -I_2 R_2 = -0,606\text{ мА} \cdot 1,5\text{ кОм} = -0,909\text{ В}$   
 $U_3 = I_3 R_3 = 1,091\text{ мА} \cdot 3\text{ кОм} = 3,273\text{ В}$   
 $U_4 = I_4 R_4 = 1,334\text{ мА} \cdot 3\text{ кОм} = 4,002\text{ В}$

	1	2	3	4
$I_k$	0,488	0,604	1,093	1,395
$U_k$	0,731	-0,906	3,269	4,175

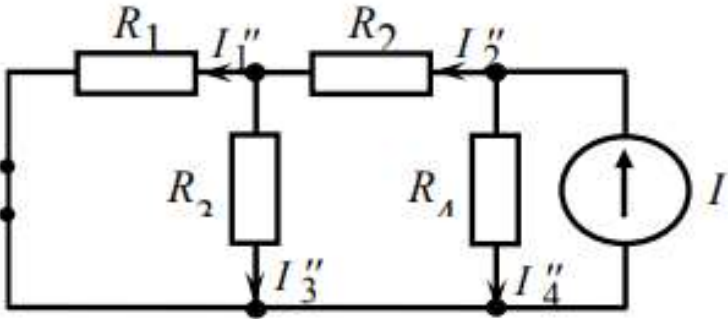
Значения силы тока и напряжения, рассчитанные по закону Кирхгофа, и значения, взятые из программы, приблизительно равны.

### Определение токов цепи методом наложения

Цепь без источника тока.



Цепь без источника напряжения.

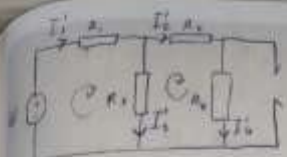


Значения тока

		1	2	3	4
U = 4 V; I = 0 mA	I'k	1,214	0,486	0,729	0,486
U = 4 V; I = 0 mA	I''k	0,726	1,09	0,364	0,91
U = 4 V; I = 0 mA	Ik	0,488	0,604	1,093	1,396

Значения тока совпадают со значениями тока в предыдущей таблице.

Для ИН:



$U = 48$   
 $R_1 = R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$   
 $R_3 = R_4 = 3 \text{ k}\Omega$

$$\begin{cases} U_1 + U_2 = U \\ U_3 + U_4 = U \\ I_1 = I_2 + I_3 \\ I_1 + I_4 = I_1' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 R_1 + I_2 R_2 = 48 \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = 0 \\ I_2 + I_3 - I_1 = 0 \\ I_1 + I_4 - I_1' = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1' R_1 + I_2 R_2 = 48 \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = 0 \\ I_2 + I_3 - I_1 = 0 \\ I_1 + I_4 - I_1' = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1,5 \text{ k}\Omega I_1' + 3 \text{ k}\Omega I_2 = 48 \\ 1,5 \text{ k}\Omega I_2 - 3 \text{ k}\Omega I_3 + 3 \text{ k}\Omega I_4 = 0 \\ -I_1' + I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1' + I_3 + I_4 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1' + 2I_2 = \frac{8}{3} \text{ mA} \\ I_2 - 2I_3 + 2I_4 = 0 \\ -I_1' + I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1' + I_3 + I_4 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 2 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1' \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{8}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$I_1' = 1,21 \text{ mA}$   
 $I_2 = 0,48 \text{ mA}$   
 $I_3 = 0,73 \text{ mA}$   
 $I_4 = 0,48 \text{ mA}$

Для ИТ:

$R_1 = R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$   
 $R_3 = R_4 = 3 \text{ k}\Omega$   
 $I = 2 \text{ mA}$

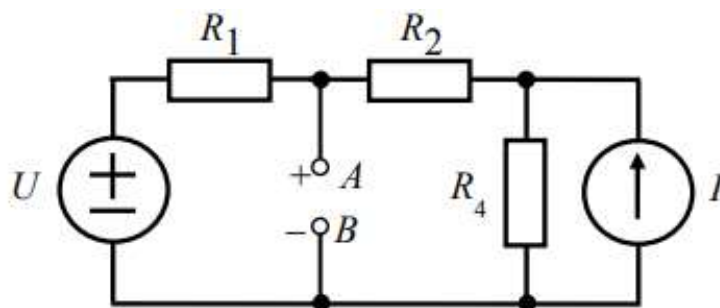
$$\begin{cases}
 I_1 R_1 = I_2 R_2 \\
 I_3 R_3 = I_4 R_4 \\
 I_1 - I_2 = I_3 \\
 I_3 - I_4 = I
 \end{cases}
 \begin{cases}
 1,5 \text{ k}\Omega I_1 - 1,5 \text{ k}\Omega I_2 = 0 \\
 1,5 \text{ k}\Omega I_3 - 3 \text{ k}\Omega I_4 = 0 \\
 I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\
 I_3 - I_4 = 2 \text{ mA}
 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & -2 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$I_1 = 0,78 \text{ mA}$   
 $I_2 = 1,03 \text{ mA}$   
 $I_3 = 0,36 \text{ mA}$   
 $I_4 = 0,91 \text{ mA}$

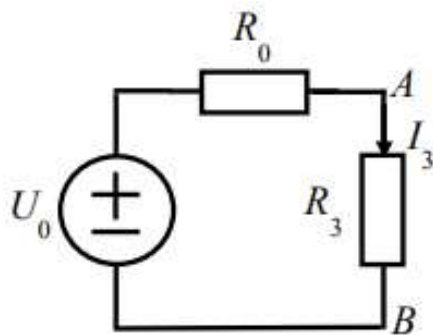
Теоретические значения приблизительно равны экспериментальным.

**Определение тока в ветви с сопротивлением R3 методом эквивалентного источника напряжения**



$$U_0 = U_{xx} = 4,478 \text{ V}$$





$$U_0 = 4.461 \text{ В}$$

$$I_3 = -1.084 \text{ mA}$$

Полученное значение силы тока приблизительно равно значению силы тока, полученного в п. 2.2.1.

$$\begin{cases} I_1 R_1 + U_{xx} = U \\ I_2 R_2 + I_4 R_4 = U_{xx} \\ I_2 + I = I_4 \\ I_4 = I = I_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1.5 \times 10^{-3} I_1 + U_{xx} = 4 \\ 1.5 \times 10^{-3} I_2 - U_{xx} + 3 \times 10^{-3} I_4 = 0 \\ I_2 - I_4 = -2 \text{ mA} \\ -I_1 + I_4 = 2 \text{ mA} \end{cases}$$

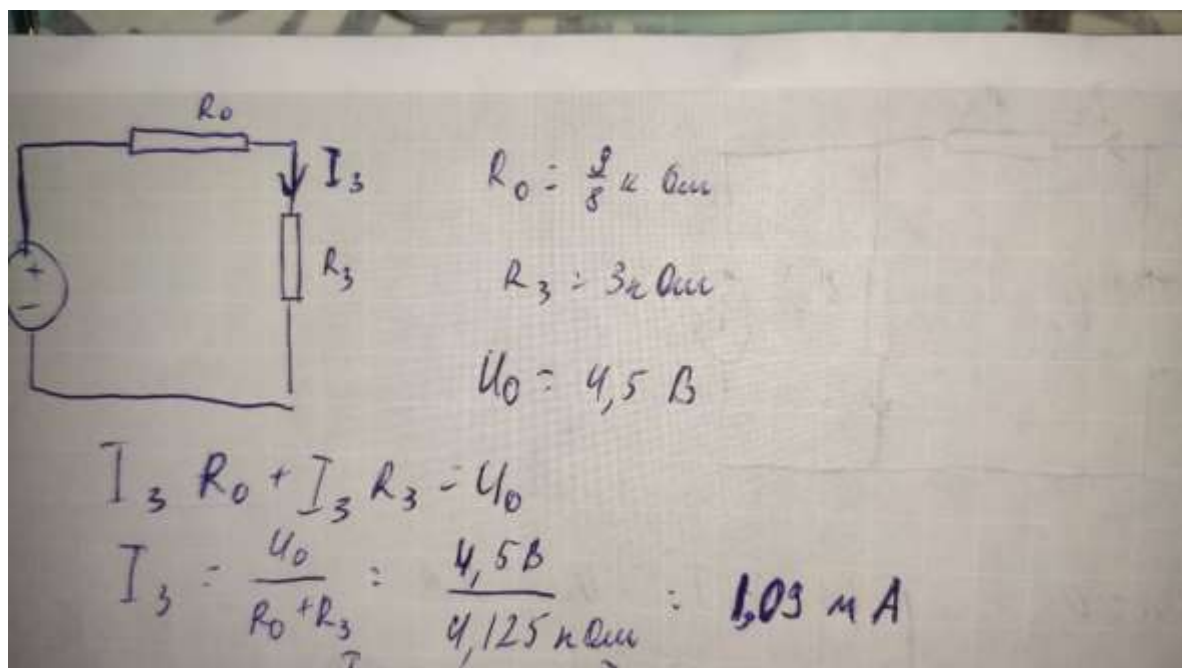
$$\begin{pmatrix} 1.5 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1.5 & -1 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ U_{xx} \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$U_1 = U_{xx} = 4.5 \text{ В}$

$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{1.5 \times 10^{-3} + 1.5 \times 10^{-3}} + \frac{1}{3 \times 10^{-3} + 3 \times 10^{-3}}} = 1.5 \text{ k}\Omega$

$R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{1.5 \text{ k}\Omega \cdot 3 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ k}\Omega$

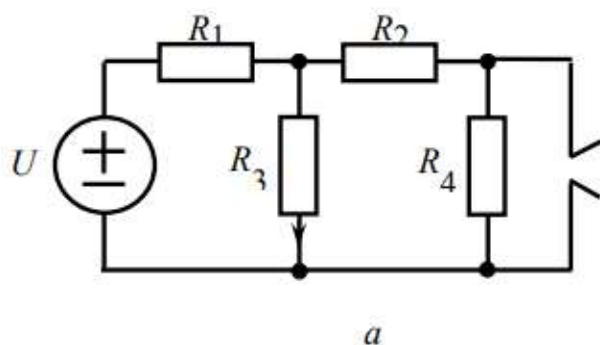
$R_0 = \frac{1.5 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = \frac{1.5 \times 1}{2.5} = 0.6 \text{ k}\Omega$



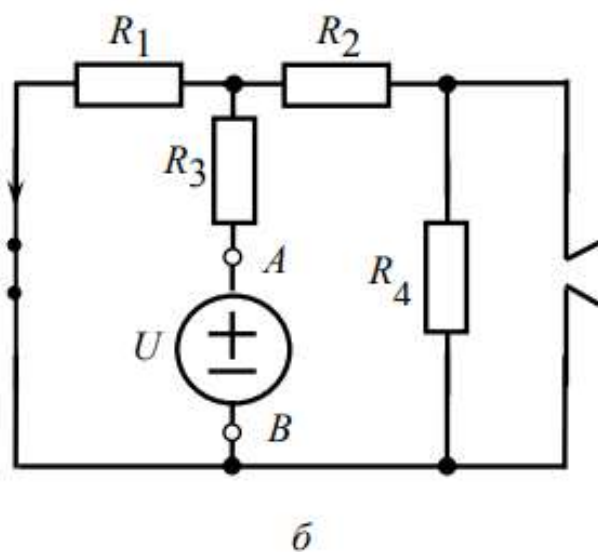
Значение силы тока приблизительно равно экспериментальному.

#### Экспериментальная проверка принципа взаимности

Значение тока  $I_3$  в схеме обозначенной на рисунке 2.4 а.

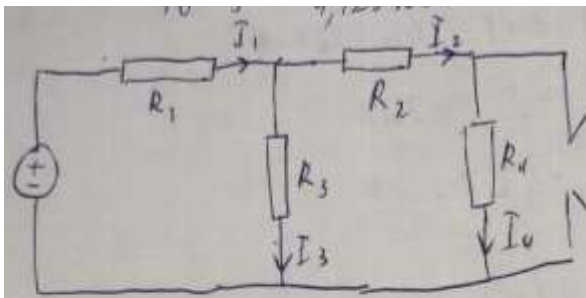


$I_3 = 0.729 \text{ мА}$



$$I_1 = 0.721 \text{ mA}$$

Значения токов в первом и во втором экспериментах приблизительно равны.



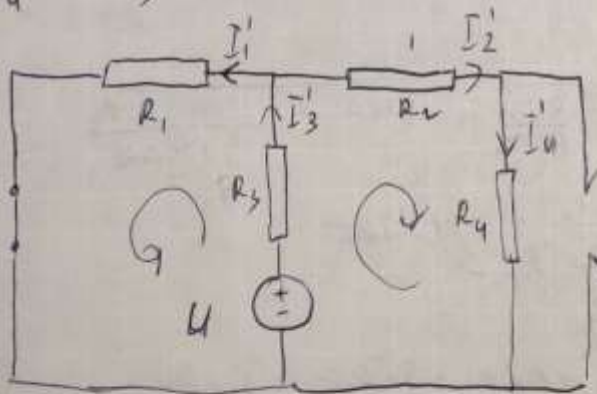
каждому из них определено параллельно.

$$I_1 = 1,21 \text{ mA}$$

$$I_2 = 0,48 \text{ mA}$$

$$I_3 = 0,73 \text{ mA}$$

$$I_4 = 0,48 \text{ mA}$$



$$R_1 = R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_4 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$U = 4 \text{ B}$$

$$\begin{cases} I'_3 = I'_1 + I'_2 \\ I'_2 = I'_4 \\ I'_1 R_1 + I'_3 R_3 = U \\ I'_2 R_2 + I'_3 R_3 + I'_4 R_4 = U \end{cases}$$

$$\begin{cases} I'_1 + I'_2 = I'_3 & I'_1 \\ R_1 R_2 + 1,5 \text{ k}\Omega R_1 + 3 \text{ k}\Omega R_3 = 4 \text{ B} & I'_3 \\ 1,5 \text{ k}\Omega I'_2 + 3 \text{ k}\Omega I'_3 + 3 \text{ k}\Omega I'_4 = 4 \text{ B} & \\ I'_2 = I'_4 & \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1,5 & 0 & 3 \\ 0 & 4,5 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$I_1 = 0,73 \text{ mA}$  равно  $I_3$

Теоретические значения приблизительно равны экспериментальным.

**Вывод:** Проведено экспериментальное исследование линейных разветвленных резистивных цепей с использованием методов наложения, эквивалентного источника и принципа взаимности.

#### Вопросы:

1. Каковы результаты контроля данных в п. 2.2.1?  
Результаты приблизительно равны экспериментальным.
2. Изменяются ли токи ветвей, если одновременно изменить полярность источника напряжения (ИН) и направление тока источника тока (ИТ) на противоположные?

Изменится направление тока, а величина силы тока не изменится.

3. Чему равно напряжение между узлами С и D цепи (рис. 2.1)?  
 $U_{CD} = U_1 + U_2 = 0,731\text{В} + (-0,906\text{В}) = -0,175\text{В}$
4. Как изменить напряжение ИН, чтобы ток 1 А в цепи рис. 2.1 стал равен нулю?

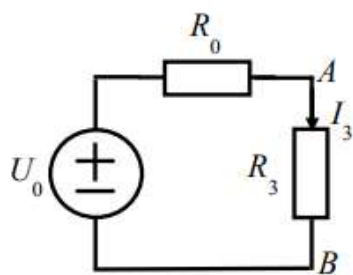
Возьмем систему уравнений из п. 2.2.1

$$\begin{cases} I_1 = 0 & U = ? & I = 2 \text{ mA} \\ U_1 + U_3 - U = 0 \\ U_2 + U_3 - U_4 = 0 \\ I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ -I_1 + I_3 + I_4 = I \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_3 R_3 - U = I_1 R_1 \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = 0 \\ I_2 - I_3 = -I \\ I_3 + I_4 = I + I_1 \end{cases}$$

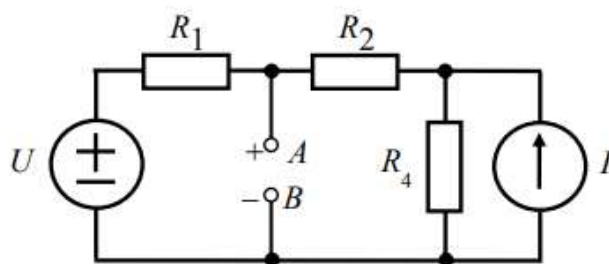
$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \text{ mA} \end{pmatrix}$$

$U = 2,4\text{В}$

5. Почему цепь рис. 2.4, б при  $U = U_{\text{xx}}$  реализует схему метода эквивалентного источника напряжения рис. 2.3, а?



а

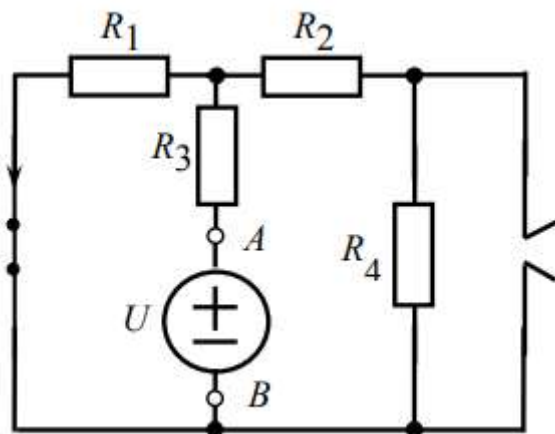


б

Рис. 2.3

Из схемы видно, что  $I_3 = U_0 / (R_0 + R_3)$ , где  $U_0$  – напряжение холостого хода между узлами  $A$  и  $B$  ветви 3 при ее обрыве (рис. 2.3, б);  $R_0$  – эквивалентное (выходное) сопротивление всех остальных ветвей, найденное по отношению к узлам  $A, B$  при исключении источников в схеме рис. 2.3, б.

$$R_0 = \frac{R_1(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_4}$$

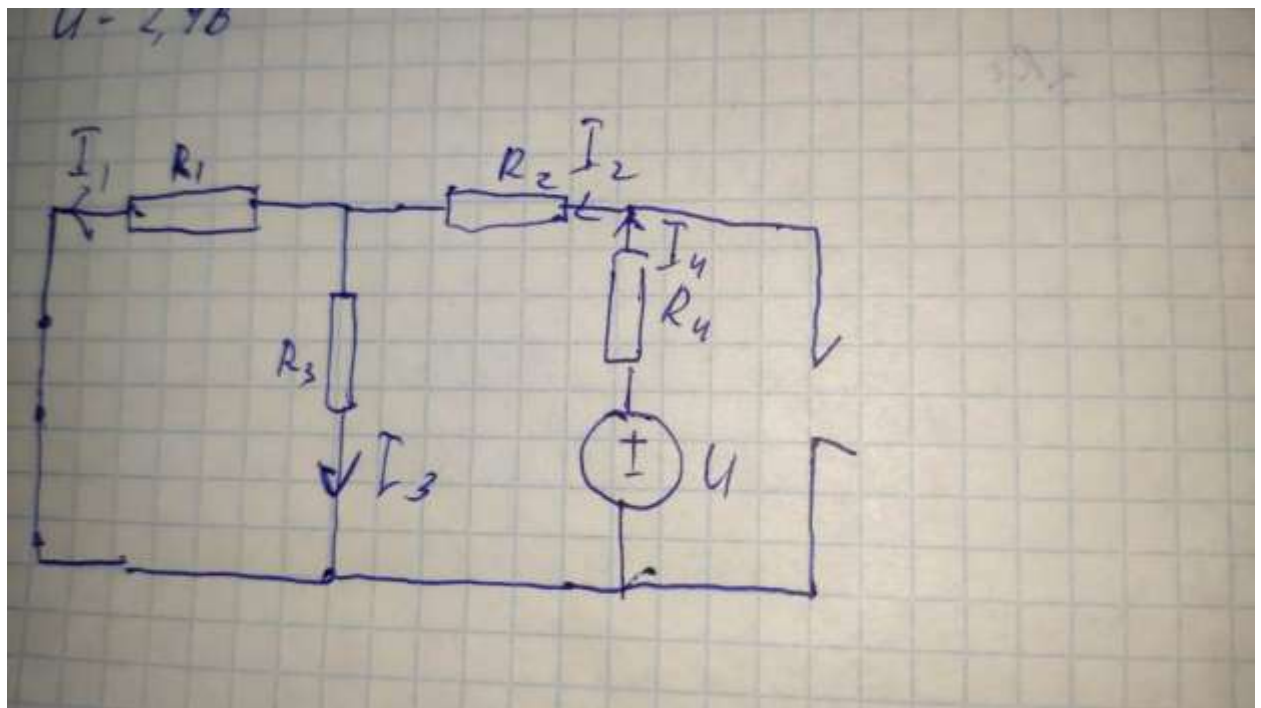


$R_0$  относительно ветви с  $R_3$  и  $U$  равно  $R_0 = \frac{R_1(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_4}$

Так как  $R_0$  для обеих схем одинаковы и ИН расположен последовательно с  $R_3$  и  $R_0$ .

6. Чему будет равен ток  $I$  если ИН  $U$  поместить в ветвь 4, а ИТ отключить?





$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = U \\ I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0 \\ I_2 = I_1 + I_3 \\ I_2 = I_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 (R_1 + R_4) + I_3 (R_2 + R_3 + R_4) = U \\ I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 4,5 \text{ k}\Omega & 7,5 \text{ k}\Omega \\ 1,5 \text{ k}\Omega & -3 \text{ k}\Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,8 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$I_1 = 0,48 \text{ mA}$$

7. Как проконтролировать результаты экспериментов в пп. 2.2.2, 2.2.3 и 2.2.4?  
Значения эксперимента проконтролированы выше.