

2.2. Эквивалентные преобразования схем

2.2.A. **Цель работы:** исследование условий эквивалентности преобразований схем линейных электрических цепей.

В работе студенты экспериментально исследуют основные виды эквивалентных преобразований схем линейных цепей: последовательное соединение резистивных ветвей (резисторов), параллельное, смешанное, "звезду", "треугольник", преобразование источников.

Виртуальные эксперименты проводятся на базе пакета *MultiSim 10.0.1*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.

Создаются схемы для проведения виртуальных экспериментов. Анализируются результаты моделирования.

Рабочее задание

2.2.B. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ВЕТВЕЙ (ЭЛЕМЕНТОВ)

2.2.B.1. Сформировать схемы для проведения виртуальных экспериментов согласно схемам, представленным на рис. 2.10.

2.2.B.2. Выбрать модель нерегулируемого резистора, активизировать ее, перевести на поле и зафиксировать (см. п.1.2.B.4).

Повторить п. 2.2.B.2. нужное количество раз согласно схемам рис.2.10, либо копировать модель вызванного резистора, используя окно меню команд редактирования изображений (см.п.1.2.B.10).2.2.B.3.

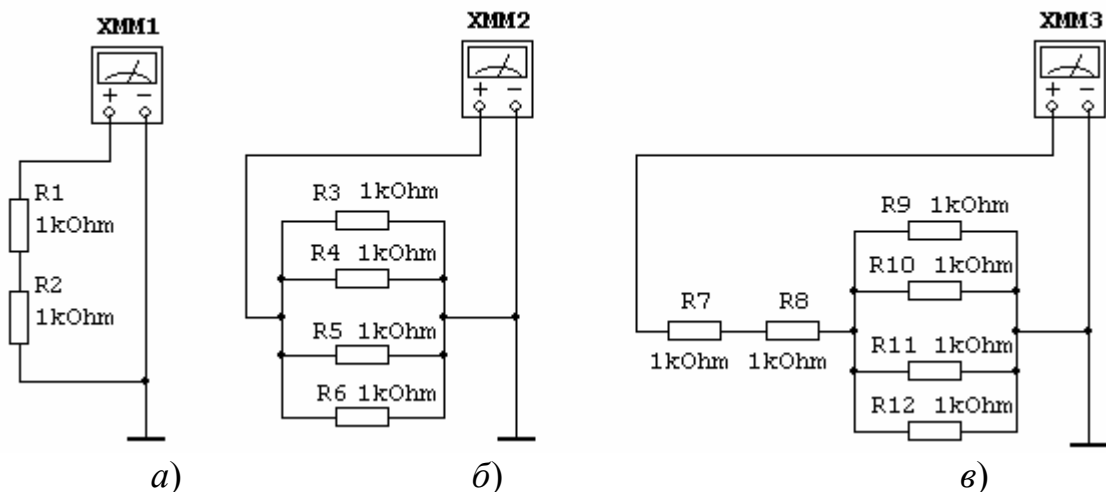


Рис.2.10. Схемы виртуальных экспериментов: а – последовательное, б – параллельное, в – смешанное соединения



Нажатием кнопки на вертикальной линейке в правой части экрана активизировать модель мультиметра *ХММ...* (*Multimeter – ХММ...*), перевести ее на поле и зафиксировать.

2.2.Б.4. Выбрать модель заземления, активизировать, перевести на поле и зафиксировать (см.п.1.2.Б.3).


Повторить п.2.2.Б.4, или копировать модель заземления согласно схемам рис.2.10.

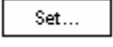
2.2.Б.5. Соединить все элементы согласно схемам рис.2.10 (см.п.1.2.Б.13).

2.2.Б.6. Значения сопротивлений резисторов $R1$, ..., $R12$ задаются преподавателем. Занести эти значения в табл.2.1.

Согласно этим значениям задать параметры соответствующих резисторов (см.п.1.2.Б.15).

2.2.Б.7. Настроить мультиметры *ХММ...*. Для этого необходимо активизировать модель соответствующего мультиметра, вызвав его лицевую панель. Расположить панели мультиметров в удобном месте на поле.

Задать режим измерения сопротивления постоянному току (режим омметра) нажатием на лицевой панели кнопки . Внутренние параметры мультиметра оставить по умолчанию.

При необходимости можно изменить параметры мультиметра, используя окно настройки параметров *Multimeter Settings*, которое вызывается кнопкой  на передней панели.

2.2.Б.8. Провести виртуальный эксперимент измерения входных сопротивлений исследуемых соединений рис.2.10.



- Запустить модели переключателем .
- Зафиксировать показания мультиметров *ХММ...*. Данные занести в табл.2.1. в строку "эксперимент".
- Отключить модели переключателем .

Таблица 2.1

Данные соединения элементов

Соединение		Последоват		Параллельное				Смешанное					
Резисторы		$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$	$R6$	$R7$	$R8$	$R9$	$R10$	$R11$	$R12$
Параметр (Ом)													
Входное сопрот. (Ом)	экспер.												
	расчет												

2.2.Б.9. По заданным значениям $R1$, ..., $R12$ рассчитать входные сопротивления исследуемых соединений, используя выражения (2.14) и (2.15). Результаты расчета занести в табл.2.1. в строку "расчет".

2.2.Б.10. Сравнить результаты эксперимента и расчета. Сделать выводы.

2.2.В. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТРЕХЛУЧЕВОЙ ЗВЕЗДЫ РЕЗИСТИВНЫХ ВЕТВЕЙ (ЭЛЕМЕНТОВ) И ТРЕУГОЛЬНИКА ВЕТВЕЙ

2.2.В.1. Сформировать схемы для проведения виртуальных экспериментов согласно схемам, представленным на рис.2.11.

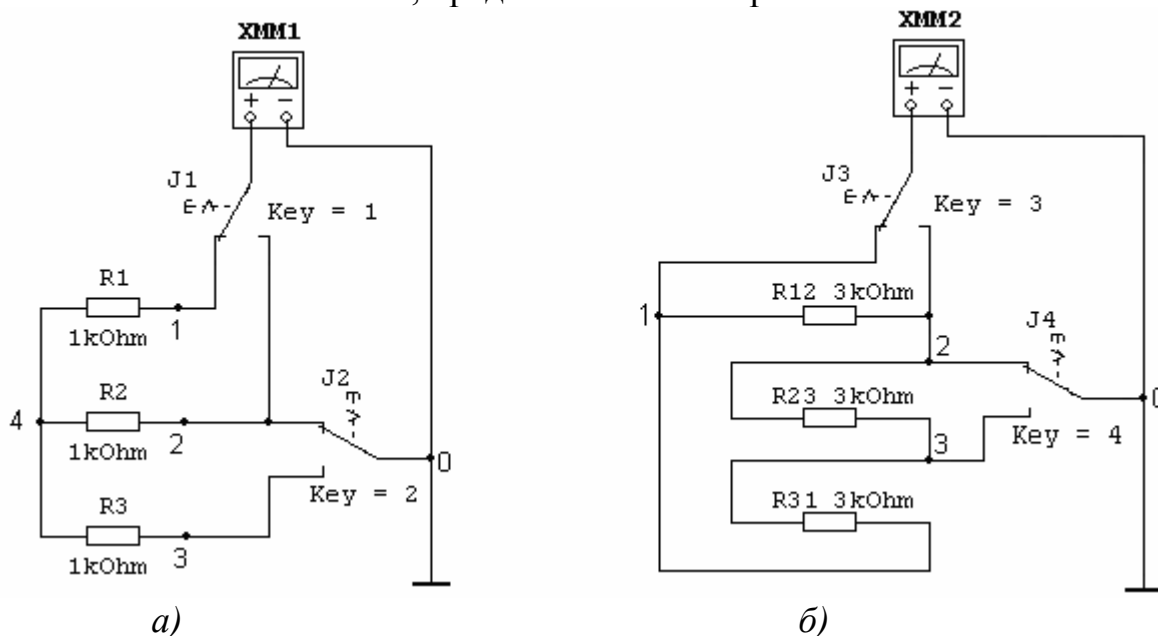


Рис.2.11. Схемы виртуальных экспериментов: *а* – соединение "звезда", *б* – соединение "треугольник"

2.2.В.2. Модели нерегулируемых резисторов $R1$, $R2$, $R3$, $R12$, $R23$, $R31$, мультиметров XMM и заземлений выбираются и размещаются на поле аналогично п.п.2.2.Б.2, 2.2.Б.3 и 2.2.Б.4.

2.2.В.3. Модели трехполюсных переключателей ($SPDT$) $J1$, $J2$, $J3$, $J4$ выбираются и размещаются на поле аналогично п.1.2.Б.9. Операции, описанные в п.1.2.Б.9, либо повторяются в необходимом количестве согласно схеме рис.2.11, либо применяются операции копирования (см.п.1.2.Б.10).

2.2.В.4. Соединить все элементы согласно схемам рис.2.11.

2.2.В.5. Преподавателем задаются значения сопротивлений либо для резисторов $R1$, $R2$ и $R3$ (соединение "звезда"), либо для резисторов $R12$, $R23$ и $R31$ (соединение "треугольник").

Заданные значения сопротивлений резисторов заносятся в табл.2.2.

Таблица 2.2

Данные эквивалентного преобразования

Соединение		"звезда"			"треугольник"		
Резисторы		$R1$	$R2$	$R3$	$R12$	$R23$	$R31$
Параметры (Ом)							
Входные узлы		1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1
Входное сопротивление	эксперимент						
	расчет						

(Ом)							
------	--	--	--	--	--	--	--

2.2.В.6. Рассчитываются сопротивления резисторов эквивалентного соединения:

- R_{12} , R_{23} , R_{31} по выражениям (2.19)... (2.21), если задавались значения R_1 , R_2 , R_3 ;

- R_1 , R_2 , R_3 по выражениям (2.16) ... (2.18), если задавались значения R_{12} , R_{23} , R_{31} .

Результаты расчетов заносятся в табл.2.2.

2.2.В.7. Задать параметры всем резисторам схем рис.2.11 согласно соответствующим значениям табл.2.2 (см.п.1.2.Б.15).

2.2.В.8. Задать параметры переключателей J_1 , J_2 , J_3 , J_4 аналогично п.1.2.Б.16.

2.2.В.9. Настроить мультиметры ХММ... аналогично п.2.2.Б.7.

2.2.В.10. Провести виртуальные эксперименты измерения входных сопротивлений исследуемых соединений рис.2.11.

- Подключить мультиметры ХММ... к соответствующим входным узлам, поставив переключатели в нужные положения, согласно табл.2.3.

Таблица


2.3

Положения переключателей

Входное сопротивление	$R_{\text{вх.12}}$	$R_{\text{вх.23}}$	$R_{\text{вх.31}}$
Входные узлы	1-2	2-3	3-1
Положения переключателей	J_1 и J_3 к узлу 1 J_2 и J_4 к узлу 2	J_1 и J_3 к узлу 2 J_2 и J_4 к узлу 3	J_1 и J_3 к узлу 1 J_2 и J_4 к узлу 3

- Запустить модели переключателем .

- Показания мультиметров занести в табл.2.2 в строку "эксперимент".

- Отключить модели переключателем .

2.2.В.11. Рассчитать значения входных сопротивлений $R_{\text{вх.}jk}$ согласно следующим выражениям:

- для соединения "звезда" $R_{\text{вх.}jk} = R_j + R_k$ Ом;

- для соединения "треугольник"

$$R_{\text{вх.12}} = R_{12}(R_{23} + R_{31}) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}) \text{ Ом},$$

$$R_{\text{вх.23}} = R_{23}(R_{12} + R_{31}) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}) \text{ Ом},$$

$$R_{\text{вх.31}} = R_{31}(R_{12} + R_{23}) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}) \text{ Ом}.$$

Результаты расчета занести в табл.2.2 в строку "расчет".

2.2.В.12. Сравнить результаты эксперимента и расчета. Сделать выводы.

2.2.Г. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ВЗАИМНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

2.2.Г.1. Сформировать схемы для проведения виртуальных экспериментов согласно схемам, представленным на рис.2.12.

2.2.Г.2. Модели идеального источника постоянного напряжения $V1$, заземлений, нерегулируемых резисторов $R1$ и $R2$, идеального источника постоянного тока $I1$, амперметров $A1$ и $A2$, вольтметров $U1$ и $U2$, двухполюсных переключателей (SPST) $J1$ и $J2$ выбираются и размещаются на поле аналогично п.п. 1.2.Б.2, 1.2.Б.3, 1.2.Б.4, 1.2.Г.2, 1.2.Б.8, 1.2.Б.9, 1.2.Б.10 соответственно.

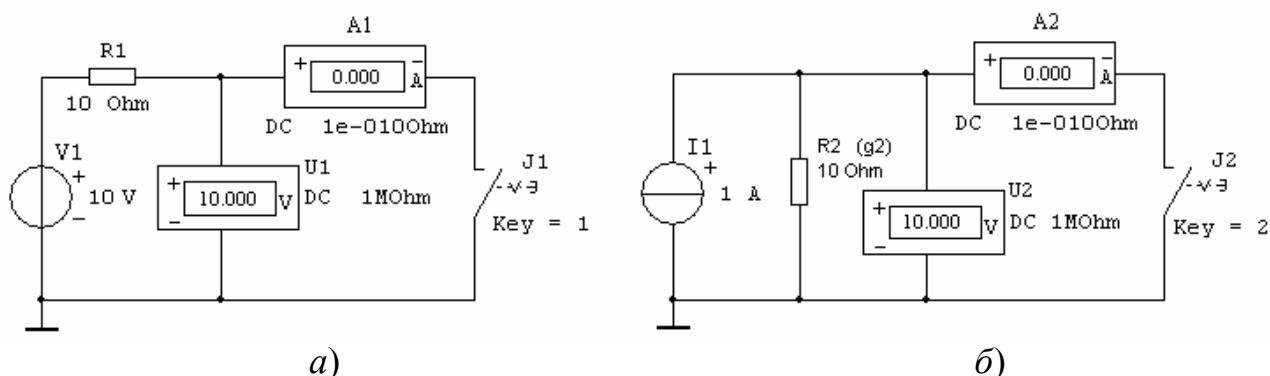


Рис.2.12. Схемы виртуальных экспериментов эквивалентных преобразований источников:
а – источника напряжения, б – источника тока

2.2.Г.3. Соединить все элементы согласно схемам рис.2.12 (см. п.1.2.Б.13).

2.2.Г.4. Преподавателем задаются значения напряжения источника $V1$ и сопротивления резистора $R1$, либо значения тока источника $I1$ и сопротивления (проводимости) резистора $R2$, которые заносятся в табл.2.4.

2.2.Г.5. Рассчитываются значения параметров эквивалентного соединения:

- ток источника $I1 = V1/R1$ и проводимость (сопротивление) резистора $g2 = 1/R1$;
- напряжение источника $V1 = I1/g2$ и сопротивление резистора $R1 = 1/g2$, если задавались параметры $I1$ и $g2(R2)$.

Результаты расчета заносятся в табл.2.4.

Таблица 2.4

Эквивалентные преобразования источников

Соединение	Линейный источник напряжения		Линейный источник тока	
Параметры элементов	$V1$, В	$R1$, Ом	$I1$, А	$g2 = 1/R2$, Сим
Холостой режим	u_0 , В	i_0 , А	u_0 , В	i_0 , А
		0		0
Режим короткого замыкания	u_k , В	i_k , А	u_k , В	i_k , А
	0		0	

2.2.Г.6. Задать параметры резисторов $R1$ и $R2$ схем рис.2.12 согласно значениям табл.2.4 (см.п.1.2.Б.15).

2.2.Г.7. Задать параметры источника постоянного напряжения $V1$ и источника постоянного тока $I1$ согласно значениям табл.2.4 (см.п.п.1.2.Б.14 и 1.2.Г.5).

2.2.Г.8. Задать параметры переключателей $J1$ и $J2$ (см.п.1.2.Б.16).


2.2.Г.9. Задать параметры вольтметров $U1$ и $U2$ (см.п.1.2.Б.18) и параметры амперметров $A1$ и $A2$ (см.п.1.2.Б.19).

2.2.Г.10. Провести виртуальные эксперименты измерения напряжений u_0 и токов i_0 при холостом режиме в обеих схемах.

- Разомкнуть переключатели $J1$ и $J2$.

- Запустить модели переключателем .

- Зафиксировать показания вольтметров и амперметров и занести результаты в табл.2.4.


- Отключить модели переключателем .

2.2.Г.11. Провести виртуальные эксперименты измерения напряжений u_k и токов i_k в режиме короткого замыкания.

- Замкнуть переключатели $J1$ и $J2$.

- Запустить модели переключателем .

- Зафиксировать показания вольтметров и амперметров и занести результаты в табл.2.4.

- Отключить модели переключателем .

2.2.Г.12. По данным экспериментов построить вольтамперные характеристики (ВАХ) линейных источников на одной координатной сетке. Сравнить характеристики и сделать выводы об эквивалентности исследуемых схем.

2.3. Эквивалентность линейных резистивных цепей

2.3.А. Цель работы: исследование условий эквивалентности и основных теорем линейных резистивных цепей.

В работе студенты экспериментально исследуют условия эквивалентности линейных резистивных цепей и практическую суть основных теорем линейных цепей: метод Тевенена, метод Нортона (теорем об эквивалентных активных двухполюсниках).

Виртуальные эксперименты проводятся на базе пакета *MultiSim 10.0.1*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.

Создаются схемы для проведения виртуальных экспериментов. Анализируются результаты моделирования.

Рабочее задание

2.3.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

2.3.Б.1. Сформировать схему для проведения виртуального эксперимента согласно схеме, представленной на рис.2.13.

2.3.Б.2. Модели идеального источника постоянного напряжения $V1$, заземления, нерегулируемых резисторов $R1, \dots, R6$, двухполюсных переключателей ($SPST$) $J1, J2, J3$, амперметра $A1$ и вольтметра $U1$ выбираются и размещаются на поле аналогично п.п.1.2.Б.2, 1.2.Б.3, 1.2.Б.4, 1.2.Б.9, 1.2.Б.10, 1.2.Б.8 соответственно.

2.3.Б.3. Соединить все элементы согласно схеме рис.2.13 (см.п.1.2.Б.13).

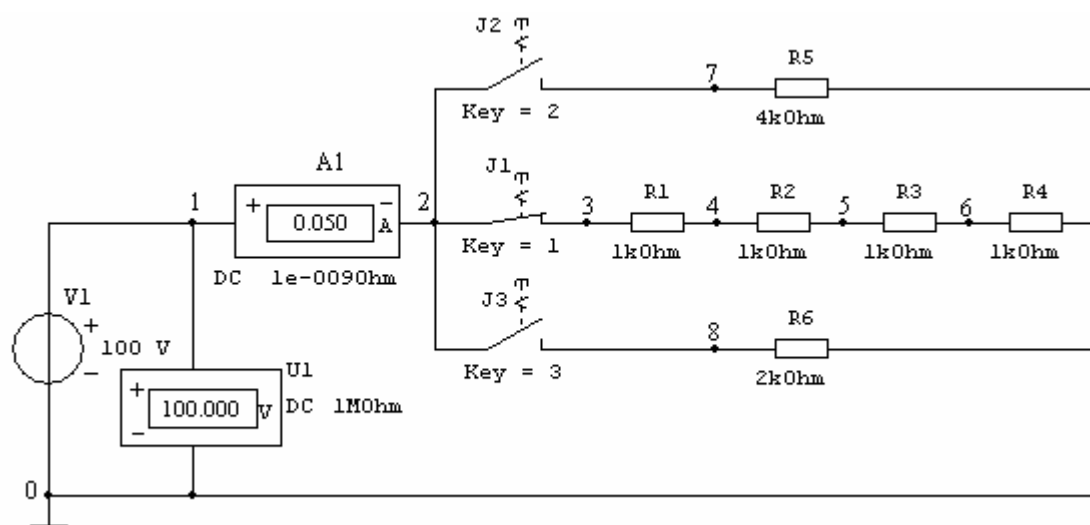


Рис.2.13. Схема виртуального эксперимента определения условий эквивалентности линейных резистивных цепей

1.3. Исследование топологических свойств электрических цепей

1.3.А. Цель работы: исследование топологических свойств электрических цепей с сосредоточенными параметрами.

В работе студенты исследуют основные топологические свойства контуров и сечений (узлов) на примере широко используемых в технике резистивных делителей напряжения и сумматоров токов.

Виртуальные эксперименты проводятся на базе пакета *Multisim 10.0.1*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент (элементов).

Создаются схемы для проведения виртуальных экспериментов. Анализируются результаты моделирования.

Рабочее задание

1.3.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПЯЖЕНИЯ

1.3.Б.1. Сформировать схему для проведения виртуальных экспериментов согласно рис.1.14.

Схема делителя напряжения представляет собой замкнутый контур, образованный источником опорного напряжения V_I и последовательным соединением резисторов $R1, R2, R3, R4$. На вход делителя подается с источника V_I опорное (входное) напряжение $u_{\text{вх}}(t) = u_5(t)$. В данной работе используется источник постоянного напряжения.

Опорное напряжение делится соответствующим образом на падения напряжений u_1, u_2, u_3, u_4 на резисторах $R1, \dots, R4$.

Резисторы могут подключаться к цепи делителя размыканием или отключаться замыканием соответствующего ключа.

Контурное уравнение соединений для этой схемы имеет вид:

$$u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - u_5 = 0. \quad (1.18)$$

В качестве выхода (результата деления) в данной схеме выбрано напряжение u_1 (резистор $R1$). Следовательно, результат деления определяется, как

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} - u_2 - u_3 - u_4. \quad (1.19)$$

1.3.Б.2. Вызвать модель источника постоянного напряжения V_I аналогично п.1.2.Б.2.

- Вызвать модель заземления аналогично п.1.2.Б.3.

1.3.Б.3. Вызвать модели резисторов $R1, \dots, R4$ аналогично п.1.2.Б.4.

1.3.Б.4. Вызвать модели двухполюсных переключателей (*SPST*): $J2, J3, J4$ аналогично п.п.1.2.Б.9 и 1.2.Б.10.

1.3.Б.5. Вызвать модели вольтметров $U1, \dots, U5$ аналогично п.1.2.Б.8.

1.3.Б.6. Расположить все элементы схемы, согласно рис.1.14 (см. п.1.2.Б.12).

1.3.Б.7. Соединить все элементы между собой согласно схеме рис.1.14 (см. п.1.2.Б.13).

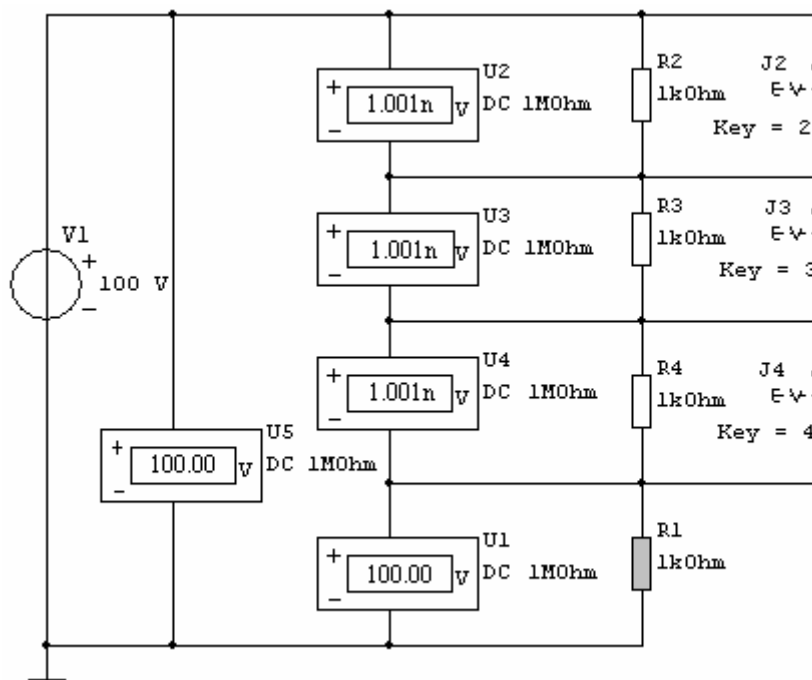


Рис. 1.14. Схема виртуального эксперимента для исследования резистивного делителя напряжения

1.3.Б.8. Задать параметры источника постоянного напряжения $V1$, аналогично п.1.2.Б.14.

- По заданию преподавателя установить значение напряжения источника в диапазоне 10 ... 100 В.

1.3.Б.9. Задать параметры резисторов $R1$, ..., $R4$ аналогично п.1.2.Б.15.

- По заданию преподавателя установить значения сопротивлений резисторов в диапазоне 100 ... 1000 Ом.

1.3.Б.10. Задать параметры переключателей $J2$, $J3$ и $J4$ аналогично п.1.2.Б.16.

- Установить для каждого ключа соответствующую цифру для управления переключателем, согласно схеме рис.1.14.

1.3.Б.11. Задать параметры вольтметров $U1$, ..., $U5$ аналогично п.1.2.Б.18.

1.3.Б.12. Провести виртуальный эксперимент определения рабочих состояний делителя напряжения.

- Отключить резисторы $R2$, $R3$, $R4$, замкнув ключи $J2$, $J3$ и $J4$.

- Запустить модель переключателем .

- Зафиксировать показания вольтметров $U1$, ..., $U5$. Данные занести в табл.1.13.

- Отключить модель переключателем .

- Поэтапно включая резисторы делителя размыканием ключей $J2$, $J3$ и $J4$, фиксировать показания вольтметров $U1$, ..., $U5$. Данные заносить в табл.1.13.

- Определить для каждого рабочего состояния коэффициент деления $k = u_{\text{вх}} / u_{\text{вых}}$ и занести его значения в табл.1.13.

- По данным виртуальных экспериментов (табл.1.13) проконтролировать корректность контурного уравнения (1.18).

Таблица 1.13

Рабочие состояния делителя напряжения

Положения ключей u , В	Все ключи замкнуты	$J2$ - разомк.	$J2$ - разомк. $J3$ – разомк.	$J2$ - разомк. $J3$ - разомк. $J4$ - разомк.
$u_{\text{ВХ}} = u_5$, В				
$u_{\text{ВЫХ}} = u_1$, В				
u_2 , В				
u_3 , В				
u_4 , В				
k				

1.3.В. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО СУММАТОРА ТОКОВ

1.3.В.1. Сформировать схему для проведения виртуальных экспериментов согласно рис.1.15.

Схема резистивного сумматора токов представляет собой параллельно-последовательное соединение резисторов.

В параллельную ветвь включаются резисторы, по которым протекают токи-слагаемые: по $R2$ - ток $i_2(t)$, по $R3$ - $i_3(t)$ и по $R4$ - $i_4(t)$. В последовательную ветвь включается суммирующий резистор $R1$, по которому протекает суммарный ток $i_1(t)$.

На вход сумматора подается с источника $V1$ опорное напряжение, которое обуславливает появление токов-слагаемых в параллельных ветвях. В данной работе используется источник постоянного напряжения.

Резисторы в параллельных ветвях могут подключаться к цепи сумматора замыканием или отключаться размыканием соответствующего ключа.

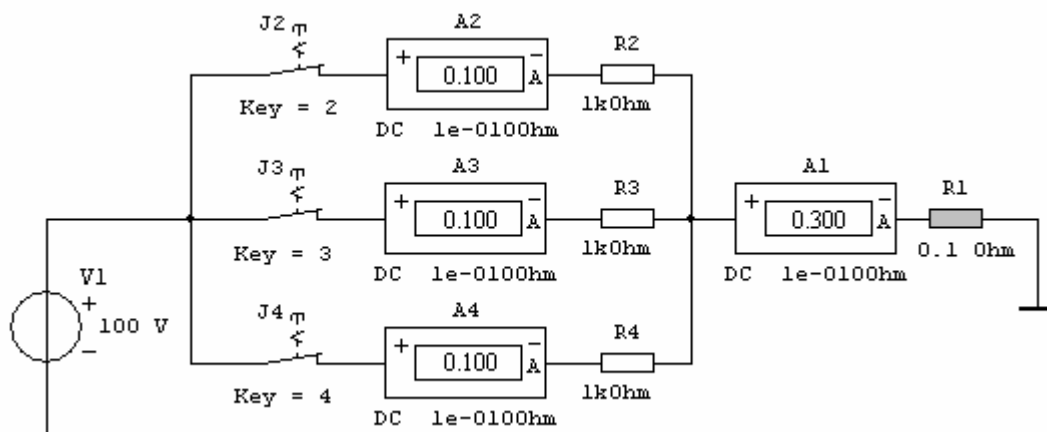


Рис.1.15. Схема виртуального эксперимента для исследования резистивного сумматора токов

Узловое уравнение соединений для этой схемы имеет вид:

$$-i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0. \quad (1.20)$$

Выходом сумматора является резистор $R1$ с током $i_1 = i_{\text{вых}}$.

Результат суммирования определяется выражением

$$i_{\text{вых}} = i_2 + i_3 + i_4. \quad (1.21)$$

1.3.В.2. Вызвать модели источника постоянного напряжения $V1$, заземления, резисторов $R1, \dots, R4$ двухполюсных переключателей ($SPST$): $J2, J3, J4$ аналогично разделу 1.3.Б.

1.3.В.3. Вызвать модели амперметров $A1, \dots, A4$ аналогично п.1.2.Б.8.

1.3.В.4. Расположить все элементы схемы согласно рис.1.15 (см.п.1.2.Б.12).

1.3.В.5. Соединить все элементы согласно схеме рис.1.15. (см.п.1.2.Б.13).

1.3.В.6. Задать параметры источника напряжения $V1$ аналогично п.1.2.Б.14.

- По заданию преподавателя установить значение напряжения источника в диапазоне 10 ... 100 В.

1.3.В.7. Задать параметры резисторов $R1, \dots, R4$ аналогично п.1.2.Б.15.

- По заданию преподавателя установить значения сопротивлений резисторов $R2, R3, R4$ в диапазоне 100 ... 1000 Ом.

- Установить значение сопротивления суммирующего резистора $R1 \ll R2, R3, R4$ в диапазоне 0,01 ... 0,1 Ом.

1.3.В.8. Задать параметры переключателей $J2, J3, J4$ аналогично п.1.2.Б.16.

1.3.В.9. Задать параметры амперметров $A1, \dots, A4$ аналогично п.1.2.Б.19.

- Установить при задании параметров на закладке *Value* в строке *Resistance (R)* значение внутреннего сопротивления для каждого амперметра равным 10^{-10} Ом ($1e - 10 \text{ Ohm}$).

1.3.В.10. Провести виртуальный эксперимент определения рабочих состояний сумматора токов.

- Подключить все резисторы $R2, R3$ и $R4$, замкнув ключи $J2, J3$ и $J4$.

- Запустить модель переключателем .

- Зафиксировать показания амперметров $A1, \dots, A4$. Данные занести в табл.1.14.

- Отключить модель переключателем .

Таблица
1.14

Рабочие состояния сумматора токов

Положения ключей $i, \text{ A}$	Все ключи замкнуты	$J2$ - разомк.	$J2$ - разомк. $J3$ - разомк.	$J2$ - разомк. $J3$ - разомк. $J4$ - разомк.
$i_2, \text{ A}$				
$i_3, \text{ A}$				
$i_4, \text{ A}$				

$i_{\text{вых}} = i_1, \text{ A}$				
-----------------------------------	--	--	--	--

- Поэтапно отключая резисторы сумматора размыканием ключей J_2 , J_3 и J_4 , фиксировать показания амперметров A_2 , A_3 , A_4 и A_1 . Данные заносить в табл.1.14.

1.3.В.11. По данным виртуальных экспериментов (табл.1.14) проконтролировать корректность узлового уравнения соединений (1.20).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическая цепь с сосредоточенными параметрами?
2. Что описывают уравнения соединений?
3. В чем заключается понятие электрического контура для напряжений и токов?
4. Какими законами определяются уравнения соединений?
5. Каким образом определяются знаки токов при алгебраическом суммировании в уравнениях соединений?
6. Как определяются знаки напряжений при алгебраическом суммировании в уравнениях соединений?
7. Какие электротехнические устройства, принцип действия которых основан на законах Кирхгофа, Вам известны?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую электрическую цепь можно считать резистивной?
2. Какие процессы моделируются резистивными цепями?
3. Что такое линейная резистивная цепь?
4. В чем заключается общий алгоритм составления математической модели цепи с сосредоточенными параметрами?
5. Что такое уравнения цепи?
6. В чем заключается понятие главного контура, главного сечения (узла), ветви?
7. Что представляет собой в общем случае математическая модель линейной резистивной цепи?
8. Какое соединение элементов является последовательным, параллельным, смешанным?
9. Какое соединение элементов (ветвей) является "трехлучевой звездой", "треугольником"?
10. В чем заключается основной принцип преобразования соединений элементов (ветвей)?
11. В чем смысл простейших эквивалентных преобразований соединений элементов (схем) последовательного, параллельного, "звезды", "треугольника"?
12. В чем заключается практическое использование основных свойств линейных цепей?

13. В чем заключается основной смысл метода наложения?
14. В чем заключается основной смысл методов эквивалентного источника напряжения (метода Тевенена), источника тока (метода Нортон)?
15. Что такое активный двухполюсник?
16. Какие общие варианты простейших схем линейных активных двухполюсников отражены в методах Тевенена и Нортон?
17. Каким образом определяются параметры активных двухполюсников в соответствии с методами Тевенена и Нортон?
18. В чем основной практический смысл уравнения баланса мощностей?