

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Саровский физико-технический институт -  
филиал федерального государственного автономного образовательного учре-  
ждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный универ-  
ситет «МИФИ»  
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

## **Учебно-методическое пособие**

по выполнению лабораторных работ на стенде  
**«Теоретические основы электротехники»**  
по теме **«Линейные электрические цепи постоянного тока»**

2019г.

УДК 621.3  
Д69  
ББК 31.21

**Дорохина Т.Е.**

**Д69** Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ на стенде «Теоретические основы электротехники» по теме «Линейные электрические цепи постоянного тока». - Саров: СарФТИ, 2019г.

Пособие представляет собой набор справочных материалов, описание практических навыков и руководство по выполнению лабораторных работ.

© СарФТИ НИЯУ «МИФИ», 2019 г.

© Дорохина Т.Е. 2019 г.



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ

**Факультет информационных технологий и электро-  
ники**

**Кафедра общетехнических дисциплин и электроники**

Дорохина Т.Е.

## **Учебно-методическое пособие**

по выполнению лабораторных работ на стенде  
**«Теоретические основы электротехники»**  
по теме «Линейные электрические цепи постоянного тока»

УТВЕРЖДЕНО:

Заседанием кафедр ОТДЭ

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » 2019 г

Зав. кафедры ОТДЭ

Ю.В. Батьков

Научно-методическим советом СарФТИ

А.П. Скрипник

г.Саров, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Описание экспериментального стенда.....	5
Лабораторная работа № 1 «Линейные электрические цепи постоянного тока».....	6
1.1 Цель работы.....	7
1.2 Краткие теоретические сведения.....	7
1.3 Описание экспериментальной панели.....	13
1.4 Порядок выполнения работы.....	14
Лабораторная работа №2 «Активный двухполюсник постоянного тока» .....	17
2.1 Цель работы.....	18
2.2 Теоретические сведения.....	18
2.3 Порядок выполнения работы.....	21

## Описание экспериментального стенда

Конструктивно лабораторный стенд состоит из корпуса, в который установлена часть электрооборудования, электронные платы, лицевая панель.

В корпусе размещены :

- измерительный комплекс (3 гальванически развязанных АЦП, по 3 измерительных канала и плата осциллографа);
- плата генератора прямоугольного напряжения;
- лабораторный автотрансформатор
- катушки индуктивности
- трансформаторы.

На лицевой панели изображены электрические схемы объектов исследования. Все схемы, изображенные на панели, разбиты на группы в соответствии с тематикой проводимых работ. На панели установлены коммутационные гнезда, резисторы, конденсаторы, коммутационная аппаратура, а также органы управления, позволяющие изменять параметры элементов при проведении лабораторной работы.

К органам управления относятся:

- переключатель лабораторного автотрансформатора, который позволяет изменять напряжение в пределах 0...40В с шагом 1В;
- переключатель блока переменного резистора, позволяющий изменять сопротивление в пределах 0...1кОм с шагом 10 Ом;
- тумблеры магазина конденсаторов, который дает возможность изменять емкость в пределах 0...30мкФ с шагом 0,1мкФ;
- переключатель катушек индуктивности.

Для проведения работы необходимо собрать схему объекта исследования с помощью унифицированных перемычек, позволяющих собирать схемы без потери их наглядности.

Измерения производятся с помощью цифрового измерительного комплекса, встроенного в стенд.

**Лабораторная работа № 1**  
**«Линейные электрические цепи постоянного тока»**

## 1.1 Цель работы.

Изучение закономерностей в линейных цепях постоянного тока и экспериментальное подтверждение законов Кирхгофа, принципа наложения, свойства взаимности.

## 1.2 Краткие теоретические сведения.

На рис. 1.1.а. дана схема неразветвленной электрической цепи:

- $E$  - источник э.д.с.;
- $R_0$  - его внутреннее сопротивление;
- $R_n$  – сопротивление нагрузки.

Ток в такой цепи определяется по закону Ома:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_n};$$

Для участка цепи, содержащего э.д.с. (участок *acb* на рис. 1.1.б.) закон Ома в обобщенном виде:

$$I = \frac{U_{ab} \pm E}{R_{ab}};$$

где  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ .

Знак "+" ставится если направление э.д.с. совпадает с принятым положительным направлением тока. Если участок цепи или ее ветвь содержит кроме источника э.д.с. еще и идеальный источник тока, то общий ток рассматриваемого участка:

$$I = \frac{U_{ab} \pm E}{R_{ab}} \pm J;$$

где  $J$  - ток источника тока.

*Законы Кирхгофа:  $\sum I = 0$ ,  $\sum E = \sum RI$ ;*

Распределение потенциала вдоль неразветвленной электрической цепи или вдоль замкнутого контура разветвленной цепи можно представить графически в виде потенциальной диаграммы. По оси абсцисс откладываются сопротивления участков в той последовательности, в которой они включены в цепь, а по оси ординат -

потенциалы соответствующих точек.

Для построения потенциальной диаграммы необходимо задаться направлением обхода контура и принять потенциал какой-то любой точки контура равным нулю. Для схемы на рис. 1.1.б. направление обхода выбираем совпадающим с направлением тока и потенциал точки  $f$   $\varphi_f = 0$ . Тогда:

$$\varphi_k = \varphi_f + E_1, \varphi_a = E_1 - R_1 I, \varphi_c = \varphi_a - R_2 I, \varphi_b = \varphi_c + E_2, \varphi_d = \varphi_b - R_3 I, \\ \varphi_e = \varphi_d - E_3, \varphi_f = \varphi_e - R_4 I = 0;$$

Зависимость  $\varphi(R)$  представляет собой ломаную линию; тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс пропорционален токам на соответствующих участках цепи:

$$\operatorname{tg} \beta = I \frac{m_R}{m_\varphi},$$

где  $m_R$  - масштаб сопротивлений,  $m_\varphi$  - масштаб потенциала.

*Схемы неразветвленной и разветвленной электрических цепей постоянного тока.*

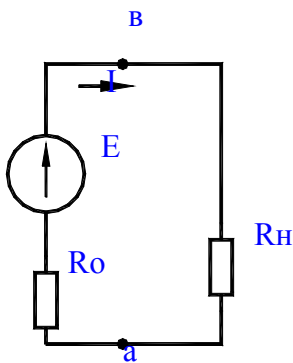


Рис1.1

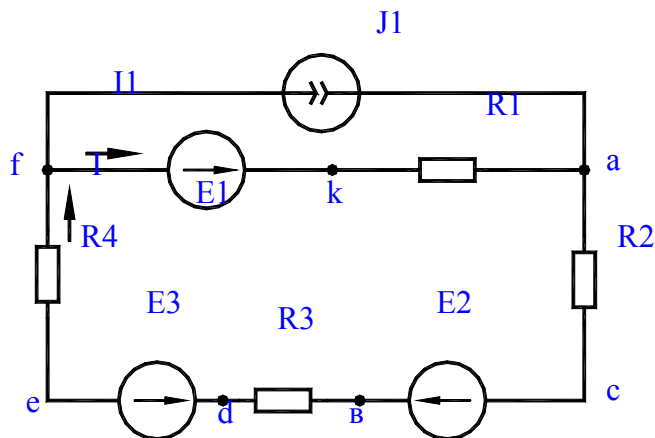


Рис. 1.1.б.



Потенциальная диаграмма.

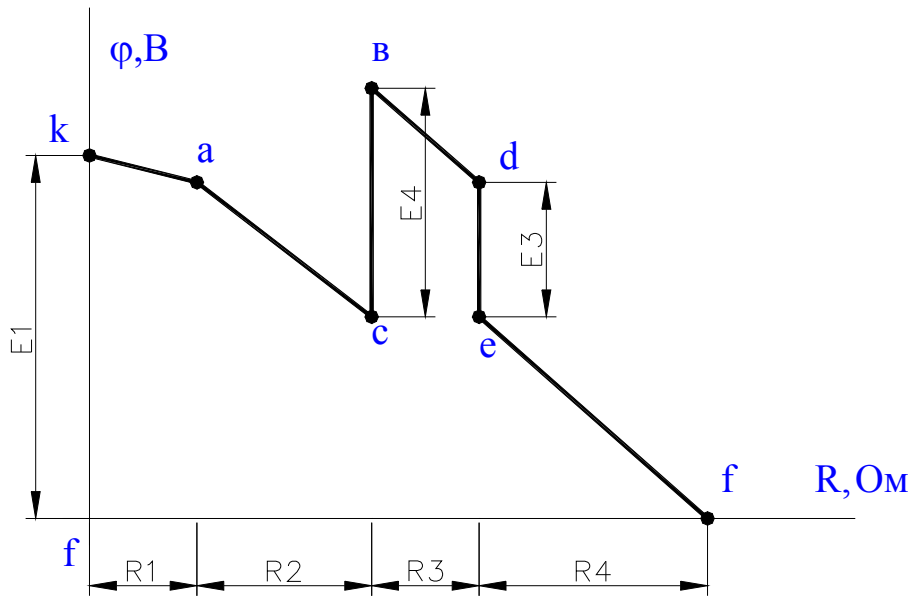


Рис. 1.2.

Схемы для исследования принципа взаимности.

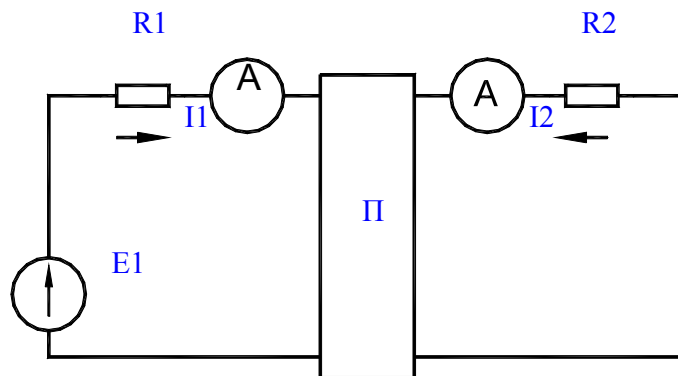


Рис. 1.3.а.

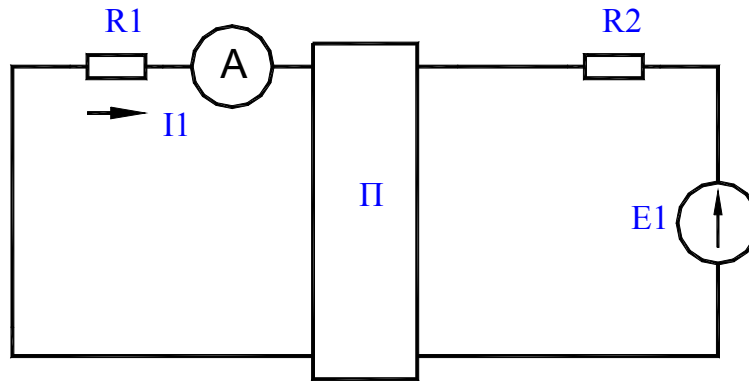


Рис. 1.3.б.

Наклон прямых на графике рис. 1.2 одинаков на всех участках, за исключением участка *ка*, т.к. ток  $I_1$ , отличается от тока  $I$  на величину  $J_1$ . Пользуясь приведенным графиком, можно определить напряжение между двумя любыми точками цепи.

Правильность расчета электрической цепи можно проверить, составляя баланс мощности цепи, согласно которому суммарная мощность, генерируемая источником электрической энергии, равна суммарной мощности потребляемой в цепи.

$$\sum_{S=1}^K E_S I_S + \sum_{m=1}^n U_m J_m = \sum_{i=1}^i R_i I_i^2$$

Условие баланса мощности является следствием закона сохранения энергии и относится к общим свойствам цепей. К свойствам линейных электрических цепей относятся также принцип независимости действия э.д.с. и принцип взаимности.

Принцип независимости действия э.д.с. формулируется следующим образом: в линейной электрической цепи действие, оказываемое каждой из э.д.с. в отдельности, можно рассматривать независимо от действия других э.д.с. цепи. На этом свойстве базируется принцип наложения: ток в любой  $k$ -той ветви электрической цепи можно рассматривать как алгебраическую сумму токов в этой же ветви от действия каждой из э.д.с. цепи в отдельности.

Согласно принципу наложения выражение для токов можно представить как:

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_n g_{kn} \quad (1.1)$$

Коэффициенты уравнения (1.1) постоянны, не зависят от токов и напряжений и имеют размерность проводимости. Коэффициенты с одинаковыми индексами ( $g_{kk}$ )

называются собственными или входными проводимостями. Они численно равны току ветви при действии единичной э.д.с. в 1 Вольт, включенной в эту ветвь. Для цепи рис. 1.3.а.

$$g_{11} = \frac{I_1}{E_1}.$$

Величина, обратная входной проводимости, называется входным сопротивлением ветви:

$$R_{вх11} = \frac{1}{g_{11}}.$$

Коэффициенты с разными индексами ( $g_{k1}, g_{kn}$ ) называются передаточными или взаимными проводимостями. Так,  $g_{kn}$  есть взаимная проводимость  $k$ -той и  $n$ -ой ветвей, она численно равна току в  $k$ -той ветви, возникающему от действия единичной э.д.с.  $E = 1$  В в  $n$ -ой ветви. Для цепи рис. 1.3.а.

$$g_{21} = \frac{I_2}{E_1}.$$

Взаимное сопротивление двух ветвей обратно взаимной проводимости. Взаимные проводимости связаны между собой следующим образом:

$$g_{kn} = g_{nk} = \frac{1}{R_{nk}}.$$

Входные и взаимные проводимости могут быть определены опытным или расчетным путями. При экспериментальном их определении измеряются токи в ветвях цепи от действия каждой из э.д.с. в отдельности, а затем определяются собственные и взаимные проводимости.

Принцип наложения используется в методе расчета, получившем название *метод наложения*.

Порядок расчета методом наложения (суперпозиции):

- исходная схема разбивается на расчетные схемы, в каждой из которых действует одна э.д.с. или один источник тока. Все остальные источники э.д.с. или тока считаются отсутствующими, но в схеме сохраняются их внутренние сопротивления.
- определяются токи в ветвях каждой из вспомогательных расчетных схем.
- для определения токов исходной схемы производится алгебраическое суммирование токов расчетных схем для каждой ветви.

Принципом суперпозиции нельзя пользоваться при вычислении мощностей, т.к. мощность - квадратичная функция тока или напряжения.

Принцип взаимности заключается в следующем: если некоторая э.д.с., находящаяся в какой либо ветви сколь угодно сложной линейной электрической цепи, вызывает ток в другой ветви данной электрической цепи, то при отсутствии других э.д.с., та же э.д.с., будучи перенесенной во вторую ветвь, вызовет в первой ветви ток той же величины и фазы.

Например для схемы рис. 3.а. ток  $I_2 = g_2^* E_1$ , а при перенесении э.д.с. из первой ветви во вторую (рис. 3.в.) ток  $I'_1 = g_{21} E_1$ , но так как  $g_{21} = g_{12}$ , то  $I_2 = I'_1$ .

### 1.3 Описание экспериментальной панели.

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Источники питания применяются в качестве источников постоянного напряжения. Э.д.с.  $E_1$ , представляет собой выпрямительный мост, запитанный от сети 36-40 В переменного тока, а  $E_2$  - мост, запитанный через ЛАТР. Следовательно  $E_2$  может изменяться плавно в пределах 0 - 100В.

*При выполнении работы необходимо устанавливать  $E_1 = E_2$ . В иных комбинациях расчеты не будут соответствовать теории из-за отсутствия проводимости выпрямительных мостов в обратном направлении.*

При помощи тумблеров  $S_3$  и  $S_2$  (рис. 4.) источники  $E_1$  и  $E_2$  могут включаться в цепь (тумблеры в положении 1), или исключается из нее (тумблеры в положении 2).

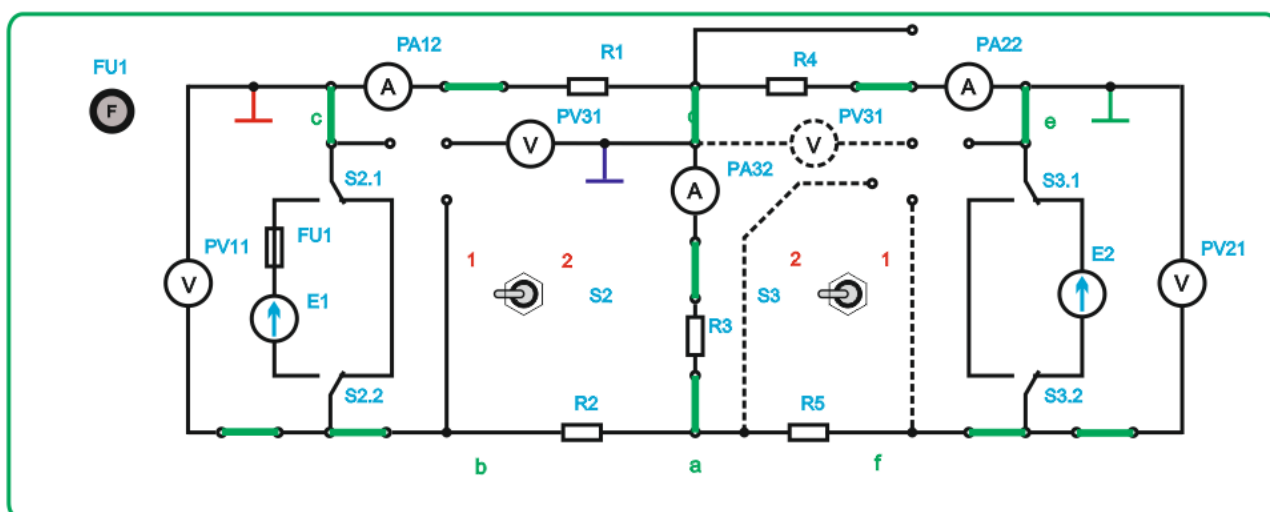


Рис.1.4.

#### ***1.4 Порядок выполнения работы.***

1.4.1. Измерить величину э.д.с. первого источника, установить значение  $E_2$  равным  $E_1$ . Измерения по п. 1.4.1. и 1.4.3. производить тестером.

1.4.2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.4.

1.4.3. Измерить токи в ветвях цепи ( $I_1$  измеряется прибором А1 при положении переключки П в поз. «2»,  $I_3$  – П в поз. «1»), потенциалы точек **b, c, d, e, f** цепи относительно точки **a** и напряжения на каждом из участков цепи с учетом знаков, принимая во внимание, что разность потенциалов  $U_{xy}$  считается положительной, если  $(\varphi_x - \varphi_y) > 0$ . Используя результаты измерений по закону Ома рассчитать сопротивления участков и внутренние сопротивления источников напряжения. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.1.

1.4.4. По данным измерений предыдущего пункта определить сумму падений напряжений на участках контура, содержащего  $E_1$  и  $E_2$  и сравнить ее с алгебраической суммой э.д.с. Для этого же контура, пользуясь табл. 1.1. построить потенциальную диаграмму.

1.4.5. Определить на основании потенциальной диаграммы напряжение  $U_{ac}$ , а также токи  $I_1$ , и  $I_2$ , по формуле

$$tg\beta = \frac{m_R}{m_\varphi},$$

и сравнить их с измеренными.

### Потенциальная диаграмма

Таблица 1.1.

Измерено														
$E_1$	$E_2$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_e$	$\varphi_f$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{cd}$	$U_{de}$	$U_{ed}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	А	А	А
Рассчитано														
$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{cd}$	$R_{de}$	$R_{ef}$	$R_{fa}$	$\Sigma E$	$\Sigma RI$	$R_{ab}$						
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	Ом						

### Метод наложения

Таблица 1.2.

Измерено								Рассчитано		
$E_1$	$I'_1$	$I''_1$	$I'''_1$	$E_2$	$I''_1$	$I'''_1$	$I'''_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
В	А	А	А	В	А	А	А	А	А	А

Таблица 1.3.

$g_{11}$	$g_{22}$	$g_{21}$	$g_{31}$	$g_{32}$	$g_{12}$	$I_1$
Сим	Сим	Сим	Сим	Сим	Сим	А

1.4.6. Поочередно переключая  $S_3$  либо  $S_2$ , в положение 2, т.е. исключая из цепи (см. рис. 1.4.) э.д.с.  $E_1$  или  $E_2$ , измерить значения токов в ветвях. Результаты занести в табл. 1.2. с учетом знаков, принимая за условно положительное направление, направление токов в опыте 4.3. Суммировать частичные токи от  $E_1$  и  $E_2$  и убедиться в достоверности метода наложения сравнением с результатами измерений при действии двух источников (см. табл. 1.1).

1.4.7. На основании экспериментальных данных п. 1.4.6. вычислить собственные  $g_{11}$ ,  $g_{22}$  и взаимные  $g_{21}$ ,  $g_{31}$ ,  $g_{12}$ , проводимости. Используя значения проводимостей, рассчитать по формуле:

$$g_{11} = \frac{I_1}{E_1}.$$

ток  $I_1$  и сравнить его с измеренным (см. табл. 1.2). Определить собственную  $g_{11}$  и взаимную  $g_{21}$  проводимости расчетным путем и сравнить их с полученными экспериментальными величинами.

1.4.8. Убедиться в достоверности принципа взаимности, сравнивая значение тока  $I'_2$  при действии э.д.с.  $E_1$ , и значении тока  $I''_1$  при действии э.д.с.  $E_2$ , учитывая, что  $E_1$ , принято равным  $E_2$ .

1.4.9. Составить баланс мощности для цепи используя результаты табл. 1.1.



**Лабораторная работа №2**  
**«Активный двухполюсник постоянного тока»**

## 2.1 Цель работы.

Исследование режимов работы электрической цепи, представленной активным двухполюсником, определение параметров схемы замещения активного двухполюсника эквивалентным генератором.

## 2.2 Теоретические сведения.

Часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами (полюсами) называется двухполюсником. На электрической схеме эту часть цепи изображают в виде прямоугольника. Различают активные двухполюсники, содержащие источники электрической энергии, и пассивные, не содержащие источников.

Основными обобщенными параметрами активного двухполюсника являются входное сопротивление  $R_{вх}$  и напряжение холостого хода  $U_{хх}$ .

Входное сопротивление двухполюсника  $R_{вх}$  определяется относительно выделенных зажимов цепи при условии, что все источники тока отключены, а источники э.д.с. закорочены, но их внутренние сопротивления в схеме цепи сохраняются. Напряжение холостого хода  $U_{хх}$  определяется как напряжение, действующее на разомкнутых выделенных зажимах цепи.

Аналитически для определения  $R_{вх}$  и  $U_{хх}$  используются любые методы анализа электрической цепи.

Указанные параметры можно определить и опытным путем с помощью вольтметра и амперметра. При этом входное сопротивление определяется так:

$$R_{вх} = \frac{U_{хх}}{I_k} \quad (1).$$

При известных обобщенных параметрах активного двухполюсника ток в выделенной ветви, например, ветви "ав" (рис. 1.а.) определяется по формуле:

$$I_{ав} = \frac{U_{хх}}{R_{вх} + R_{ав}} \quad (2).$$

Если в ветви имеется источник э.д.с., то ток в ветви:

$$I_{ав} = \frac{U_{хх} \pm E_{ав}}{R_{вх} + R_{ав}}$$

$$I_{ab} = \frac{U_{xx}}{R_{bx} + R_{ab}} \quad (3).$$

Двухполюсник можно представить в виде эквивалентного источника с  $E_r = U_{xx}$  и внутренним сопротивлением  $R_r = R_{xx}$  (рис. 1.б.). Ток в исследуемой ветви:

$$I_{ab} = I_{нагр} = \frac{E_r}{R_r + R_H} \quad (4).$$

Здесь  $R_H = R_{ab}$  - нагрузка эквивалентного генератора.

Активный двухполюсник можно представить схемой эквивалентного источника тока:

$$J_k = I_k = \frac{U_{xx}}{R_{bx}}$$

и равен току между замкнутыми накоротко зажимами выделенной ветви. Внутренняя проводимость равна:

$$G_{bx} = \frac{1}{R_{bx}}$$

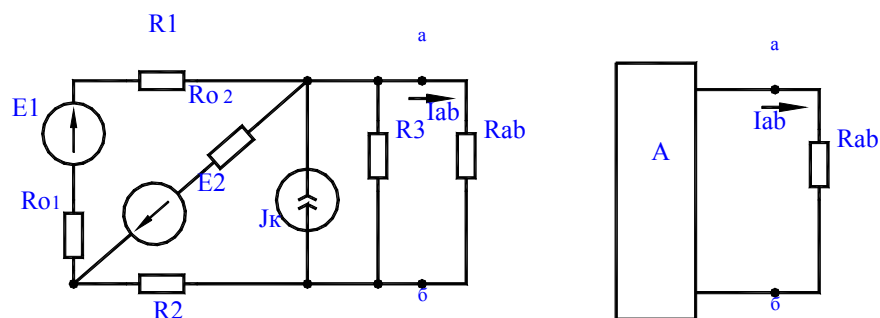


Рис. 2.1. а

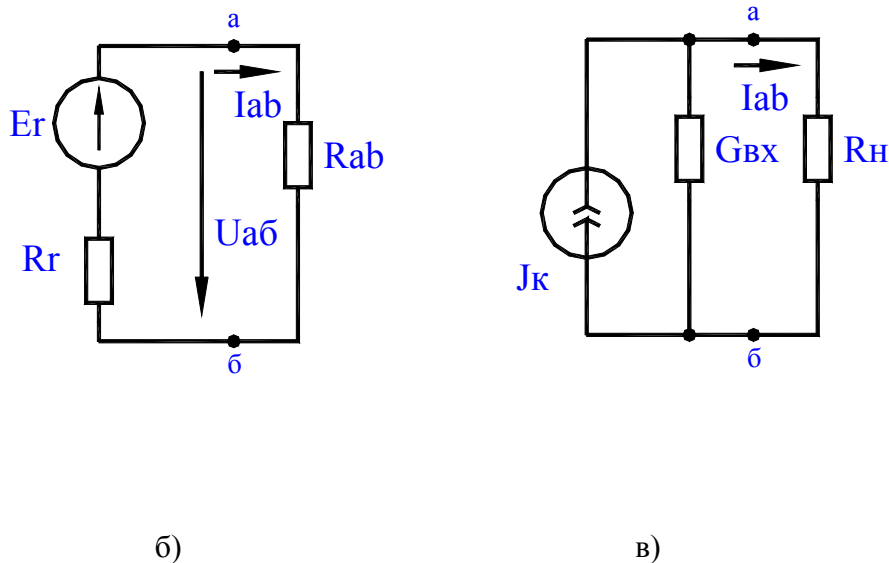


Рис. 2.1.

Напряжение исследуемой ветви:

$$U_{ab} = \frac{Jk}{G_{BX} + G_{ab}} \quad (5).$$

Здесь  $G_{ab} = \frac{1}{R_H}$ , а ток нагрузки

$$I_H = \frac{Jk}{1 + G_{BX} R_H} \quad (6).$$

Схему с эквивалентным генератором (рис. 2.1.б.) называют схемой Тевенена-Гельмгольца, а схему с эквивалентным источником тока (рис. 2.1.в.) - схемой Нортона. Формулы (4) и (5) представляют теорему об эквивалентном источнике или об активном двухполюснике.

При анализе процессов, происходящих в цепи активного двухполюсника и условий передачи энергии от него к нагрузке, рассматривают режимы работы:

- холостой ход (х. х.), при котором потребитель отключен; ток через выделенные зажимы равен нулю, напряжение на разомкнутых зажимах наибольшее.
- короткое замыкание (к.з.), при котором выделенные зажимы замкнуты коротко; напряжение на них равно нулю, а ток имеет величину,

$$Ik = \frac{U_{xx}}{R_{vx}}$$

- согласованный режим, при котором сопротивление нагрузки равно входному сопротивлению активного двухполюсника. Нагрузке передается наибольшая полезная мощность при КПД передачи энергии, равном 0,5.

- оптимальный режим, в котором обеспечиваются наилучшие условия передачи энергии от активного двухполюсника нагрузке. КПД здесь может достигать значений 0,95 - 0,97.

### **2.3 Порядок выполнения работы.**

2.3.1. Экспериментально исследовать применение метода активного двухполюсника для анализа состояния электрической цепи на примере схемы рис. 2.3.а. Исследуемую ветвь принимать например ветвь с э.д.с.  $E_2$  (или по указанию преподавателя). **Величину  $E_2$  установить только равной  $E_1$ .**

2.3.2. Измерить токи и э.д.с. в цепи схемы рис. 2.3.а. Для измерения э.д.с. предварительно разомкнуть цепь в точках "е" и "д".

2.3.3. Из опытов холостого хода и короткого замыкания определить:  $U_{xx}$ ,  $Ik$ ,  $R_{vx}$ .

2.3.4. Используя результаты эксперимента определить ток нагрузки  $I_n$  (ток в исследуемой ветви). Результаты занести в табл. 2.1.

2.3.5. Используя полученные в лабораторной работе 1 значения сопротивлений схемы, рассчитайте аналитически:  $R_{vx}$ ,  $U_{xx}$ ,  $Ik$ ,  $I_n$  активного двухполюсника. Результаты занести в табл. 2.2. Сравните результаты эксперимента (табл. 2.1.) и аналитического расчета (табл. 2.2.).

2.3.6. Исследовать условия передачи энергии от активного двухполюсника нагрузке по схеме рис. 2.3.б. **Напряжение на входе схемы установить не более 20В. Избегать работы схемы при токах нагрузки более 0,3А на протяжении более 10 мин.** Регулировку тока осуществлять в пределах 0 – 100 Ом с шагом 10 Ом (левый галетник блока R17). Для чего, изменяя сопротивление нагрузки  $R_{17}$  от бесконечности – R17 - отключено (х.х.) до нуля (к.з.), измерить ток  $I$ , напряжение  $U_1$ , на входе линии и напряжение  $U_2$  на зажимах нагрузки (5-6 измерений). Результаты занести в табл. 2.3.

2.3.7. Поданным измерений построить зависимости  $U_1$ ,  $P_1$ ,  $\Delta P$ ,  $U_2$ ,  $P_2$ ,  $\eta$  в функции тока линии. Соответствующие величины рассчитать и занести в табл.3.

2.3.8. Определить параметры активного двухполюсника и занести в табл. 2.3.

2.3.9. Исследуя графики, проанализировать режимы работы активного двухполюсника.

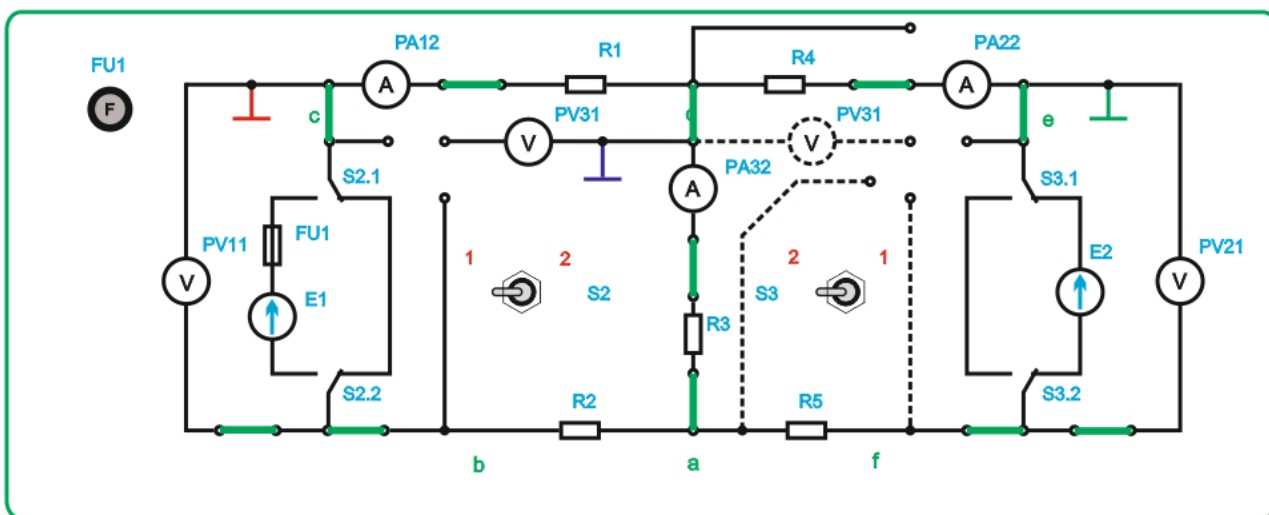


Рис. 2.3.а

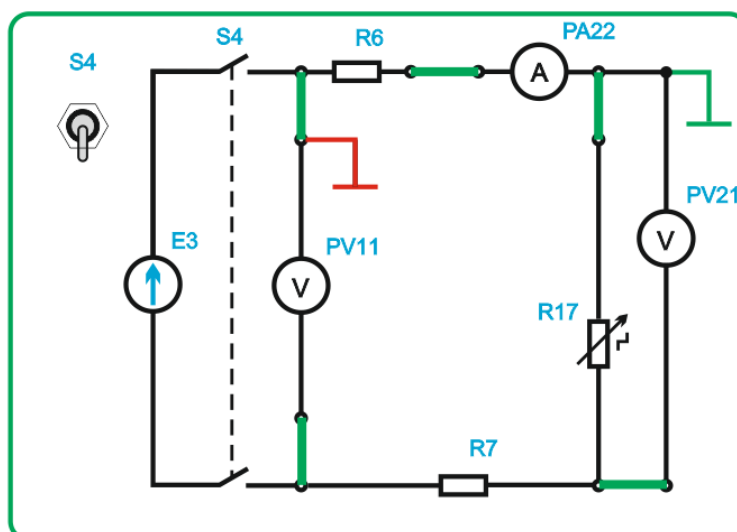


Рис. 2.3. б

Таблица 2.1.

Измерено							Вычислено	
$I_1$	$I_2$	$I_3$	$E_1$	$E_2$	$U_{xx}$	$I_k$	$R_{вх}$	$I_H$
А	А	А	В	В	В	А	Ом	А

Таблица 2.2.

Данные из лабораторной работы №1							Рассчитать аналитически			
$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_{вн1}$	$R_{вн2}$	$U_{xx}$	$R_{ex}$	$I_k$	$I_H$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	Ом	А	А

Таблица 2.3.

Измерено			Рассчитано						
$I$	$U_1$	$U_2$	$P_1$	$P_2$	$\Delta P$	$\eta$	$R_{2-2}$	$R_{ex}$	$U_{xx}$
А	В	В	Вт	Вт	Вт	%	Ом	Ом	Ом

После выполнения лабораторных работ студенты оформляют отчет по лабораторным работам ( в отчет входят, описание эксперимента, заполнение соответствующих таблиц, построение графиков, при необходимости. Завершающим этапом является защита лабораторной работы преподавателю.