

Министерство науки и высшего образования РФ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 3 по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

«Метод эквивалентного генератора.
Линейные соотношения между токами и напряжениями»

Студент:	
Группа:	
Бригада:	
Подпись студента:	
Дата выполнения:	
Дата защиты:	
Оценка:	
Преподаватель:	
Подпись преподавателя:	

Москва 2025

Лабораторная работа № 3
«Метод эквивалентного генератора.

Линейные соотношения между токами и напряжениями»

В работе теоретически и экспериментально находятся параметры эквивалентного генератора. Исследуются зависимости тока, напряжения и мощности приемника при изменении его сопротивления, а также линейные соотношения между токами ветвей в разветвленной электрической цепи.

Ключевые слова: линейная электрическая цепь; активный двухполюсник; схемы замещения двухполюсников; метод эквивалентного генератора; параметры эквивалентного генератора; формула (схема) Тевенена; формула (схема) Нортона; активная мощность двухполюсника.

1. Теоретическая справка

При анализе сложных электрических цепей часто требуется определить ток и напряжение только в одной ветви. В этом случае используют **метод эквивалентного генератора**. Выделяют исследуемую ветвь (активную или пассивную), присоединенную к сложной цепи. Остальная часть цепи с двумя выделенными узлами представляет собой *активный двухполюсник*. По отношению к выделенной ветви активный двухполюсник можно преобразовать в *эквивалентный генератор*.

Теорема Тевенена-Гельмгольца: если активный двухполюсник, к которому присоединена выделенная ветвь, заменить источником ЭДС, равной напряжению на зажимах разомкнутой ветви и сопротивлением, равным входному сопротивлению, то ток в этой ветви не изменится.

Математическая формулировка теоремы для нахождения тока пассивной ветви ab выражается *формулой Тевенена*:

$$I_{ab} = \frac{U_{XXab}}{R_{BXab} + R_{ab}}$$

Этому равенству соответствует расчетная схема (последовательная схема замещения активного двухполюсника), представленная на рис. 1:

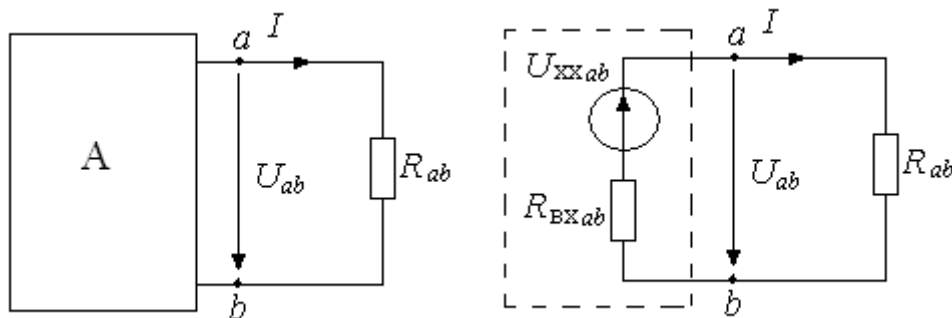


Рис. 1

Если выделенная ветвь содержит источник ЭДС, тогда расчетная схема будет иметь вид, представленной на рис. 2:

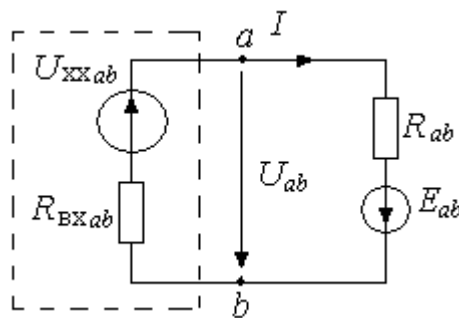
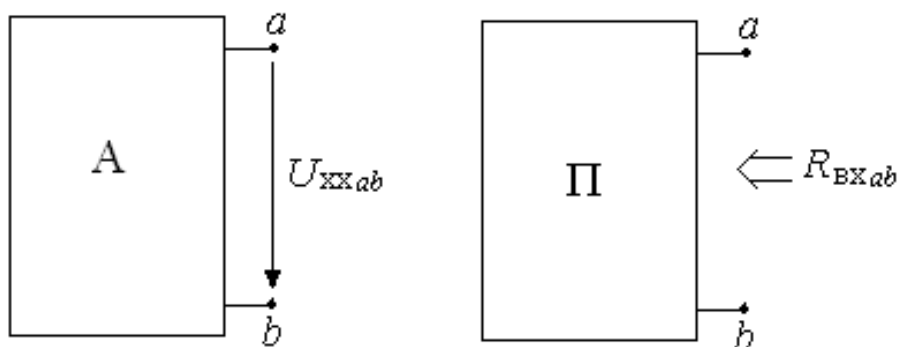


Рис. 2

Применение теоремы об эквивалентном генераторе позволяет свести расчет сложной цепи к расчету одноконтурной и использовать для определения тока формулу Тевенена: $I_{ab} = \frac{U_{xxab} \pm E_{ab}}{R_{вхab} + R_{ab}}$.

Алгоритм расчета по методу эквивалентного генератора

1. Находят напряжение холостого хода U_{xxab} на зажимах разомкнутой ветви ab .
2. Определяют входное сопротивление двухполюсника, преобразуя его в пассивный (все внутренние источники ЭДС и тока принимают равными нулю).



3. Определяют искомый ток по формуле Тевенена.

Можно использовать *формулу Нортон*, соответствующую параллельной схеме замещения активного двухполюсника (рис. 3):

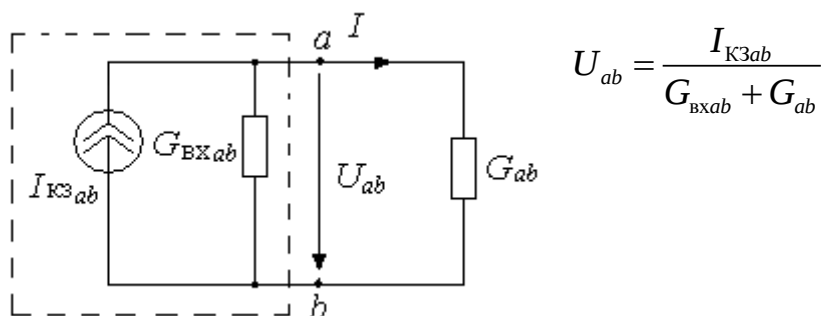


Рис. 3

В данной работе сопротивление выделенной ветви может изменяться и определяется как нагрузка (R_H) по отношению к активному двухполюснику (эквивалентному генератору). При экспериментальном определении

параметров эквивалентного генератора в данной работе используется режим холостого хода, в котором практически идеальным вольтметром ($R_v \cong \infty$) измеряется напряжение холостого хода U_{xx} . Далее осуществляется режим короткого замыкания, в котором измеряется ток $I_{кз}$. По результатам измерения строят нагрузочную характеристику активного двухполюсника (эквивалентного генератора). Входное сопротивление может быть найдено из соотношения $R_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}$. По результатам измерений проводится проверка выполнения теоремы Тевенена.

Передача энергии от активного двухполюсника к пассивному

Определим условия, при которых мощность пассивного двухполюсника (приемника) максимальна. По теореме об эквивалентном генераторе ток и напряжение в приемнике с сопротивлением R_n можно определить по расчетной схеме эквивалентного генератора (рис. 1).

Напряжение $U_{ab} = U_{xx} - R_{вх} \cdot I_n$, мощность приемника $P_n = I_n^2 \cdot R_n$ или $P_n = U_{ab} \cdot I_n = (U_{xx} - R_{вх} \cdot I_n) \cdot I_n = U_{xx} \cdot I_n - R_{вх} \cdot I_n^2$, мощность эквивалентного генератора $P_\Gamma = U_{xx} \cdot I_n$. Если мощность приемника максимальна, то $\frac{dP_n}{dI_n} = U_{xx} - 2R_{вх} \cdot I_n = 0$, следовательно, ток приемника должен быть $I_n = \frac{U_{xx}}{2R_{вх}}$.

По формуле Тевенена $I_n = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_n}$, максимальная мощность выделяется в приемнике при $R_n = R_{вх}$. Максимальная мощность равна $P_{n\max} = \left(\frac{U_{xx}}{2R_{вх}} \right)^2 \cdot R_{вх} = \frac{U_{xx}^2}{4R_{вх}}$. Отношение мощности P_n к мощности P_Γ

называется *КПД эквивалентного активного двухполюсника*:

$$\eta = \frac{P_n}{P_\Gamma} = \frac{(U_{xx} - R_{вх} \cdot I_n) \cdot I_n}{U_{xx} \cdot I_n} = \frac{R_n}{R_{вх} + R_n}.$$

При $R = R_{вх}$ КПД $\eta = 0,5$. Графики зависимости $P_n(I_n)$, $P_\Gamma(I_n)$, $U_n(I_n)$, $\eta(I_n)$ представлены на рис. 4.

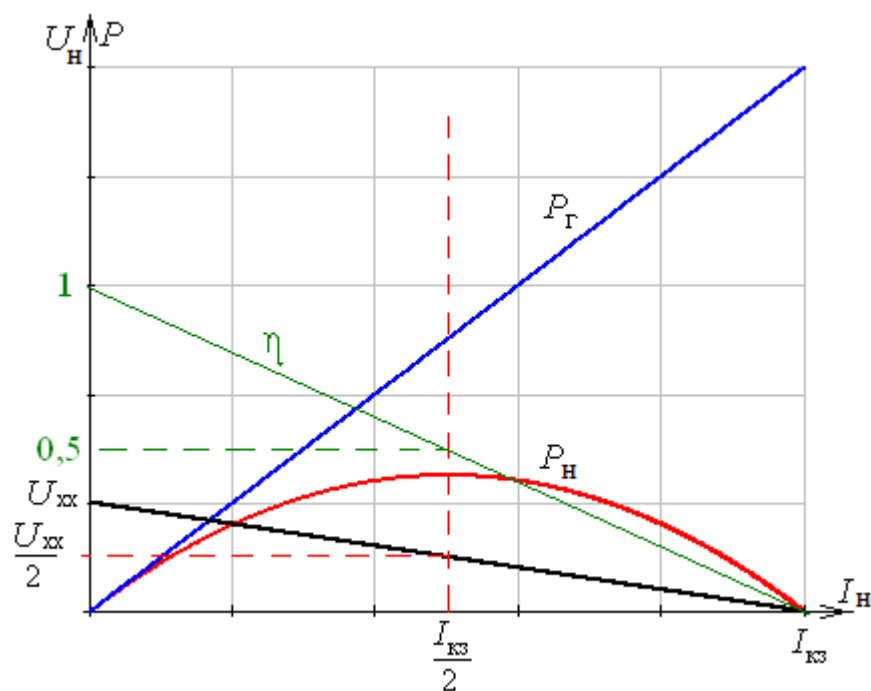


Рис. 4

Согласно *принципу линейности* при изменении сопротивления резистивного элемента в одной из ветвей линейной электрической цепи все токи и напряжения связаны **линейными соотношениями**. При изменении сопротивления R_H токи i -ой и k -ой ветвей связаны линейным соотношением:

$$I_i = aI_k + b$$

Коэффициенты линейности a и b определяются из двух любых режимов при разных значениях сопротивления резистора и неизменности остальных параметров цепи.

2. Подготовка к работе

1. Рассчитать любым методом токи в цепи, схема которой представлена на рис. 5, при $E_1=9$ В и $J_2=50$ мА. Значения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 даны в таблице 1, $R_3=47$ Ом, $R_H=R_1$. Определить напряжение U_H , мощность P_H .

2. Рассматривая цепь относительно резистора R_H как активный двухполюсник (эквивалентный генератор), рассчитать его параметры $U_{ХХ}$, $R_{ВХ}$, $I_{КЗ}$. Нарисовать последовательную и параллельную схемы замещения активного двухполюсника. Вычислить значение тока I_H при $R_H=R_1$ по двум схемам замещения. Построить вольтамперную характеристику активного двухполюсника $U_H(I_H)$. Графически определить значение тока I_H и напряжения U_H при $R_H=R_1$ и $R_H=R_{ВХ}$.

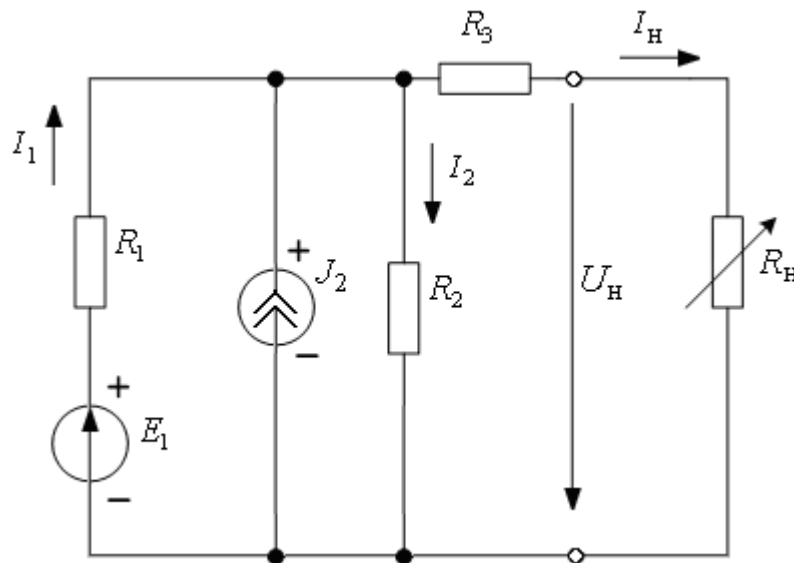


Рис. 5

3. Определить величину сопротивления R_H , при котором в нем потребляется максимальная мощность. Вычислить $P_{H\max}$. Построить график зависимости $I_H(R_H)$, $P_H(I_H)$ и $P_H(R_H)$.

4. Записать линейное соотношение $I_1(I_H)=aI_H+b$. Определить коэффициенты a и b по двум известным значениям токов ($R_H=\infty$ и $R_H=R_1$).

Построить график зависимости $I_1(I_H)$.

Таблица 1

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_1 , Ом	150	220	330	150	150	220	100	100	330	330	220	150
R_2 , Ом	100	150	150	220	330	100	220	330	220	100	220	150

3. Содержание и порядок выполнения работы

Для исследования электрической цепи по схеме рис. 1П протокола измерений используют: источники постоянного напряжения из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**: источника напряжения $E_1=9$ В (**UZ1**), источника тока $J_2=50$ мА (**UZ2**); измерительные приборы из блоков **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** постоянного тока. Пассивные элементы R_1 , R_2 и R_3 электрической схемы выбирают из блока **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**, для резистора R_n используется **МАГАЗИН СОПРОТИВЛЕНИЙ**.

- Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1П. Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**. Включить тумблер **SA1** источников **UZ1** и **UZ2**.
- Установить значение сопротивления резистора $R_n=R_1$. Если стрелки амперметров **РА1**, **РА2** и **РА3** блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** отклоняются вправо, то значение тока считается положительным и равным показанию прибора. Если стрелка прибора отклоняется влево, следует поменять полярность подключения прибора, а значение тока считать отрицательным. Аналогично проводится измерение напряжений на элементах вольтметром **PV**.
- Значения измеренных токов и напряжения занести в табл. 1П протокола измерений.

Определение параметров эквивалентного генератора

- В режиме короткого замыкания ($R_n=0$) измерить ток $I_{кз}$ и токи ветвей.
- В режиме холостого хода (ветвь с R_n разомкнута) измерить напряжение U_{xx} , токи холостого хода. Данные измерений занести в табл. 1П.

Сравнение экспериментальных и теоретических данных

- Заполнить табл. 2П.

Определение экспериментальных зависимостей

- Измерить токи I_n , I_1 , напряжение U_n для указанных в табл. 3П значений сопротивления R_n . Данные измерений занести в табл. 3П протокола.
- Рассчитать по измерениям мощность P_n .
- Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.
- Построить экспериментальные зависимости $I_n(R_n)$, $U_n(I_n)$, $P_n(I_n)$, $I_1(I_3)$.

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3

Схема исследуемой электрической цепи представлена на рис. 1П. Укажите на исследуемой схеме положительные направления токов в ветвях и полярность подключения приборов. В последующих опытах выбранные направления принять как положительные, экспериментальное значение тока в ветвях принимать в соответствии с отклонением стрелки прибора.

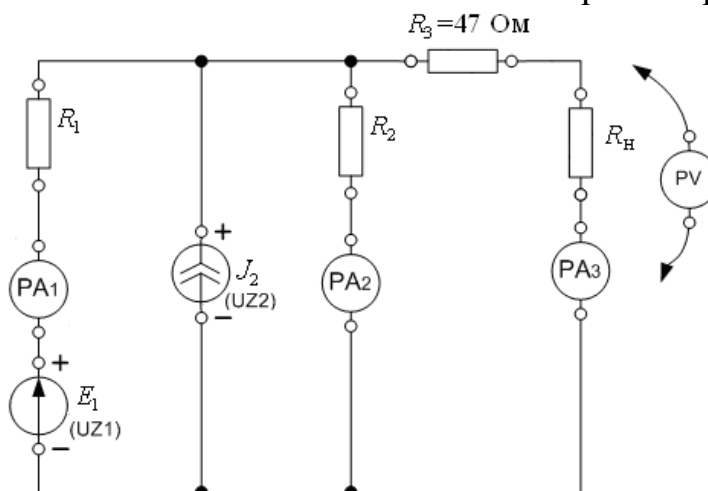


Рис. 1П

Таблица 1П

$E_1 = \text{---} \text{ В}, J_2 = \text{---} \text{ мА}, R_1 = \text{---} \text{ Ом}, R_2 = \text{---} \text{ Ом}, R_3 = 47 \text{ Ом}.$					
$R_H = \text{---} \text{ Ом}$		$R_H = 0 \text{ Ом}$		$R_H = \infty \text{ Ом}$	
$I_1, \text{ мА}$		$I_1', \text{ мА}$		$I_1'', \text{ мА}$	
$I_2, \text{ мА}$		$I_2', \text{ мА}$		$I_2'', \text{ мА}$	
$I_H, \text{ мА}$		$I_H = I_{K3}, \text{ мА}$		$I_H = 0$	
$U_H, \text{ В}$		$U_H = 0 \text{ В}$		$U_H = U_{XX}, \text{ В}$	

Таблица 2П

$I_H, \text{ мА}$		$U_H, \text{ В}$		$U_{XX}, \text{ В}$		$I_{K3}, \text{ мА}$		$R_{BX}, \text{ Ом}$	
эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.

Таблица 3П

$R_H, \text{ Ом}$	0	$0,5R_{BX}$	$0,75R_{BX}$	$0,9R_{BX}$	R_{BX}	$1,1R_{BX}$	$1,25R_{BX}$	$5R_{BX}$	$10R_{BX}$
$I_H, \text{ мА}$									
$U_H, \text{ В}$									
$I_1, \text{ мА}$									
$P_H, \text{ Вт}$									

4. Содержание и оформление отчета

1. Провести проверку результатов теоретического расчета параметров эквивалентного генератора и экспериментальных данных.
2. Сравнить теоретические зависимости $U_n(I_n)$, $I_n(R_n)$, $P_n(I_n)$ и $P_n(R_n)$ с экспериментальными. Теоретическую и экспериментальную зависимости $U_n(I_n)$ представить на одном графике, для других зависимостей – аналогично.
3. Сравнить теоретическую зависимость $I_1(I_n)$ с экспериментальной. Результаты построения представить на одном графике.
4. Сделать письменный вывод о проделанной работе.

5. Контрольные вопросы и задания

Все ответы на контрольные вопросы должны сопровождаться необходимыми схемами, формулами, численными результатами расчётов, графическими иллюстрациями (графиками, диаграммами и т.д.) и содержать однозначный ответ на поставленные вопросы.

1. Докажите эквивалентность формул Тевенена и Нортона для расчета тока ветви методом эквивалентного генератора.
2. Как экспериментально определить параметры эквивалентного генератора, если нельзя осуществить режимы холостого хода и короткого замыкания?
3. Объясните различие теоретических и экспериментальных значений параметров эквивалентного генератора.
4. Как изменится напряжение U_{xx} для схемы 1П, если:
 - а) значение E_1 (или J_2) увеличить в два раза;
 - б) значение E_1 (или J_2) уменьшить в два раза;
5. Как изменится значение P_{max} , если:
 - а) значение E_1 (или J_2) увеличить в два раза;
 - б) значение E_1 (или J_2) уменьшить в два раза;
6. Отметить на графике зависимости $I_1(I_3)$ точки, соответствующие режимам короткого замыкания, холостого хода и максимальной мощности.
7. Построить график зависимости $I_2(I_3)$; отметить на графике зависимости $I_2(I_n)$ точки, соответствующие режимам короткого замыкания, холостого хода и максимальной мощности.
8. Построить экспериментальные зависимости мощности эквивалентного источника $P_r(I_n)$ и КПД $\eta(I_n)$.
9. Определить ток I_1 и ток I_2 методом эквивалентного генератора.