

# Министерство науки и высшего образования РФ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

## Лабораторная работа № 15 по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

«Исследование нелинейной цепи постоянного тока»

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

Москва 2024

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Цепи, содержащие хотя бы один нелинейный элемент, называются нелинейными. Нелинейные цепи описываются нелинейными уравнениями и обладают рядом новых свойств, которые отсутствуют для линейных цепей. Для расчета нелинейных цепей при действии постоянных ЭДС (источников напряжения или тока) применяют графические, графоаналитические, аналитические и численные методы. Для анализа процессов в нелинейных цепях необходимо иметь вольт-амперные характеристики (ВАХ) всех нелинейных элементов. Вольт-амперные характеристики представляют зависимости  $U=U(I)$  или  $I=I(U)$ . К нелинейным резистивным элементам (НЭ) относятся: лампы накаливания, термисторы, тиритовые элементы, бареттеры, электрическая дуга, ртутные вентили, полупроводниковые вентили, стабилитроны, лампы с тлеющим разрядом и т.д. Нелинейные резистивные элементы отличаются разнообразием вольт-амперных характеристик, что обуславливает их широкое применение в электротехнических, радиотехнических, электронных устройствах.

В инженерной практике широко применяют графические методы расчета нелинейных цепей. Эти методы имеют некоторые особенности в зависимости от вида нелинейной цепи.

### Сложение характеристик

При последовательном соединении НЭ (рис. 1) ВАХ складываются при одинаковом токе:  $U(I)=U_1(I)+U_2(I)$ .

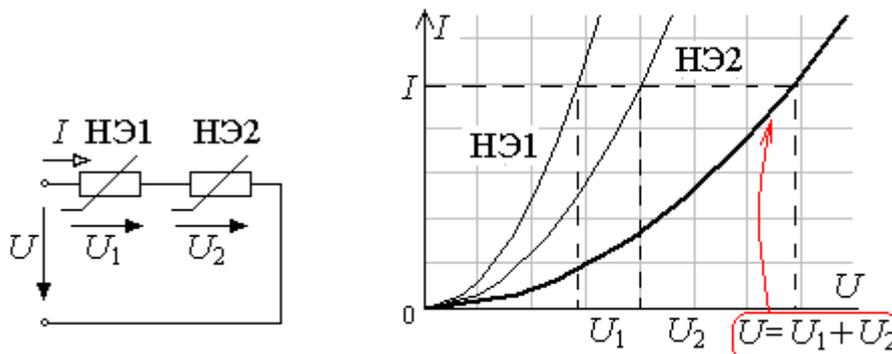


Рис. 1

При параллельном соединении НЭ (рис. 2) ВАХ складываются при одинаковом напряжении:  $I(U)=I_1(U)+I_2(U)$ .

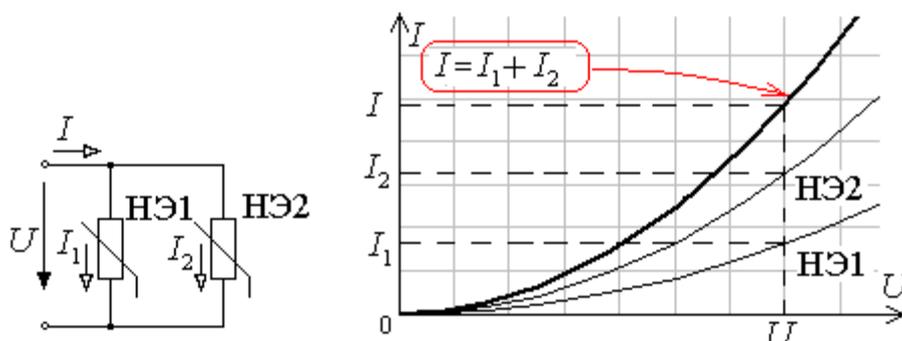


Рис. 2

Построение характеристик для активно-пассивных участков показано на рис. 3.

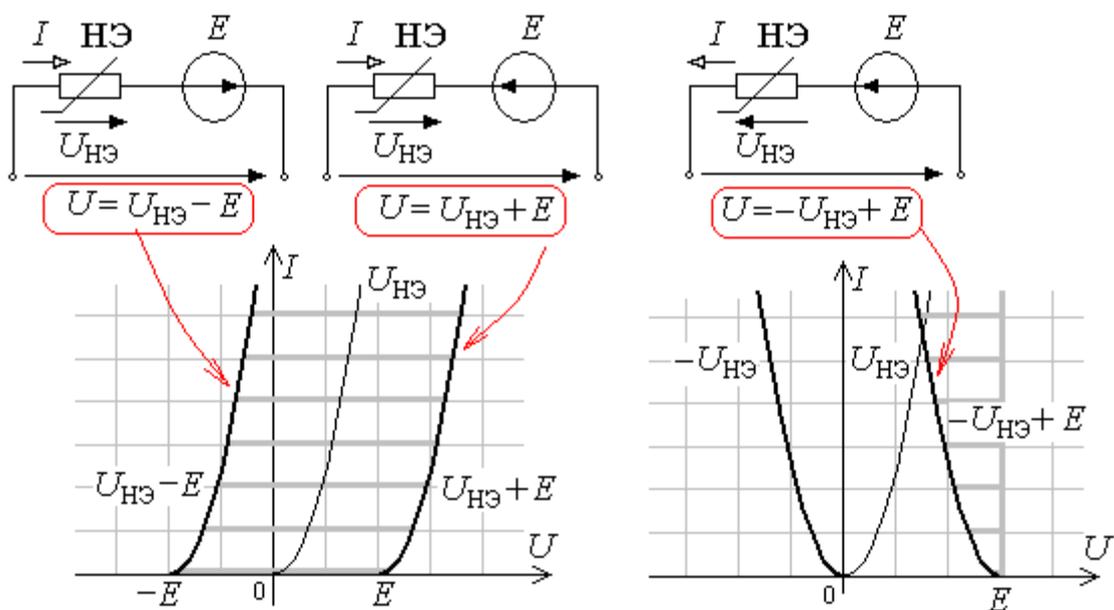


Рис. 3

### Метод двух узлов

Для схем, содержащих только два узла или приводящихся к ним, применяют метод двух узлов. Это графическое решение уравнений Кирхгофа. В схеме на рис. 4 три ветви, содержащие нелинейные элементы с заданными вольтамперными характеристиками. Расчет предполагает нахождение всех токов и узлового напряжения  $U_{ab}$ . Выражают напряжение  $U_{ab}$  через токи в ветвях при известных  $E_1$  и  $E_2$ :

$$U_{ab}(I_1) = -E_1 + U_1(I_1)$$

$$U_{ab}(I_2) = E_2 - U_2(I_2)$$

$$U_{ab}(I_3) = U_3(I_3)$$

На рис. 4 представлены ВАХ всех нелинейных элементов.

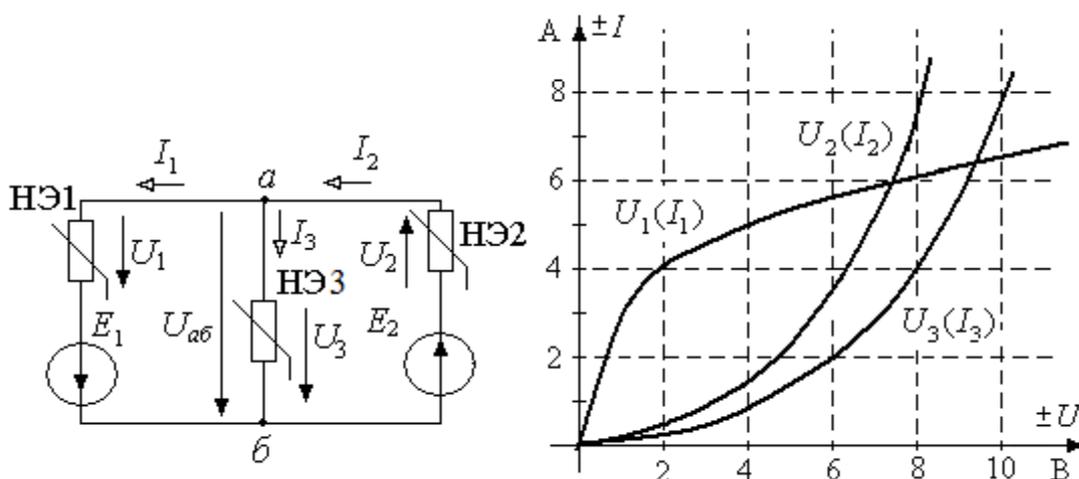


Рис. 4

Для решения задачи следует, представив токи всех ветвей как функции узлового напряжения  $U_{ab}$ , записать первый закон Кирхгофа:

$$I_1(U_{ab}) + I_3(U_{ab}) = I_2(U_{ab}).$$

Строим характеристики ветвей  $I_1(U_{ab})$ ,  $I_2(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$ . Графически складываем  $I_1(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$ . Пересечение суммарной характеристики с характеристикой  $I_2(U_{ab})$  дает графическое решение  $U_{ab} = 4$  В и  $I_2 = 7$  А. Токи  $I_1 = 6$  А и  $I_3 = 1$  А находят по кривым  $I_1(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$  при  $U_{ab} = 4$  В. На рис. 5 показано графическое решение задачи.

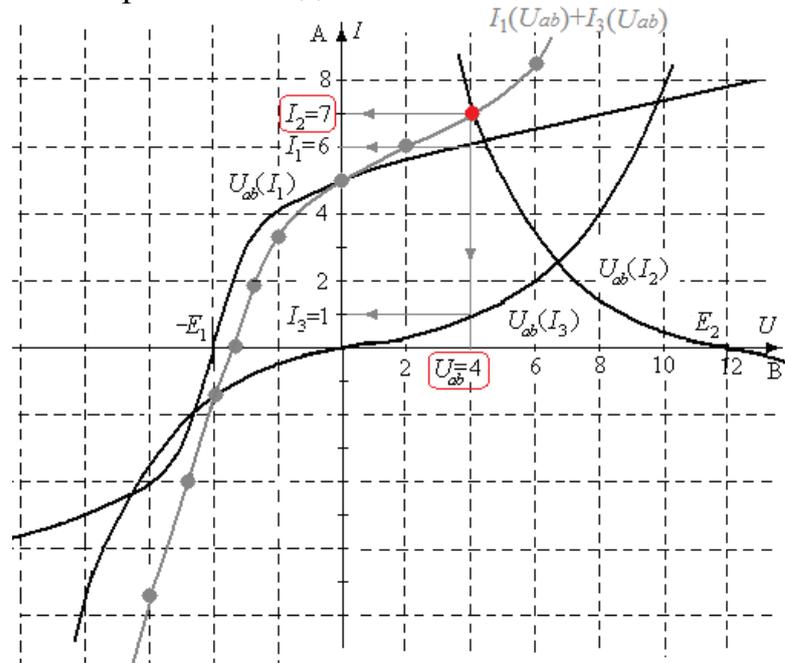


Рис. 5

### Метод эквивалентного генератора

Если в электрической цепи только один НЭ, то ток в ветви с нелинейным элементом проще определить методом эквивалентного генератора. На рис. 6 показана схема электрической цепи и её приведение к эквивалентной схеме. На рис. 7 показано графическое решение задачи с учетом соотношения  $I_{кз} = U_{хх} / R_{вх}$ .

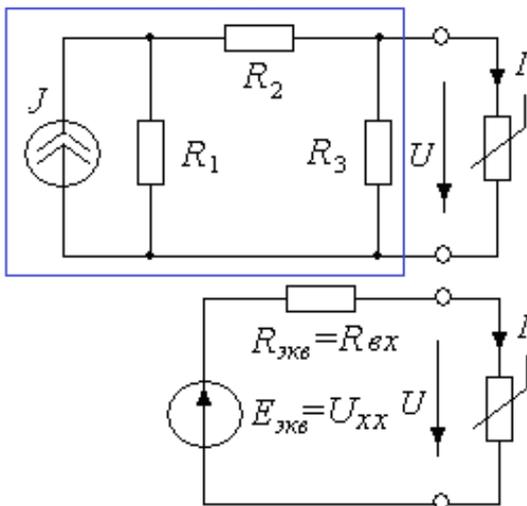


Рис. 6

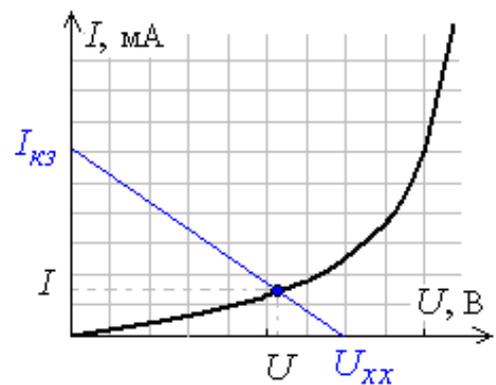


Рис. 7

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование цепи постоянного тока, содержащей нелинейные элементы: экспериментальное получение характеристик нелинейных резистивных элементов, расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В лабораторной работе используется источник постоянного напряжения  $E=0\dots 12$  В из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** с регулируемым по величине напряжением. Для наблюдения вольтамперных характеристик используют источник синусоидального напряжения из модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы расположены в блоке **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** постоянного тока. Нелинейные элементы электрической цепи выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

## 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ И ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА СТУДЕНТОВ К РАБОТЕ

1. В работе исследуются цепи с нелинейными элементами, схемные изображения и ВАХ которых представлены в табл. 1. Для элементов НЭ1, НЭ3, НЭ5, НЭ6 в таблице приводятся их ВАХ. Для элементов НЭ2 и НЭ4 необходимо качественно нарисовать вольтамперные характеристики нелинейных двухполюсников при  $R=100$  Ом и напряжении на входе элементов, равном  $\pm 12$  В.

2. Для нелинейной цепи, схема которой приведена на рис. 8, построить зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ , если  $R=100$  Ом,  $U_{\text{ст}}=6$  В при следующих значениях сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ : 1)  $R_{\text{н}}=\infty$ , 2)  $R_{\text{н}}=100$  Ом, 3)  $R_{\text{н}}=330$  Ом.

3. Для разветвленной нелинейной цепи, схема которой приведена на рис. 9, рассчитать графическим методом напряжение  $U_{ab}$  и токи в ветвях. ВАХ нелинейного элемента **2** аппроксимирована выражением  $I_2(U_2)=k_2U_2^3$  (для  $n$  – нечетных номеров бригад) и  $I_2(U_2)=k_2U_2^2$  (для  $n$  – четных), для линейных элементов **1** и **3**:  $I_1(U_1)=k_1U_1$ ,  $I_3(U_3)=k_3U_3$  (ток в миллиамперах, напряжение в вольтах). Значения  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $E$  приведены в табл. 2.

4. Рассказать преподавателю о порядке выполнения лабораторной работы (см. Рабочее задание).

Таблица 1

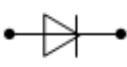
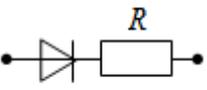
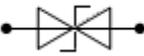
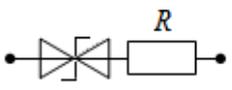
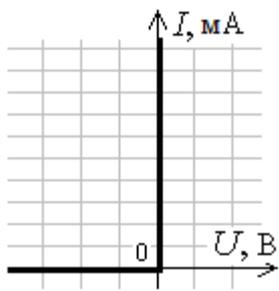
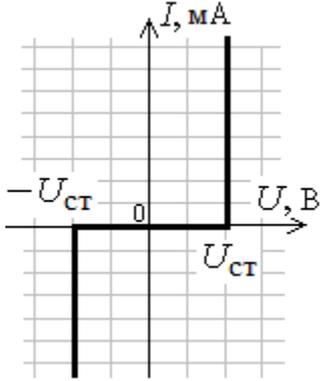
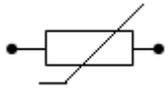
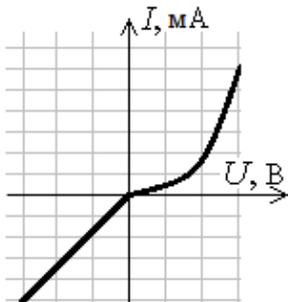
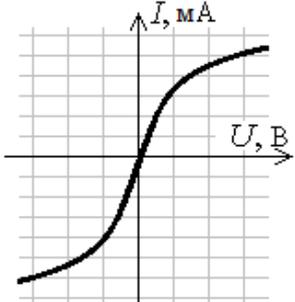
НЭ	НЭ1 	НЭ2 	НЭ3 	НЭ4 
$I(U)$			 $U_{ст}=6\text{ В}$	
НЭ	НЭ5 	НЭ6 		
$I(U)$				

Таблица 2

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E, \text{ В}$	5	3	4	5	4	5	5	5	3	4	5	5
$k_1$	1	5	2	1	5	5	4	2	1	4	3	2
$k_2$	1	4	1	1,5	2	6	1	3	2	4	1	2
$k_3$	2	2	4	5	8	10	5	1	2	3	4	1,5

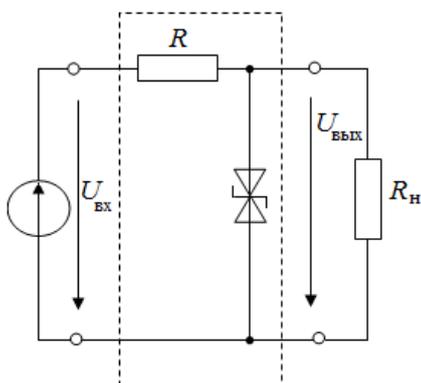


Рис. 8

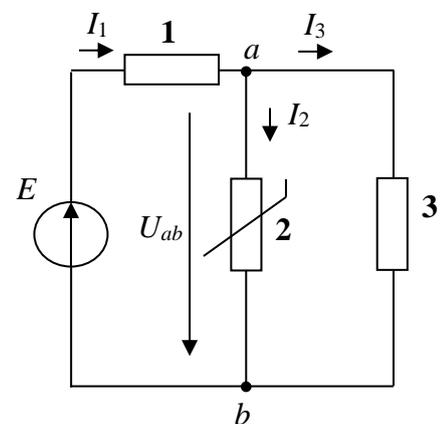


Рис. 9

#### 4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

- Собрать цепь по схеме рис. 1П. Исследуемые нелинейные двухполюсники НЭ1-НЭ6 приведены в табл. 1. В качестве НЭ5 выбрать элемент, обозначенный в модуле **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** как  $R_1$ . В качестве НЭ6 выбрать элемент, обозначенный в модуле **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** как **НЛ**. Установить величину сопротивления  $R=100$  Ом в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель Форма установить в положение  $\sim$ .

- Регулятором **Частота** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**, установить значение частоты  $f=200-300$  Гц. Регулятором **Амплитуда** установить действующее значение напряжения на выходе модуля 7–8 В. Контролировать напряжение с помощью электронного вольтметра.

- Включить **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Подключить **Вход 1** осциллографа к точке 1 (X). Подключить **Вход 2** осциллографа к точке 2 (Y) (см. Методические указания).

- Получить на экране **ОСЦИЛЛОГРАФА** изображения ВАХ исследуемых нелинейных элементов НЭ1-НЭ6. Полученные изображения нанести на кальку или сфотографировать.

- Собрать цепь по схеме рис. 2П.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** 0...12 В.

- Плавно изменяя регулятором напряжения  $U$  от нуля до 12 В с шагом 1,0 В экспериментально получить статические характеристики нелинейных двухполюсников НЭ5 ( $R_1$ ) и НЭ6 (**НЛ**). Измеренные величины занести в табл. 1П.

- Поменять полярность источника напряжений и повторить эксперимент. Измеренные величины занести в табл. 1П.

- Собрать электрическую цепь по схеме рис. 3П, установить величину сопротивления  $R=100$  Ом.

- Плавно изменяя регулятором входное напряжение  $U$  от нуля до 12 В с шагом 1 В измерить выходное напряжение при: 1)  $R_H=\infty$ , 2)  $R_H=100$  Ом, 3)  $R_H=330$  Ом. Измеренные величины занести в табл. 2П.

- Собрать электрическую цепь по схеме рис. 4П. Установить на входе цепи напряжение  $E=12$  В. Нелинейные элементы  $R_1$  (НЭ5), **НЛ** (НЭ6) выбираются из блока **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Установить величину сопротивления линейного резистора  $R_3=100$  Ом в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**.

- Измерить токи ветвей, напряжения  $U_1$  и  $U_{ab}$ . Результаты измерений занести в табл. 3П.

- Поменять полярность источника напряжений, установить на входе цепи значение напряжения 5 В. Измерить токи ветвей, напряжения  $U_1$  и  $U_{ab}$ . Результаты измерений занести в табл. 3П.

- Утвердить и подписать протокол измерений у преподавателя.

- Выключить тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

## 5. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 15

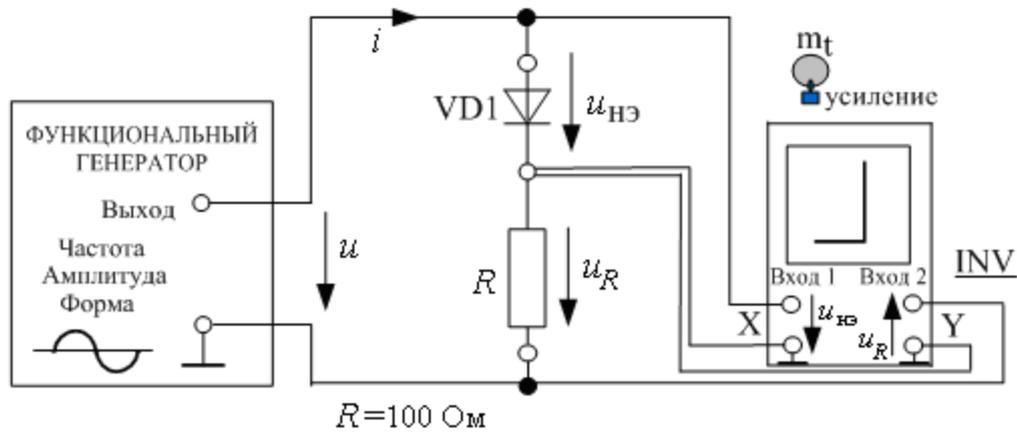


Рис. 1П (для НЭ1, для НЭ2-НЭ6 аналогично)

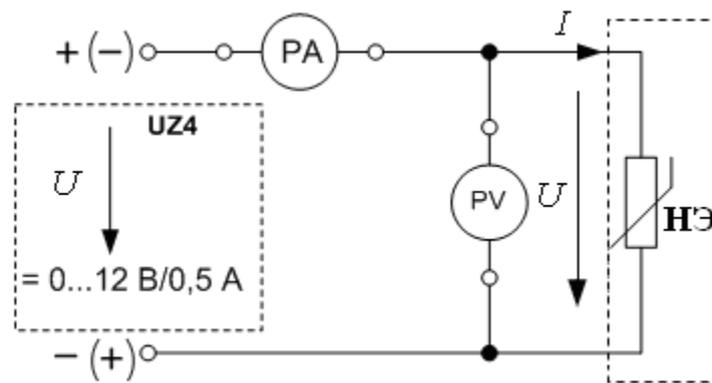


Рис. 2П

Таблица 1П – Экспериментальные данные при исследовании цепи на рис. 2П

$U_{HЭ5}, В$	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8	±9	±10	±11
$I_{HЭ5}, мА$ при $U > 0$												
$I_{HЭ5}, мА$ при $U < 0$												
$U_{HЭ6}, В$	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8	±9	±10	±11
$I_{HЭ6}, мА$ при $U > 0$												
$I_{HЭ6}, мА$ при $U < 0$												

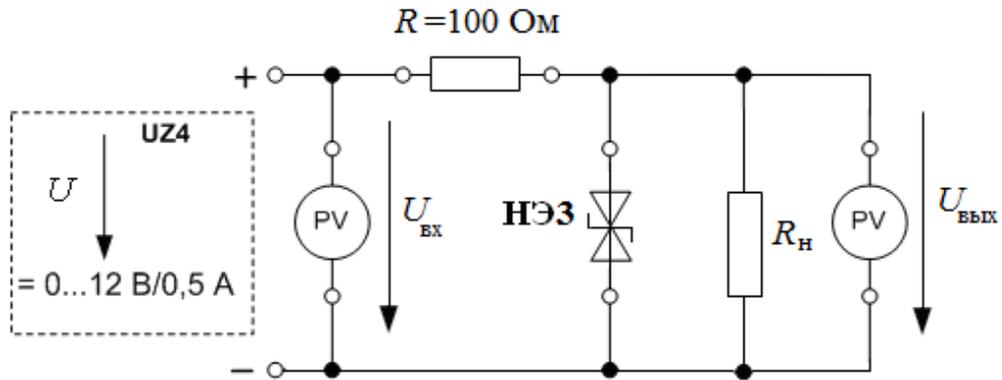


Рис. 3П

Таблица 2П – Экспериментальные данные при исследовании цепи на рис. 3П

$U_{вх}, В$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{ввых}, В$ $R_H = \infty$													
$U_{ввых}, В$ $R_H = 100 \text{ Ом}$													
$U_{ввых}, В$ $R_H = 330 \text{ Ом}$													

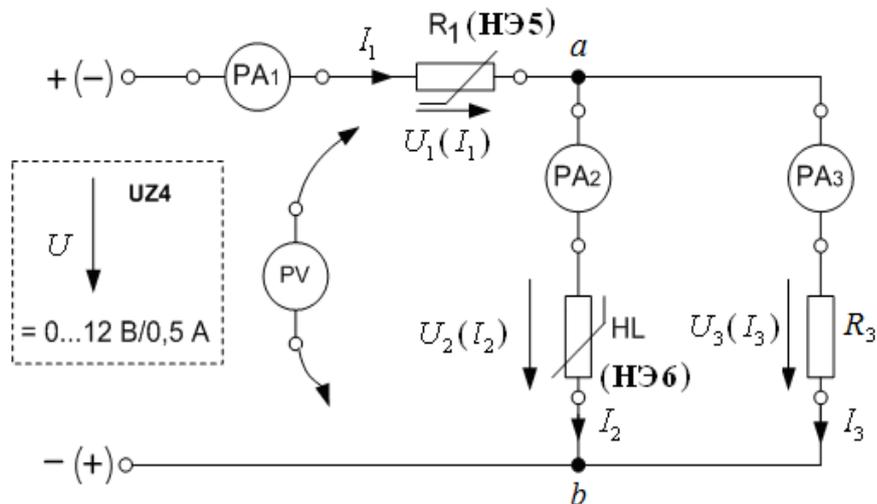


Рис. 4П

Таблица 3П – Экспериментальные данные при исследовании цепи на рис. 4П

$U, В$	$U_1, В$	$U_{ab}, В$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$
12					
-5					

Значение сопротивления  $R_3 =$  \_\_\_\_\_ Ом.

Используя экспериментально полученные вольтамперные характеристики нелинейных элементов  $R_1$  (HЭ5), HL (HЭ6), значение линейного резистора с сопротивлением  $R_3$ , рассчитать графически токи и напряжения в нелинейной цепи (рис. 4П) для двух полярностей входного напряжения. Результаты расчета сравнить с экспериментальными данными.

## Методические указания

Для наблюдения вольт-амперных характеристик на экране дулучевого **ОСЦИЛЛОГРАФА** используют два входа прибора. Напряжения на входы осциллографа подаются в строгом соответствии с рис. 1П. Развертка выключена. Плавно меняя значение входного напряжения и его частоту получить изображение вольтамперных характеристик нелинейных элементов НЭ1-НЭ6.

### 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Корректно оформленная подготовка к работе.
2. На основе опытных данных (рис. 1П) построить с указанием масштабов по оси абсцисс и оси ординат ВАХ НЭ1-НЭ6.
3. На основе опытных данных (табл. 1П) построить с указанием масштабов по оси абсцисс и оси ординат ВАХ НЭ5 и НЭ6.
4. На основе опытных данных (табл. 2П) построить с указанием масштабов по оси абсцисс и оси ординат зависимости  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ .
5. На основе экспериментальных ВАХ НЭ5 и НЭ6 (табл. 1П) графическим способом определить токи и напряжения в нелинейной цепи (рис. 4П) при  $U=12$  В и  $U=-5$  В. Сравнить полученное решение с опытными данными из табл. 4П.
6. Сделать письменный вывод о проделанной работе.

### 7. ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

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. Как в схеме на рис. 2П учесть внутреннее сопротивление миллиамперметра? Продемонстрируйте и объясните, как данное сопротивление влияет на результаты опытов.
2. Как величина сопротивления нагрузки влияет на характеристику  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  (схема на рис. 3П)?
3. Для чего нужен резистор  $R=100$  Ом в схеме на рис. 3П? Почему его называют «балластным»?
4. Постройте зависимости  $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ ,  $I_{\text{ст}}(U_{\text{вх}})$  и  $I_{\text{н}}(U_{\text{вх}})$  для схемы на рис. 3П.
5. Вольт-амперная характеристика нелинейного двухполюсника НЭ5 аппроксимирована проходящей через начало координат ломаной линией, состоящей из трех отрезков прямых. Какая схема диодного аппроксиматора соответствует данной аппроксимации?
6. Как изменится решение для схемы на рис. 4П, если поменять местами нелинейные двухполюсники НЭ5 и НЭ6?
7. В схеме на рис. 4П нелинейный двухполюсник НЭ5 и линейный резистор  $R_3$  поменяли местами. Рассчитать токи и напряжение на нелинейных двухполюсниках методом эквивалентного генератора при  $U=12$  В.
8. В схеме на рис. 4П нелинейный двухполюсник НЭ5 и линейный резистор  $R_3$  поменяли местами. Рассчитать токи и напряжение на нелинейных двухполюсниках методом эквивалентного генератора при  $U=-5$  В.