Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

С.А. Васюков, О.И. Мисеюк, А.В. Ситников

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебно - методическое пособие

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2023

УДК 621.3
ББК 31.2
Рецензент

Васюков С.А.

Исследование нелинейных электрических цепей постоянного тока: учебно-методическое пособие (методические указания к выполнению лабораторной работы) по дисциплине «Электротехника». С.А. Васюков, О.И. Мисеюк, А.В. Ситников – М.: Изд. – во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2023 – ,[] с.: ил.

В методических указаниях изложены основные теоретические сведения о нелинейных цепях постоянного, даны определения нелинейного элемента, статического и дифференциального сопротивлений. Кратко пояснены графический и графо-аналитический методы расчета нелинейной цепи. Представлены задание, порядок выполнения и методические указания к проведению работы, а также контрольные вопросы.

Для студентов 2 – 3 курсов МГТУ им. Н.Э.Баумана, обучающихся по программам специалитета и изучающих дисциплину «Электротехника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника»

© Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ 4
1.1. Характеристики нелинейных элементов 5
1.2. Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока 6
1.2.1. Графический метод расчета нелинейных цепей 7
1.2.2. Графо-аналитический метод 8
2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ 10
2.1. Предварительная подготовка 10
2.2. Порядок выполнения работы 10
2.2.1. Исследование вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (полупроводникового диода) 10
2.2.2. Исследование последовательного соединения нелинейных элементов 12
2.2.3. Исследование параллельного соединения нелинейных элементов 13
2.2.4. Исследование нелинейной цепи методом эквивалентного генератора 14
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 16
ЛИТЕРАТУРА 17

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное высшее техническое образование, ориентированное на формирование профессиональных компетенций, уделяет большое внимание подготовке специалистов, владеющих как теоретическими знаниями, так и современными методами исследования. Особо выделяется способность проводить исследования физических процессов и свойств объектов с выбором технических средств, методов измерений, обработки и представления результатов. А эта способность во многом формируется в результате выполнения лабораторных практикумов.

Нелинейные цепи широко применяют в электротехнике, радиоэлектронике, автоматике и других областях техники. Можно сказать, что большинство элементов цепи являются нелинейными, и лишь при определенных условиях их можно считать линейными. В нелинейных цепях неприменим принцип наложения, поэтому не существует общих приемов аналитического решения нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в цепях.

Можно говорить лишь о приближенных методах решения, пригодных для ограниченного класса уравнений, о численных методах решения с применением ЭВМ, а также о качественном анализе явлений.

К причинам, затрудняющим анализ нелинейных цепей, относятся сложность и разнообразие явлений и процессов в них. В то же время именно многообразием процессов объясняется широкое применение нелинейных элементов и устройств в различных областях техники.

Именно поэтому лабораторная работа по изучению нелинейных цепей постоянного тока – одна из базовых работ курса «Электротехника».

Цель выполнения лабораторной работы по изучению нелинейных цепей постоянного тока:

– закрепление на практике основных положений дисциплины «Электротехника»;

– приобретение навыков самостоятельного изучения основных свойств, законов и режимов работы нелинейных электрических цепей, а также умений и навыков экспериментального определения значений параметров элементов, входящих в исследуемую цепь;

– изучение влияния параметров цепей на режим их работы;

– приобретение студентами навыков работы с программой моделирования электрических цепей *Multisim*.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Элементы электрической цепи, параметры которых зависят от тока, протекающего через них, или напряжения на их зажимах, являются нелинейными, а цепи, в состав которых входит хотя бы один нелинейный элемент, являются нелинейными цепями. Процессы в таких цепях описываются нелинейными уравнениями, причем, к расчету нелинейных цепей неприменим принцип суперпозиции.

Физические процессы, определяющие характеристики нелинейных элементов, часто настолько сложны, что не удается установить аналитическое выражение для них. В этом случае прибегают к графическому или табличному представлению нелинейных зависимостей, полученных экспериментальным путем.

Примеры вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов показаны на рис. 1.1. По виду ВАХ нелинейные элементы можно разделить на симметричные и несимметричные, на элементы с однозначной и неоднозначной характеристиками. Неоднозначной является характеристика (см. рис. 1.1, *в*), у которой каждому значению

тока соответствует не одно, а несколько значений напряжения и наоборот, одному значению напряжения соответствует несколько значений тока.

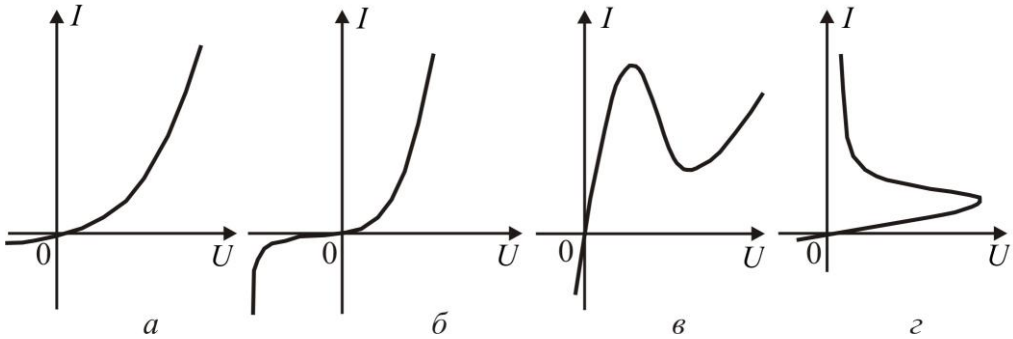

Рис. 1.1. Примеры ВАХ нелинейных элементов: выпрямительный диод (а); стабилитрон (б); туннельный диод (в); динистор (г)

Основным нелинейным элементом электрических цепей при постоянном токе является нелинейный резистор (рис. 1.2), параметры которого задаются вольт-амперной характеристикой $U = f(I)$ (или $I = f(U)$).

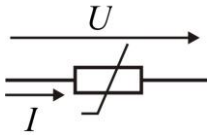

Рис. 1.2. Нелинейный резистор

1.1. Характеристики нелинейных элементов

Для нелинейных резисторов важным параметром является сопротивление. Это сопротивление, в силу нелинейности характеристики, меняется от точки к точке. Существуют два вида сопротивления.

Статическое сопротивление в рабочей точке A вольт-амперной характеристики определяется отношением постоянного напряжения U_0 к постоянному току I_0 в этой точке: $R_{\text{ст}} = \dfrac{U_0}{I_0}$.

Дифференциальное сопротивление в рабочей точке определяется отношением приращения напряжения к приращению тока $R_{\text{диф}} = \dfrac{du}{di}$.

***Пример*:** нелинейный резистор имеет ВАХ вида: $i(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2$. Требуется определить статическое и дифференциальное сопротивление в точке $u = U_0$.

1. При $u = U_0$: $I_0 = a_0 + a_1 U_0 + a_2 U_0^2$.

2. Определяем статическое сопротивление: $R_{ст} = \dfrac{U_0}{I_0} = \dfrac{U_0}{a_0 + a_1 U_0 + a_2 U_0^2}$.

3. Определяем дифференциальную проводимость и дифференциальное сопротивление:

$$G_{диф} = \left.\frac{di}{du}\right|_{u=U_0} = a_1 + 2a_2 U_0 \Rightarrow R_{диф} = \frac{1}{G_{диф}} = \frac{1}{a_1 + 2a_2 U_0}..$$

Приведенный способ является аналитическим. Рассмотрим графический способ определения статического и дифференциального сопротивления. Допустим, ВАХ нелинейного элемента задана графически (рис. 1.3).

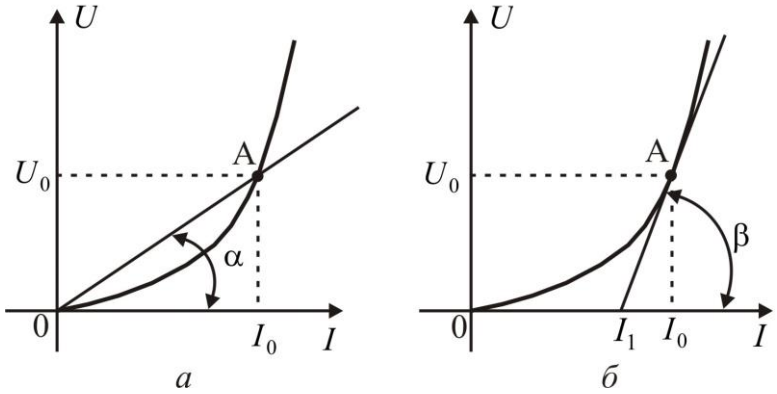

Рис. 1.3. Графический способ определения статического (а) и дифференциального (б) сопротивлений

Из графических построений видно, что статическое сопротивление определяется тангенсом угла наклона прямой, проведенной из начала координат в рабочую точку *A*: $R_{ст} = \dfrac{U_0}{I_0} = \mathrm{tg}\alpha$.

Дифференциальное сопротивление можно определить как тангенс угла наклона касательной к нелинейной характеристике в рабочей точке *A*: $R_{диф} = \dfrac{U_0}{I_0 - I_1} = \mathrm{tg}\beta$.

Статическое и дифференциальное сопротивления на нелинейном участке вольт-амперной характеристики не равны друг другу и зависят от положения рабочей точки на ВАХ.

1.2. Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока

Для расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока используют графический, аналитический и графо-аналитический методы.

В случае применения графического метода характеристики линейных и нелинейных элементов представляют в виде графиков, а система алгебраических уравнений по законам Кирхгофа решается графическими построениями на плоскости. Для аналитического решения вольт-амперные характеристики нелинейных элементов записываются в виде аналитического выражения $U = f(I)$ или $I = f(U)$, а расчет проводится по законам Кирхгофа. Графоаналитический метод сочетает в себе графический и аналитические методы расчета. Он применяется для расчета разветвленных электрических цепей, содержащих один нелинейный элемент.

1.2.1. Графический метод расчета нелинейных цепей

Рассмотрим простейшую нелинейную электрическую цепь (рис. 1.4), для которой задана ВАХ нелинейного элемента и E = 15 В.

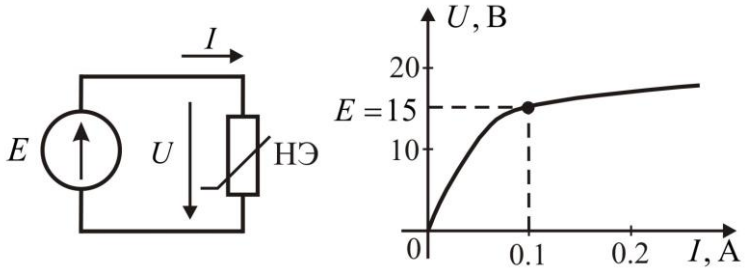

Рис. 1.4. Простейшая нелинейная цепь и ВАХ нелинейного элемента

Для такой схемы расчет тока является очень простым. Откладываем значение напряжения на нелинейном элементе (НЭ) $E = U_{НЭ} = 15\,В$ на ВАХ и определяем по графику ток I = 0.1 А.

Если в цепь включены два последовательных нелинейных элемента, то через них протекает один ток, а напряжения суммируются (второй закон Кирхгофа). Следовательно, если заданы ВАХ последовательно включенных элементов, то можно, просуммировав значения напряжений на графике при одном токе, построить суммарную характеристику, т.е. заменить два нелинейных элемента на один эквивалентный элемент. Графики суммируются следующим образом (рис. 1.5):

1) Выбираем произвольно значение тока, например, I_1;

2) Определяем напряжение на первом нелинейном элементе (НЭ1) U_{11};

3) К напряжению U_{21} на втором нелинейном элементе (НЭ2) прибавляем напряжение U_{11}; на пересечении вертикали I_1 с горизонталью $U_{21} + U_{11}$ получаем точку A нового суммарного графика;

4) Выбрав новое значение тока, например, I_2, определяем положение на ВАХ точки *B*;

5) По точкам *A*, *B* и т.д. строится результирующая ВАХ $U_{НЭ\Sigma}$. Чем больше определено точек суммарного графика, тем точнее будет решение;

6) По результирующей ВАХ определяем ток через нелинейные элементы ($I_{НЭ}$).

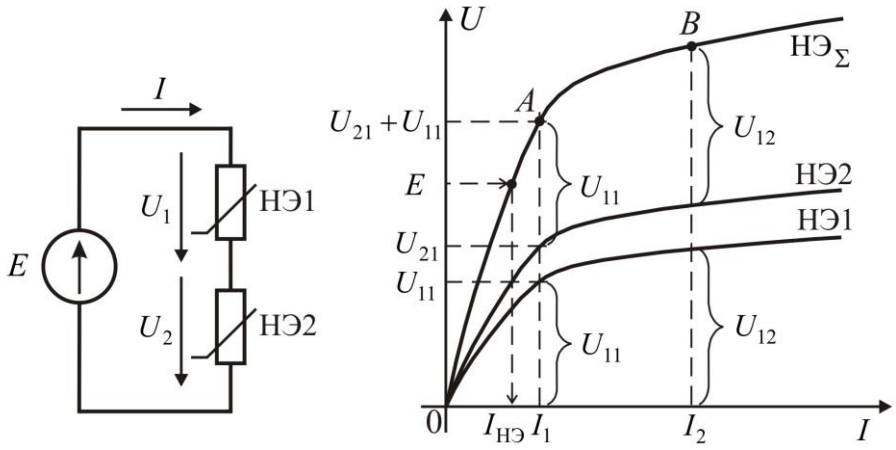

Рис. 1.5. Последовательное включение нелинейных элементов

При параллельном включении нелинейных элементов напряжение на них будет одинаковое, а токи суммируются (первый закон Кирхгофа). Следовательно, ВАХ параллельно включенных элементов нужно суммировать при одном напряжении (по горизонтали).

Графический метод расчета при комбинированном включении нелинейных элементов заключается в последовательном преобразовании схемы (сложение характеристик последовательных элементов при одном токе и параллельных – при одном напряжении) к простейшему виду. После этого по соответствующим ВАХ определяют токи в ветвях и напряжения на элементах.

1.2.2. Графо-аналитический метод

Графо-аналитический метод применим для расчета цепей, содержащих один нелинейный элемент с известной вольт-амперной характеристикой.

Предположим, что имеется электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 1.6. В этой схеме линейная часть цепи представлена в виде активного двухполюсника А, а нелинейная часть – нелинейным резистивным элементом *r*.

Относительно нелинейного элемента всю остальную часть схемы можно заменить (см. рис. 1.6, *б*) эквивалентным генератором напряжения $E_{экв}$, ЭДС которого равна

напряжению на разомкнутых зажимах ветви с нелинейным элементом $U_{\text{хх}} = E_{\text{экв}}$ (режим холостого хода). Внутреннее сопротивление $R_{\text{экв}}$ равно входному сопротивлению пассивного линейного двухполюсника (ЭДС замкнуты накоротко, источники токов разомкнуты) относительно разомкнутой ветви с нелинейным элементом.

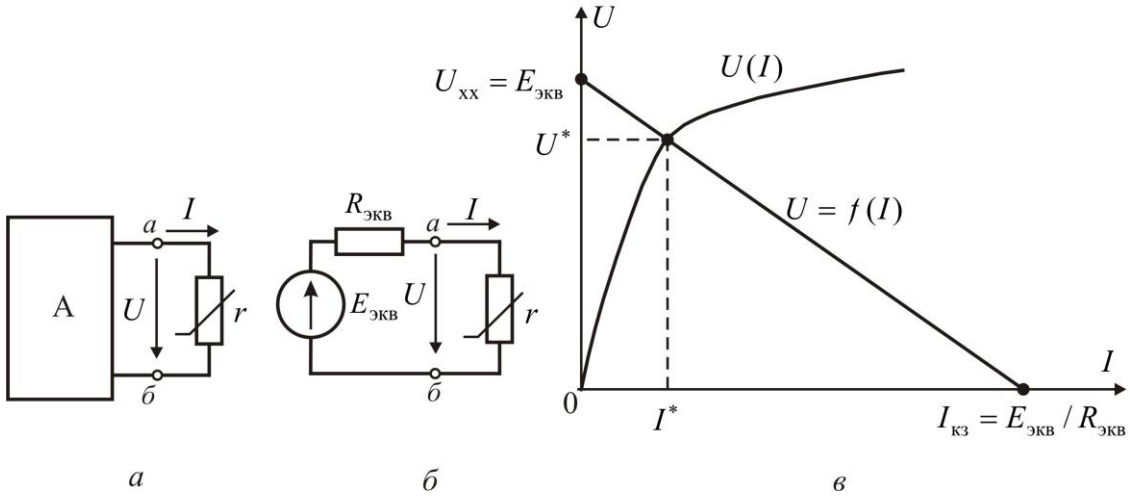

Рис. 1.6. Расчет цепи с одним нелинейным элементом: *а* – исходная схема; *б* - эквивалентная схема; *в* – графическое определение напряжения и тока нелинейного элемента

Так как определение напряжения холостого хода и входного сопротивления проводится при исключенном из рассмотрения нелинейном элементе, то эти этапы расчета являются линейными задачами. Таким образом, сложная схема сводится к схеме, представленной на рис. 1.6, *б*.

Для дальнейшего расчета целесообразно воспользоваться методом графического решения двух уравнений с двумя неизвестными. Одним из уравнений следует считать зависимость $U(I)$ нелинейного элемента, которой соответствует его ВАХ, приведенная на рис. 1.6, *в*. Другое уравнение, связывающее тот же ток I и то же напряжение U, нетрудно получить по второму закону Кирхгофа. Применив его к цепи с эквивалентным генератором (см. рис. 1.6, *б*), получим линейную зависимость, которая носит название – нагрузочная прямая:

$$U = E_{\text{экв}} - IR_{\text{экв}}.$$

На рис. 1.6, в нагрузочная прямая построена по двум точкам. В режиме холостого хода ($I = 0$), $U = U_{\text{хх}} = E_{\text{экв}}$, в режиме короткого замыкания ($U = 0$), $I = I_{\text{кз}} = E_{\text{экв}} / R_{\text{экв}}$.

Очевидно, что искомые ток I^* и напряжение U^* определяются точкой пересечения ВАХ $U(I)$ нелинейного элемента и графика нагрузочной прямой.

Если в цепи несколько нелинейных элементов, но они соединены последовательно или параллельно, то можно заменить их одним эквивалентным элементом и свести задачу к предыдущему случаю.

2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Предварительная подготовка

Для нелинейного элемента схемы (рис. 2.1, *а*) рассчитайте напряжение холостого хода $U_{хх}$ и ток короткого замыкания $I_{кз}$. Параметры источников и номиналы резисторов выберите в соответствии с номером варианта (см. Приложение 1).

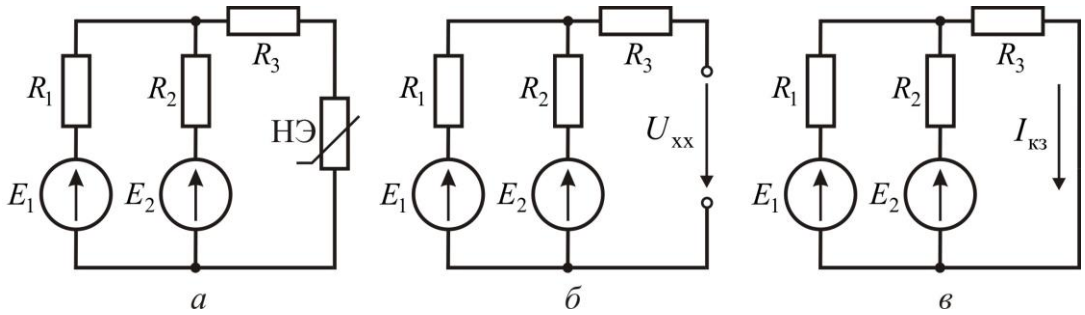

Рис. 2.1. Схемы для проведения предварительного расчета: исходная схема (*а*); схема определения напряжения холостого хода $U_{хх}$ (*б*); схема определения тока короткого замыкания $I_{кз}$ (*в*)

Для расчета напряжения холостого хода следует воспользоваться схемой на рис. 2.1, *б*, а для расчета тока короткого замыкания – схемой на рис. 2.1, *в*.

Занесите расчетные значения в табл. 2.1.

***Примечание*:** расчетные значения напряжения и тока отобразить в табл. 1 в мВ и мА соответственно.

Таблица 2.1

Данные для предварительного расчета (см. Приложение 1) E_1 = _____, В E_2 = _____, В R_1 = _____, Ом R_1 = _____, Ом R_1 = _____, Ом	
$U_{хх}$ = _____, мВ	$I_{кз}$ = _____, мА

2.2. Порядок выполнения работы

2.2.1. Исследование вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (полупроводникового диода)

Схема для исследования вольт-амперной характеристики нелинейного элемента изображена на рис. 2.2, *а*.

Включите компьютер и загрузите программу моделирования *Multisim*.

Составьте на рабочем поле окна *Multisim* схему, изображенную на рис. 2.2, *б*. Тип нелинейного элемента (диода D1) выберите в соответствии с номером варианта (Приложение 1).

Внимание! Для получения корректных результатов измерений необходимо соблюдать полярность подключения элементов и измерительных приборов.

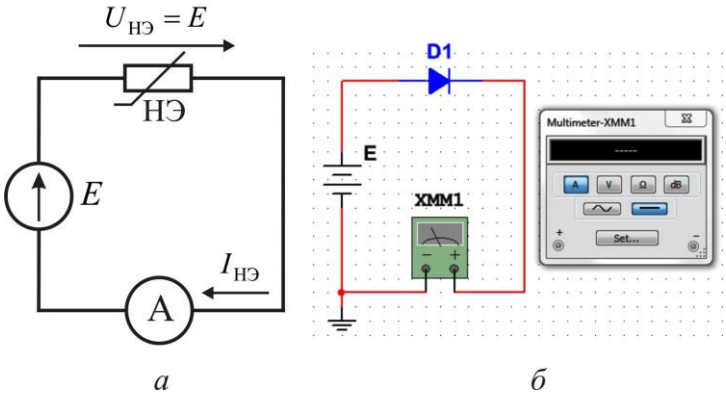

Рис. 2.2. Схема для исследования вольт-амперной характеристики нелинейного элемента: *а* – принципиальная схема; *б* – схема в среде *Multisim*

Измерительный прибор XMM1 (см. рис. 2.2, *б*) переведите в режим измерения постоянного тока, раскрыв окно прибора двойным кликом левой кнопки мыши на изображении элемента на схеме. Заполните табл. 2.2, изменяя напряжение источника E в диапазоне от 0 В до 1 с шагом, указанным в таблице.

При снятии показаний приборов обратить внимание на размерности величин. При измерении тока в окне амперметра размерности могут иметь вид: pA – пикоамперы; nA – наноамперы; uA – микроамперы; mA – миллиамперы.

Тип НЭ (диода) D1: _____

Таблица 2.2

$U_{НЭ} = E$, В	0	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$I_{НЭ}$, мА	0								

Замените в схеме моделирования (см. рис. 2.2, *б*) диод D1 на диод D2 (Приложение 1). Проделайте те же измерения, заполнив табл. 2.3.

Тип НЭ (диода) D2: _____

Таблица 2.3

$U_{НЭ} = E$, В	0	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$I_{НЭ}$, мА	0								

2.2.2. Исследование последовательного соединения нелинейных элементов

Схема для исследования последовательного соединения нелинейных элементов приведена на рис. 2.3, *а*.

Соберите на рабочем поле окна *Multisim* схему, изображенную на рис. 2.3, *б*, соблюдая полярность подключения измерительных приборов. Номинал резистора *R* выбрать в соответствии с вариантом (Приложение 1).

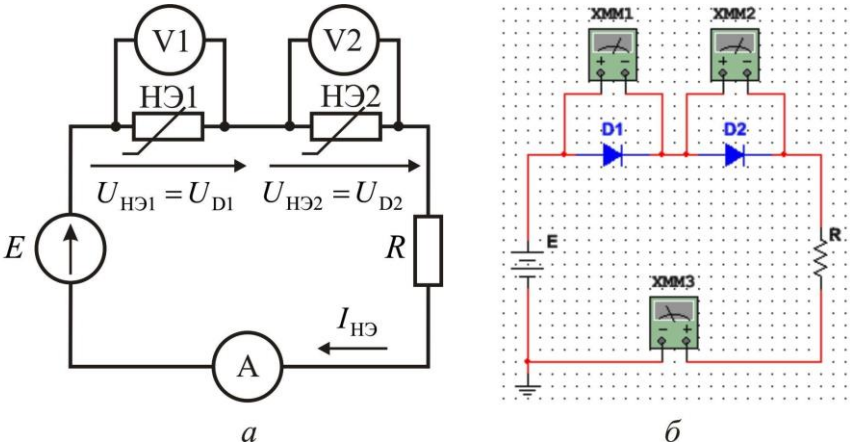

Рис. 2.3. Схема для исследования последовательного соединения нелинейных элементов: *а* – электрическая схема; *б* – схема в среде *Multisim*

Измерительные приборы переведите в режимы: XMM1, XMM2 – в режим измерения постоянного напряжения; XMM3 – в режим измерения постоянного тока.

Установите напряжение источника $E = 3$ В. Запустите процесс моделирования. Запишите показания приборов в табл. 2.4 (измеренные). Остановите процесс моделирования.

Параметры схемы:

D1 _____; D2 _____; $R =$ _____, Ом; $E = 3$ В.

Таблица 2.4

Параметры схемы	Измеренные	Расчетные
U_{D1}, мВ		
U_{D2}, мВ		
$I_{НЭ}$, мА		

Проведите расчет напряжений на нелинейных элементах и тока графическим методом. Для этого:

1. Постройте по данным табл. 2.2 и табл. 2.3 на одном графике ВАХ нелинейных элементов D1, D2. На этом же графике постройте ВАХ линейного резистора *R*.

2. Сложите графики ВАХ D1 и D2 в соответствии с последовательным включением этих элементов. Сложите полученную вольтамперную характеристику с ВАХ линейного резистора.

3. Отложите на оси *U* значение напряжения источника $E = 3\,\text{В}$. По графику суммарной ВАХ определите ток $I_{\text{НЭ}}$, протекающий в цепи. По графикам ВАХ НЭ определите напряжения U_{D1} и U_{D2} на НЭ. Результаты расчетов занесите в табл. 2.4 (расчетные).

Примечание: при построении ВАХ следует использовать заготовку, приведенную в файле отчета по ЛР; ось напряжений разметьте от 0 до 3,9 В с шагом 0.3 В; масштаб по оси тока выберите произвольно, но так, чтобы все графики уместились в пределах поля заготовки.

2.2.3. Исследование параллельного соединения нелинейных элементов

Схема для исследования последовательного соединения нелинейных элементов приведена на рис. 2.4, *а*.

Соберите на рабочем поле окна *Multisim* схему, изображенную на рис. 2.4, *б*, соблюдая полярность подключения измерительных приборов. Номинал резистора *R* выберите в соответствии с вариантом (Приложение 1).

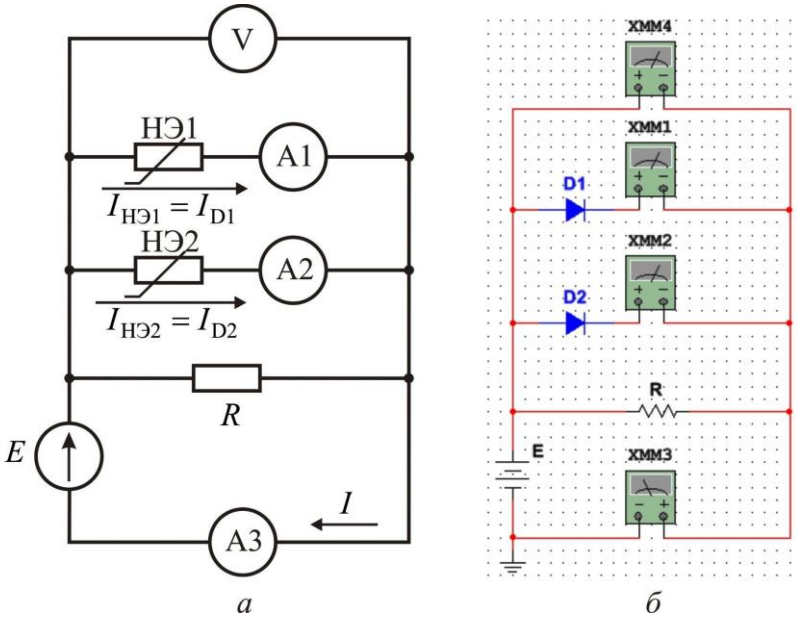

Рис. 2.4. Схема для исследования параллельного соединения нелинейных элементов:

а – электрическая схема; *б* – схема в среде *Multisim*

Измерительные приборы переведите в режимы: XMM1, XMM2, XMM3 – в режим измерения постоянного тока; XMM4 – в режим измерения постоянного напряжения.

Установите напряжение источника $E = 0{,}85\,\text{В}$. Запустите процесс моделирования. Запишите показания приборов в табл. 2.5 (измеренные). Остановите процесс моделирования.

Параметры схемы:

D1 _____; D2 _____; $R =$ _____, Ом; $E = 0{,}85\,\text{В}$.

Таблица2.5

Параметры схемы	Измеренные	Расчетные
U_{D}, мВ	850	850
I_{D1}, мА		
I_{D2}, мА		
I, мА		

Проведите расчет напряжений на нелинейных элементах и тока графическим методом. Для этого:

1. Постройте по данным табл. 2.2 и табл. 2.3 на одном графике ВАХ нелинейных элементов D1, D2. На этом же графике постройте ВАХ линейного резистора R.

2. Сложите графики ВАХ D1 и D2 в соответствии с параллельным включением этих элементов. Сложите полученную вольтамперную характеристику с ВАХ линейного резистора.

3. Отложите на оси U значение напряжения источника $E = 0{,}85\,\text{В}$. По графику суммарной ВАХ определите ток I, протекающий в цепи. По графикам ВАХ НЭ определите токи I_{D1} и I_{D2} на НЭ. Результаты расчетов занесите в табл. 2.5 (расчетные).

Примечание: при построении ВАХ следует использовать заготовку, приведенную в файле отчета по ЛР; ось напряжений разметьте от 0 до 1,0 В с шагом 0.1 В; масштаб по оси тока выберите с шагом в два раза больше, чем в опыте с последовательным соединением элементов.

2.2.4. Исследование нелинейной цепи методом эквивалентного генератора

Соберите на рабочем поле окна *Multisim* схему, изображенную на рис. 2.5, соблюдая полярность подключения измерительных приборов.

Настройте измерительные приборы: XMM1 и XMM2 – измерение постоянного напряжения; XMM3 – измерение постоянного тока.

Установите параметры элементов в соответствии с номером варианта.

Параметры схемы:

D1 _____; $R_1 =$ ____, Ом; $R_2 =$ ____, Ом; $R_3 =$ ____, Ом; $E_1 =$ ____ В; $E_2 =$ ____ В.

При разомкнутых ключах S1 и S2 запустите процесс моделирования. Вольтметром XMM1 измерьте напряжение холостого хода U_{xx} и занесите его значение в табл. 2.6 (измеренные).

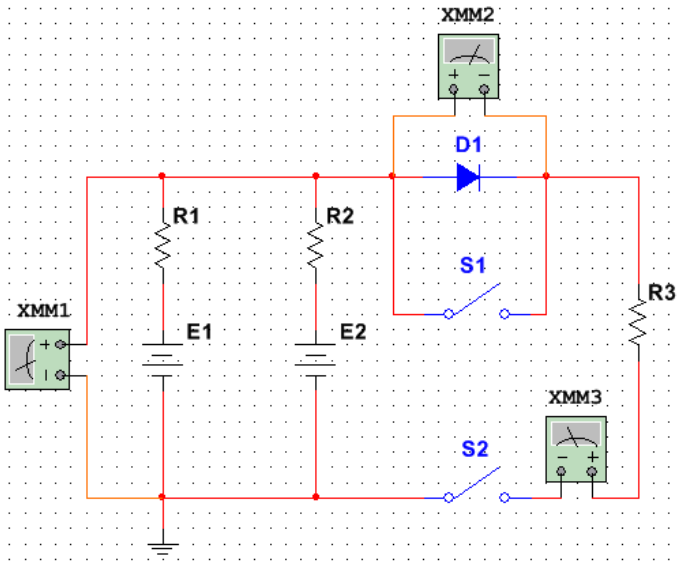

Рис. 2.5. Схема в среде *Multisim* для исследования цепи методом эквивалентного генератора

Замкните ключи S1 и S2, измерьте амперметром XMM3 ток короткого замыкания $I_{кз}$ и занесите его значение в табл. 2.6 (измеренные).

При замкнутом ключе S2 разомкните ключ S1. Измерьте вольтметром XMM2 напряжение на нелинейном элементе (диоде) U_{D1}, амперметром XMM3 - ток диода I_{D1} и занесите его значение в табл. 2.6 (измеренные).

Таблица 6

Параметры схемы	Измеренные	Расчетные
U_{D1}, мВ		
I_{D1}, мА		
U_{xx}, мВ		
$I_{кз}$, мА		

Примечание: при построении ВАХ ось напряжений стоит брать от 0 до 2.6 В с шагом 0.2 В; ось тока брать аналогично той, что была при последовательном соединении.

Постройте ВАХ нелинейного элемента *D*1, используя значения табл. 2.2. На этом же графике отметьте точки по оси напряжения U_{xx} и по оси тока $I_{кз}$, значения которых были определены в процессе предварительного расчета (см. табл. 2.1). Постройте нагрузочную прямую, соединив эти точки. В точке пересечения ВАХ НЭ и нагрузочной

прямой определить напряжение на диоде U_{D1} и ток I_{D1}, протекающий через него. Результаты занесите в табл. 2.6 (расчётные).

Сравните полученные результаты с результатами предварительного расчета. Если измеренные значения будут существенно различаться с расчетными, найдите ошибку или в предварительном расчете, или в схеме моделирования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные характеристики нелинейных элементов.

2. Какие параметры характеризуют нелинейный резистор?

3. Как по ВАХ определить статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента?

4. Почему статическое сопротивление всегда больше нуля, а дифференциальное и динамическое могут иметь любой знак?

5. Какие методы используют для анализа нелинейных резистивных цепей постоянного тока?

6. Какая последовательность расчета графическим методом нелинейной цепи с последовательным соединением резисторов?

7. Какая последовательность расчета графическим методом нелинейной цепи с параллельным соединением резисторов?

8. Какой алгоритм анализа цепи со смешанным соединением нелинейных резисторов?

9. Как упростить схему, в состав которой входят линейные элементы, источники ЭДС, источники тока и один нелинейный элемент?

10. Определите области применения графо-аналитического метода расчета нелинейных цепей.

11. Как рассчитать внутреннее сопротивление эквивалентного генератора?

12. Что такое нагрузочная прямая и как строится ее ВАХ?

13. Что означает режим холостого хода для нелинейной цепи? Как рассчитать напряжение холостого хода нелинейной цепи?

14. Что означает режим короткого замыкания хода для нелинейной цепи? Как рассчитать ток короткого замыкания нелинейной цепи?

Приложение 1

Вар.	D1	D2	R, Ом	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	E_1, В	E_2, В
1	1JH62	BAL99	25	10	10	15	1.6	0.4
2	1N3659	1N3660	0.2	0.2	0.2	0.3	0.9	1.1
3	BYD37D	BAS11	5	2	2	3	1.55	0.5
4	1N3881	MR814	6.65	8	8	6	1.2	0.8
5	BYV28-50	1N5400	1	0.4	0.4	0.3	0.3	1.7
6	BYX10G	BYD14J	10	15	15	2.5	0.68	1.4
7	GI814	1N5621	2.5	0.5	0.5	1	1.3	0.71
8	1N5619	GI814	2	5	5	2.5	1.6	0.6
9	BAL99	1N3064	30	10	10	15	1.5	0.5
10	MR814	BYD14J	20	4	4	0.5	0.81	1.2
11	1N4934	1N5619	5	0.5	0.5	1	1.63	0.6
12	1N5400	BYV28-50	1	0.4	0.4	0.3	0.2	1.8
13	BAS11	GL34J	5	3	6	2	0.8	1.4
14	1LH62	BAL99	25	10	10	15	1.65	0.5
15	BYD37D	GL34J	5	2	2	3	1.7	0.3
16	1N5619	GI814	2	5	5	2.5	1	1
17	BAS11	GL34A	4	3	6	3	0.8	1.4
18	BYD14J	BYX10G	10	10	10	5	1.2	0.8
19	MR814	1N3881	2.5	5	5	7.5	0.5	1.5
20	1N3064	BAL99	20	6	12	16	1.3	0.4
21	SB520	1N1199C	0.04	0.05	0.05	0.025	0.8	1.2
22	1N3494	1N3660	0.1	0.1	0.1	0.05	1.8	0.2
23	1JH62	BAL99	25	24	12	12	1.5	0.75
24	1N4935	1N5621	2	6	3	3	0.9	1.05
25	1N5619	GI814	2,5	5	5	2.5	1	1
26	BYX10G	BYD14J	8	10	10	5	1.4	0.6
27	BA318	1N3064	25	40	40	5	0.5	1.5
28	BA316	1LH62	25	24	12	42	1.1	0.95
29	BYD77B	1N5621	2	2	2	1	0.4	1.6
30	1N1200c	SB520	0.05	0,05	0,05	0,025	0.9	1.1

ЛИТЕРАТУРА

Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 551 с.

Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 544 с.