

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*

В.Л. Русинов, В.И. Усенко

# **ЭЛЕКТРОНИКА**

**ЧАСТЬ 1. Элементная база электроники. Диоды и биполярные транзисторы**

*Учебно-методическое пособие*

**Благовещенск**

2022

ББК 31.2я73  
Р 88

*Рекомендовано  
учебно-методическим советом университета*

*Рецензенты:  
Протасов С.В., начальник монтажно-наладочного участка  
автоматики СП БТЭЦ;  
Теличенко Д.А., доцент кафедры АППиЭ АмГУ,  
канд. техн. наук*

Русинов В.Л., Усенко В.И.

**Р 88 Электроника. Часть 1. Элементная база электроники. Диоды и биполярные транзисторы:** учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ/ В. Л. Русинов, В. И. Усенко – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2022. – 105 с.

Пособие предназначено для студентов 3-го курса энергетического факультета и полностью соответствует рабочей программе дисциплины «Электротехника и электроника».

ББК 31.2я73

*В авторской редакции.*

© Амурский государственный университет, 2022  
© Русинов В.Л., Усенко В.И., авторы

2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
ЛР № 1. Зависимые источники электрической энергии .....	7
1.1. Идеальные пассивные и активные элементы электрических схем .....	7
1.2. Цепи с зависимыми источниками .....	16
1.3. Подготовка и выполнение работы .....	25
1.4. Контрольные вопросы .....	25
ЛР № 2. Нелинейные резистивные цепи .....	27
2.1. Нелинейные резистивные элементы, их характеристики и параметры .....	27
2.2. Графические методы анализа нелинейных резистивных цепей .....	28
2.2.1. Последовательное соединение .....	28
2.2.2. Параллельное соединение .....	29
2.2.3. Определение рабочей точки нелинейного резистивного элемента .....	29
2.2.4. Преобразования активных нелинейных резистивных двухполюсников .....	31
2.3. Определение реакции нелинейного элемента на гармоническое воздействие .....	32
2.4. Разложение несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье .....	35
2.5. Подготовка и выполнение работы .....	46
2.6. Контрольные вопросы .....	47
ЛР № 3. Полупроводниковые диоды и тиристоры .....	48
3.1. Введение в физику полупроводников .....	48
3.1.1. Беспримесные полупроводники .....	48
3.1.2. Примесные полупроводники .....	53
3.2. Полупроводниковые диоды .....	57
3.3. Выпрямители однофазного тока .....	72
3.4. Кремниевые стабилитроны .....	74
3.5. Параметрические стабилизаторы напряжения .....	76
3.6. Подготовка и выполнение работы .....	77
3.7. Контрольные вопросы .....	81
ЛР № 4. Биполярные транзисторы .....	82
4.1. Транзистор с биполярным переходом .....	82
4.2. Принцип действия транзистора .....	85
4.3. Схемы включения и основные параметры .....	88
4.4. Статические вольтамперные характеристики .....	

транзисторов .....	88
4.5. Построение ВАХ транзисторов с помощью характериографа .....	92
4.6. Схема замещения транзистора в физических параметрах .....	100
4.7. Порядок выполнения работы .....	101
4.1. Контрольные вопросы .....	103
Библиографический список .....	104

## ВВЕДЕНИЕ

Программа Multisim стала лучшей из всех доступных симуляторов для моделирования электрических и электронных схем и предоставляет студентам возможность углубленного изучения фундаментальных дисциплин, каковыми является Электротехника и Электроника.

Основными источниками энергии в электрических цепях являются независимые источники напряжения и тока. *Независимые источники* энергии характеризуются либо известным напряжением, либо известным током, которые являются функциями времени. Другая переменная источника (ток или напряжение) неизвестна и определяется схемой, к которой подключен источник. В электронике для моделирования полупроводниковых элементов используются зависимые или управляемые источники энергии. *Зависимые источники* исследуются в лабораторной работе №1. Они так же характеризуются напряжением или током и так же другая переменная определяется схемой, к которой подключен источник. Но между этими двумя типами источников имеется важное отличие. Если одна из величин независимого источника ограничена известной функцией времени, то эта же величина в зависимом источнике является функцией некоторой другой переменной (тока или напряжения) электрической цепи, к которой подключен источник. Из-за этого отличия независимые и зависимые источники значительно отличаются друг от друга.

Полупроводниковые элементы, такие как диоды, транзисторы, тиристоры являются нелинейными резистивными элементами, так как их вольтамперные характеристики (ВАХ) носят нелинейный характер. Электрическое сопротивление таких элементов зависит от приложенного напряжения. Каждой точке цепи соответствует свое значение статического или динамического сопротивления, и эти величины изменяются от точки к точке. Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, является нелинейной. Нелинейные цепи обладают рядом интересных свойств, отличающих их от линейных цепей, так как они описываются нелинейными уравнениями и к ним не применим принцип суперпозиции (наложения). Для решения нелинейных уравнений используют либо графоаналитические, либо численные методы. Лабораторная работа №2 посвящена расчету и моделированию нелинейных цепей.

Лабораторная работа №3 посвящена исследованию полупроводникового диода – элемента, используемого для целей выпрямления и стабилизации выпрямленного напряжения. Снимаются ВАХ выпрямительных диодов и стабилитронов с помощью средств программы Multisim, которая позволяет сделать это оптимальным образом.

Важными управляемыми элементами электронных устройств являются транзисторы, обладающие семейством не только входных, но и выходных характеристик. Снятие ВАХ таких элементов традиционными методами сталкивается с определенными трудностями. Программа Multisim позволяет сделать это изящным способом. Лабораторная работа №4 посвящена получению ВАХ биполярных транзисторов и демонстрации транзистора для целей усиления электрических сигналов. Несмотря на то, что биполярный транзистор работает как устройство, усиливающее ток, основное применение он находит в усилителях напряжения.

Структура лабораторных работ одинакова: *теоретические и практические сведения*, позволяющие студенту самостоятельно подготовиться к работе и быть допущенным к ней после собеседования с преподавателем; *подготовка к работе* – этап, позволяющий студенту сознательно выполнить работу и проверить теорию экспериментом; *задание и порядок выполнения работы*, дающий возможность точно проделать все опыты; *контрольные вопросы*, которые должны помочь студенту защитить лабораторную работу в конце занятий во время общегруппового семинара.

В составлении учебно-методического пособия приняли участие: доцент Усенко В.И. (ЛР №№ 1, 2); ст. преп. Русинов В.Л. (ЛР №№ 3, 4); ст. преп. Бодруг Н.С. (№5); ст. преп. Карпова Т.В. (№6).

# 1. ЛР № 1. ЗАВИСИМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Цель работы.** Приобретение навыков в расчете электрических цепей постоянного тока с зависимыми источниками и в имитационном моделировании таких цепей в программе Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

### 1.1. Идеальные пассивные и активные элементы электрических схем

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, созданных для прохождения электрического тока, электромагнитные процессы в которой могут быть описаны с помощью таких интегральных величин, как электродвижущая сила (ЭДС), напряжение и ток. Электрическая цепь состоит из источников электрической энергии и приемников (нагрузки). В источниках происходит преобразование различных видов энергии в электрическую энергию, в приемниках – наоборот (наряду с запасанием электрической энергии).

В теории цепей предполагается, что каждый элемент цепи полностью характеризуется зависимостью между токами и напряжениями на его зажимах, при этом процессы, имеющие место внутри элементов, не рассматриваются.

Для анализа процессов в электрической цепи с помощью математической модели составляется ее схема – графическое изображение цепи, на котором реальные элементы цепи заменяются их моделями, построенными из идеальных (идеализированных) элементов. Используются пять типов таких элементов: сопротивление, индуктивность, емкость, идеальный источник напряжения (ИИН) и идеальный источник тока (ИИТ). Идеальные элементы – сопротивление, индуктивность и емкость – являются пассивными двухполюсниками, так как энергия, потребляемая ими в любой момент времени, положительна или равна нулю. ИИН и ИИТ относятся к активным элементам, способным отдавать энергию.

Резистор, индуктивная катушка и конденсатор являются пассивными двухполюсными элементами электрических цепей. Для моделирования этих элементов используются идеальные схемные элементы – сопротивление, индуктивность и емкость.

В сопротивлении происходит только необратимое преобразование электромагнитной энергии в другие виды, в индуктивности – только запасание магнитной энергии, в емкости – только запасание электрической энергии. Количественно эти свойства характеризуются параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$ , которые называются так же, как и элементы: сопротивление, индуктив-

ность, емкость. В Международной системе единиц сопротивление выражают в омах (Ом), индуктивность – в генри (Гн), емкость – в фарадах (Ф).

Графические изображения идеальных пассивных двухполюсных элементов – сопротивления, индуктивности и емкости – с положительными направлениями токов и напряжений на них представлены на Рис. 1.1.

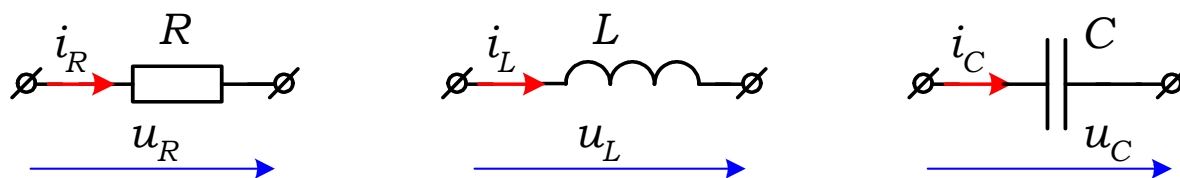


Рис. 1.1. Графические изображения идеальных пассивных элементов

Каждый элемент характеризуется уравнением, дающим связь между мгновенными значениями тока и напряжения:

$$u_R(t) = Ri_R(t) \quad u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt + u_C(0)$$

или

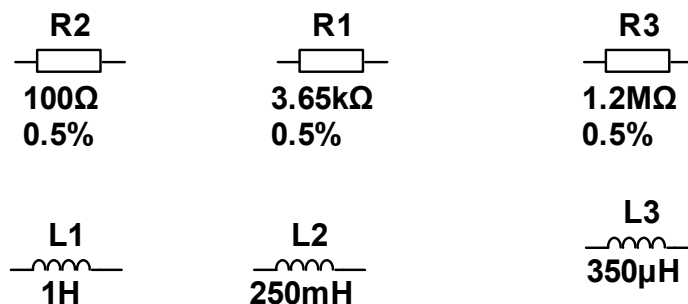
$$i_R(t) = Gu_R(t) \quad i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) dt + i_L(0) \quad i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$$

В дальнейшем аргумент в скобках будем опускать, обозначая мгновенные значения электрических величин строчными буквами (по договоренности).

Энергия магнитного поля, запасенная в индуктивности, и энергия электрического поля, запасенная в емкости, в произвольный момент времени, определяются выражениями:

$$w_i = \frac{Li_L^2}{2}; \quad w_y = \frac{Cu_C^2}{2}.$$

В программе Multisim идеализированные пассивные элементы изображаются следующим образом, рис. 1.2:





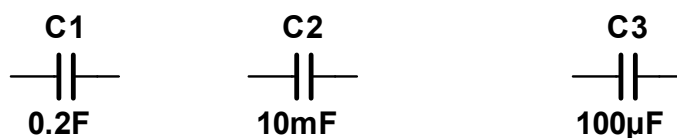


Рис. 1.2. Модели пассивных элементов в Multisim

Как указывалось выше, для составления схем замещения электрических цепей наряду с идеальными пассивными двухполюсниками (сопротивлением, индуктивностью и емкостью) используются идеальные активные двухполюсники – **идеальные источники** напряжения и источники тока (рис. 1.3, а, б).

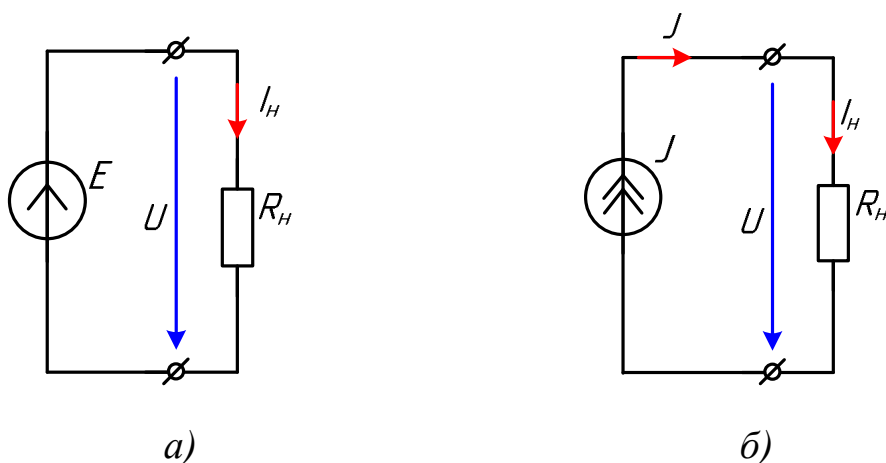


Рис. 1.3. Схемы идеальных источников напряжения и тока

*Идеальный источник напряжения или ЭДС* обеспечивает заданное напряжение на своих клеммах независимо от того, какой ток проходит через него. Значение тока, создаваемого этим источником, определяется подключенной к нему схемой. Напряжение на зажимах такого источника равно его ЭДС – результату действия сторонних сил.

Рассмотрим две схемы с одним и тем же источником напряжения и двумя различными сопротивлениями (рис. 1.4). Токи в обеих схемах различные и определяются по закону Ома:  $I = \frac{E}{R}$ , а напряжение на зажимах каждого источника имеет одно и тоже значение, равное ЭДС источника. Т.о., в схемах использован идеальный источник напряжения.

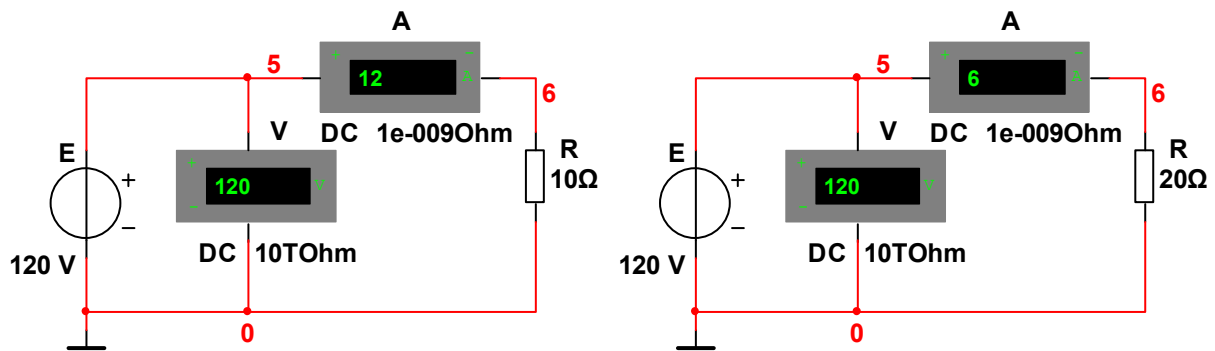


Рис. 1.4. Исследование свойств идеального источника напряжения

Идеальный источник тока - это устройство, которое может генерировать присущий ему ток независимо от схемы, к которой он подключен. Для этого он должен иметь возможность генерировать произвольное напряжение на своих терминалах. По аналогии с определением идеального источника напряжения, указанного выше, запишем: *идеальный источник тока обеспечивает свойственный ему ток на зажимах любой цепи, подключенной к нему*. Напряжение, генерируемое источником, определяется схемой.

Рассмотрим также две схемы с одним и тем же источником тока и двумя различными сопротивлениями (рис. 1.5). Токи в обеих схемах одинаковые, т.к. это токи идеальных источников тока, а напряжения на зажимах источников различные и также определяются по закону Ома:  $U = RI$ . Т.о., в схемах присутствует идеальный источник тока.

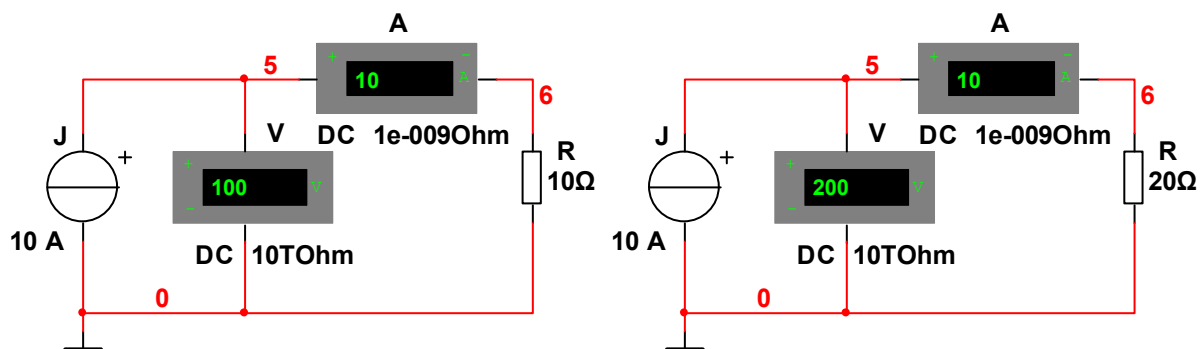


Рис. 1.5. Исследование свойств идеального источника тока

Свойства **реальных** источников энергии существенно отличаются от свойств идеальных активных элементов, так как они обладают внутренним сопротивлением (или проводимостью) и напряжение на их зажимах не остается неизменным. Такой источник может быть представлен двумя схемами замещения: схемой с источником напряжения (рис. 1.6, а) и схемой с источником тока (рис. 1.6, б).

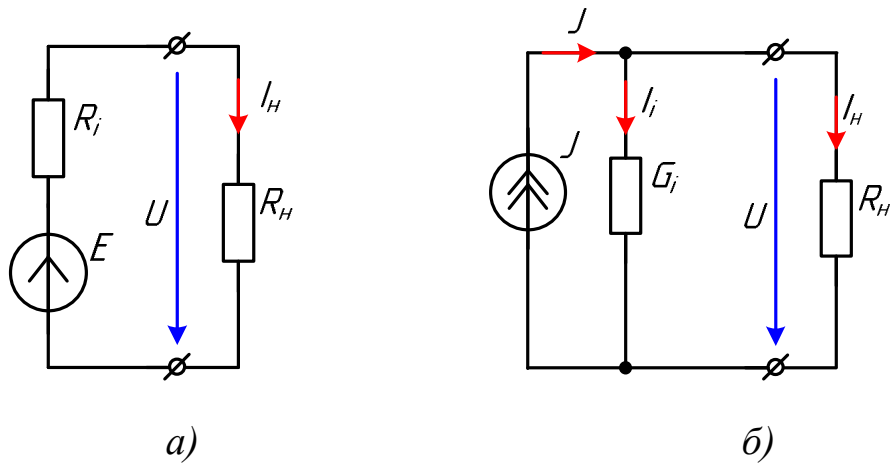


Рис. 1.6. Схемы замещения реального источника

### 1. Схема с источником напряжения и внутренним сопротивлением

Из уравнения  $E = U + R_i I$ , записанного на основании второго закона Кирхгофа, следует, что напряжение на зажимах источника меньше ЭДС на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении:

$$U = E - R_i I.$$

Мощность приемника меньше мощности источника на величину потери мощности на внутреннем сопротивлении:

$$P_i = EI - R_i I^2.$$

Параметры реального источника энергии – ЭДС и внутреннее сопротивление – величины постоянные и могут быть определены опытным путем с использованием данных двух опытов: опыта XX и опыта КЗ.

Рассмотрим этот вопрос на примере следующей схемы (рис. 1.7), полагая, что ЭДС и внутреннее сопротивление источника нам неизвестны.

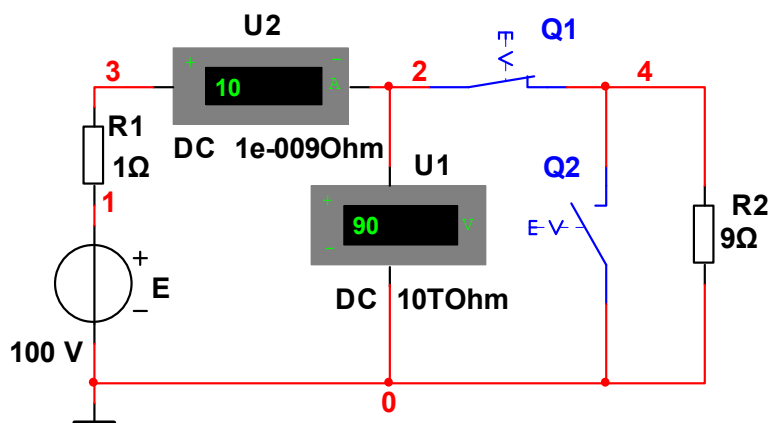


Рис. 1.7. Исходная схема с источником напряжения

а). Опыт XX.

Размыкаяя зажимы источника, т.е. отключая нагрузку, из уравнения электрического равновесия получим:  $I = 0$  и  $E = U$ . Следовательно, вольтметр, подключенный к зажимам реального источника, покажет значение его ЭДС в режиме или опыте ХХ.

Проведем этот опыт в Multisim (рис. 1.8).

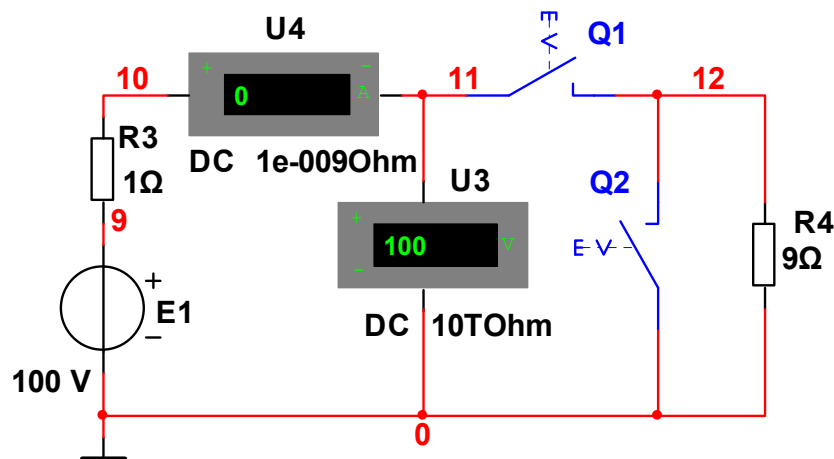


Рис. 1.8. Опыт ХХ на схеме Рис. 1.7

Ток в схеме равен нулю, т.е. в схеме имеет место режим ХХ, а напряжение на зажимах источника составляет 100 В. Следовательно, ЭДС источника равна 100 В:  $E = 100$  В.

б). Опыт КЗ.

Закорачивая «мысленно» зажимы источника, т.е. шунтируя нагрузку, из уравнения электрического равновесия получим:  $U = 0$  и  $R_i = \frac{E}{I}$ .

Проведем этот опыт в Multisim (рис. 1.9).

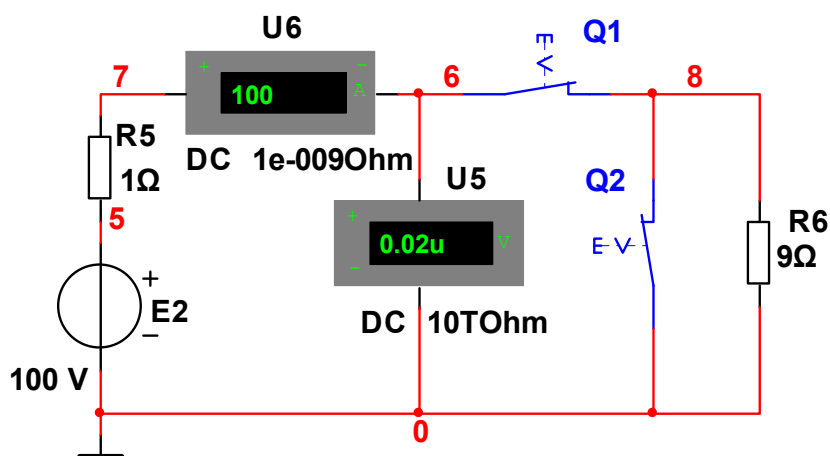


Рис. 1.9. Опыт КЗ на схеме Рис. 1.7

Напряжение на нагрузке практически равно нулю, т.е. в схеме имеет место режим КЗ, а ток  $I = 100$  А. Следовательно, внутреннее сопротивление источника равно:  $R_i = \frac{E}{I} = \frac{100}{100} = 1$  Ом.

Таким образом, для определения параметров реального источника с постоянной ЭДС нужно иметь два прибора – вольтметр на зажимах источника и амперметр, включенный в рассечку одного из проводов, подсоединяющих нагрузку к источнику.

## 2. Схема с источником тока и внутренней проводимостью

Осуществим эквивалентную замену схемы с источником ЭДС (рис. 1.6, а) на схему с источником тока (рис. 1.6, б). С этой целью разделим обе части уравнения для напряжений  $E = U + R_i I$  на внутреннее сопротивление источника, чтобы получить уравнение для токов:

$$\frac{E}{R_i} = \frac{U}{R_i} + I.$$

Условием эквивалентного преобразования является неизменность напряжения и тока нагрузки.

Левая часть является постоянной величиной, т.к. представляет собой отношение двух постоянных величин. Назовем это отношение током источника тока и обозначим его через  $J$ :

$$J = \frac{E}{R_i}.$$

Правая часть представляет собой сумму двух токов – тока нагрузки и тока в ветви, подключенной к сопротивлению нагрузки параллельно. Обозначим его через  $I_i$ :

$$I_i = \frac{U}{R_i} = G_i U, \quad \text{где} \quad G_i = \frac{1}{R_i}.$$

В результате обозначений получим уравнение для схемы с источником тока:

$$J = I_i + I.$$

Таким образом, если заданы параметры  $E$  и  $R_i$  схемы с источником ЭДС (рис. 1.6, а), то параметры схемы с источником тока (рис. 1.6, б) определяются по формулам:

$$J = \frac{E}{R_i}; \quad G_i = \frac{1}{R_i}.$$

Если заданы параметры  $J$  и  $G_i$  схемы с источником тока (рис. 1.6, б), то параметры схемы с источником ЭДС (рис. 1.6, а) определяются по таким формулам:

$$E = \frac{J}{G_i}; \quad R_i = \frac{1}{G_i}.$$

**Пример 1.1.** Дана схема с двумя источниками ЭДС (рис. 1.10). Определить ток в сопротивлении  $R_5$  и напряжение на нем, выполняя последовательно эквивалентное преобразование источников ЭДС в источники тока и наоборот. Проверить результат в Multisim.

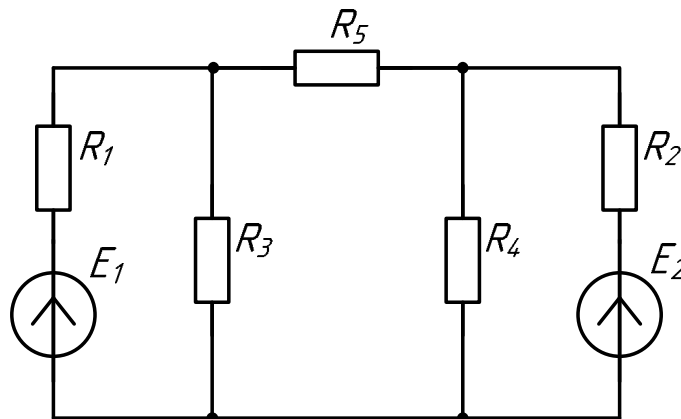


Рис. 1.10. Исходная схема

Исходные данные:  $E_1 = 60$  В;  $E_2 = 120$  В;

$R_1 = 30$  Ом;  $R_2 = 40$  Ом;  $R_3 = 20$  Ом;  $R_4 = 60$  Ом;  $R_5 = 12$  Ом.

Решение. Заменяем источники ЭДС эквивалентными источниками тока (рис. 1.11).

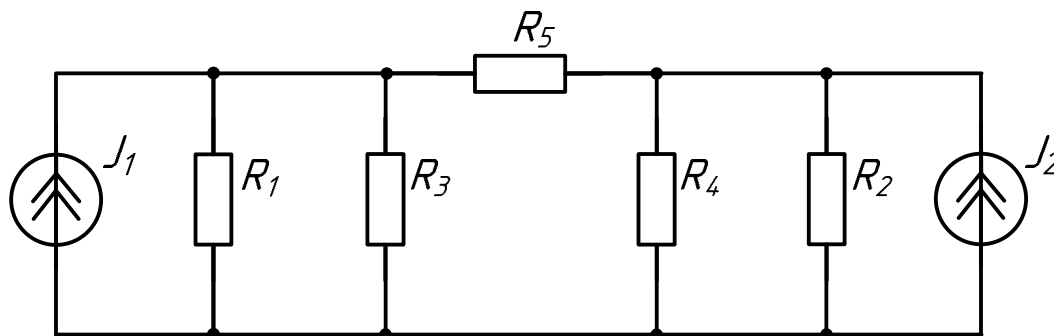


Рис. 1.11. Схема с источниками тока к примеру 1.1

Токи источников тока имеют значения:

$$J_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{60}{30} = 2 \text{ А}; \quad J_2 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{120}{40} = 3 \text{ А}.$$

Объединим параллельно включенные сопротивления и получим схему, представленную на рисунке 1.12. В этой схеме:

$$R_{13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{30 \cdot 20}{30 + 20} = 12 \text{ Ом}; \quad R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = 24 \text{ Ом}.$$

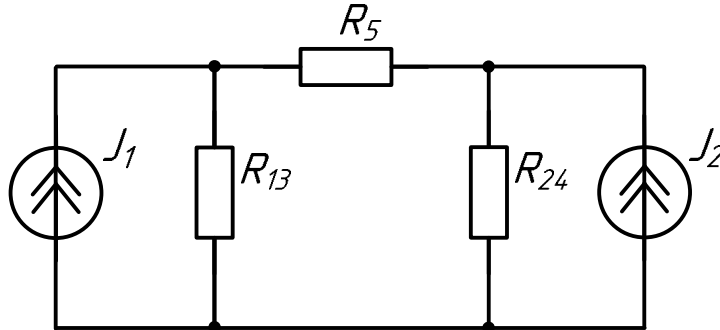


Рис. 1.12. Промежуточная схема с источниками тока к примеру 1.1

И, наконец, источники тока заменим источниками ЭДС (рис. 1.13).

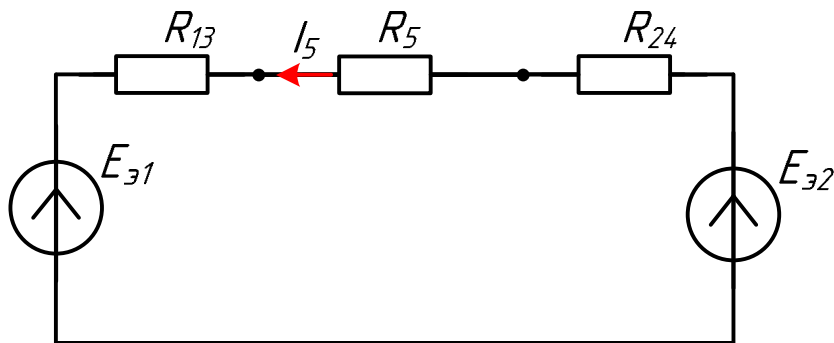


Рис. 1.13. Окончательная схема к примеру 1.1

Для окончательной схемы имеем:

$$E_{\dot{y}1} = R_{13} J_1 = 12 \cdot 2 = 24 \text{ В}; \quad E_{\dot{y}2} = R_{24} J_2 = 24 \cdot 3 = 72 \text{ В}.$$

Обходя контур против часовой стрелки (в сторону большей по величине ЭДС), запишем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$R_{24} I_5 + R_5 I_5 + R_{13} I_5 = E_{\dot{y}2} - E_{\dot{y}1} \text{ или } (R_{24} + R_5 + R_{13}) I_5 = E_{\dot{y}2} - E_{\dot{y}1}.$$

Отсюда получаем значение искомого тока:

$$I_5 = \frac{E_{\dot{y}2} - E_{\dot{y}1}}{R_{24} + R_5 + R_{13}} = \frac{72 - 24}{24 + 12 + 12} = 1 \text{ А}.$$

Напряжение на сопротивлении  $R_5$ :

$$U_5 = R_5 I_5 = 12 \cdot 1 = 12 \text{ В}.$$

Соберем схему в программе Multisim (рис. 1.14):

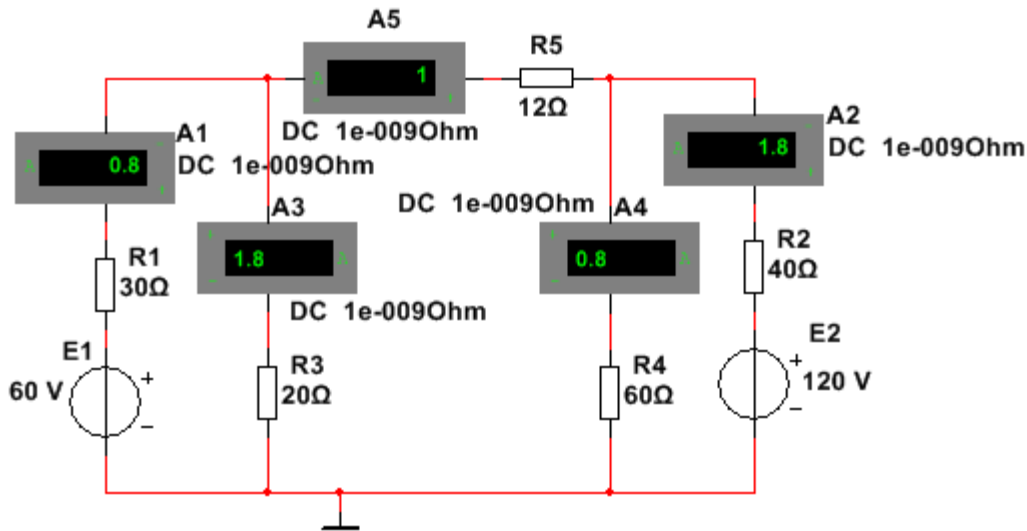


Рис. 1.14. Цепь к примеру 1.1

Напряжение на зажимах идеального источника ЭДС может быть постоянным (DC source) или синусоидальным (AC source). Это же относится и к источнику тока. В этом случае внутреннее сопротивление или проводимость являются комплексными числами ( $Z_i$  или  $Y_i$ ), и для их определения кроме амперметра AC и вольтметра AC понадобится еще и ваттметр. При этом начальную фазу ЭДС можно принять равной нулю ( $\psi_e = 0$ ).

## 1.2. Цепи с зависимыми источниками

Источники, описанные до сих пор, имеют возможность генерировать предписанное напряжение или ток независимо от любой другой электрической величины цепи. Поэтому они называются независимыми источниками. Однако существует еще одна категория источников, выход которых (ток или напряжение) является функцией другого напряжения или тока в цепи. Они называются зависимыми или управляемыми источниками. Некоторые устройства, такие как *транзисторы* и *операционные усилители*, моделируются эквивалентными схемами, состоящими, среди прочего, из управляемых источников.

Выделяют четыре типа управляемых источников (табл.1.1):


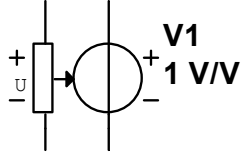

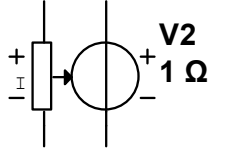

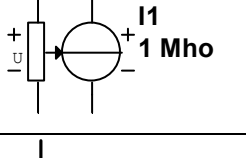
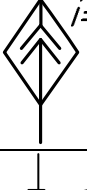
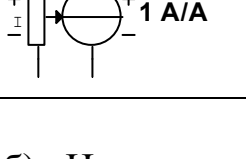
а). Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН). В англоязычной литературе, естественно, и в Multisim, этот источник обозначается как **VCVS** и носит название **Voltage controlled voltage source**. ЭДС этого источника  $e(t)$  пропорциональна управляющему напряжению:

$$e = k_U u_c,$$

где  $k_U = \frac{e}{u_c}$  – безразмерный коэффициент передачи напряжения, равный отношению ЭДС на выходе и напряжения входе.



Таблица 1.1. Общие символы зависимых источников

п/п	Условное графическое обозначение	Полное название зависимого источника	Сокращенное название
а)	 $e=k_u u_c$	Источник напряжения управляемый напряжением	ИНУН
	 $V1$ $1 \text{ V/V}$	Voltage controlled voltage source	VCVS
б)	 $e=k_z i_c$	Источник напряжения, управляемый током	ИНУТ
	 $V2$ $1 \Omega$	Current controlled voltage source	ICVS
в)	 $i=k_y u_c$	Источник тока, управляемый напряжением	ИТУН
	 $I1$ $1 \text{ Mho}$	Voltage controlled current source	VCIS
г)	 $i=k_j i_c$	Источник тока, управляемый ТОКОМ	ИТУТ
	 $I2$ $1 \text{ A/A}$	Current controlled current source	ICIS

б). Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ). В англоязычной литературе этот источник обозначается как **ICVS** и носит название **Current controlled voltage source**. ЭДС этого источника  $e(t)$  пропорциональна управляющему току:

$$e = k_z i_c,$$

где  $k_z = \frac{e}{i_c}$  – передаточное сопротивление, равное отношению ЭДС на выходе к току на входе.

в). Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). В англоязычной литературе этот источник обозначается как **VCIS** и носит название **Voltage controlled current source**. Ток этого источника  $j(t)$  пропорционален управляющему напряжению:

$$j = k_y u_c,$$

где  $k_y = \frac{j}{u_c}$  – передаточная проводимость элемента, равная отношению тока на выходе к напряжению на входе.

г). Источник тока, управляемый током (ИТУТ). В англоязычной литературе этот источник обозначается как **ICIS** и носит название **Current controlled current source**. Ток этого источника  $j(t)$  пропорционален управляющему току:

$$j = k_I i_c,$$

где  $k_I = \frac{j}{i_c}$  – безразмерный коэффициент передачи тока, равный отношению токов на выходе и входе.

**Пример 1.2.** В цепи (рис. 1.15) действует независимый источник напряжения с ЭДС  $E_1 = 60$  В и ИНУН (VCVS) с ЭДС  $E_2 = k_U U_{ab}$ . Найти токи в ветвях, если  $R_1 = R_2 = R_3 = 10$  Ом,  $k_U = 5$ .

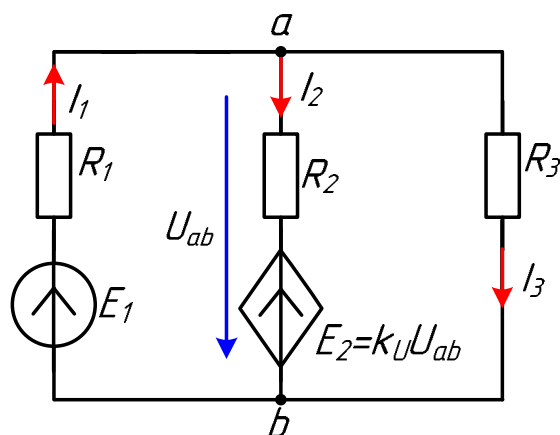


Рис. 1.15. Схема с ИНУН

**Решение.** Запишем три уравнения по второму закону Кирхгофа, вводя в них напряжение между узлами схемы  $U_{ab}$ :

$$R_1 I_1 + U_{ab} = E_1; \quad R_2 I_2 - U_{ab} = -E_2; \quad R_3 I_3 - U_{ab} = 0.$$

Из каждого уравнения запишем выражение для соответствующего тока:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = G_1(E_1 - U_{ab}) = G_1 E_1 - G_1 U_{ab};$$

$$I_2 = \frac{-E_2 + U_{ab}}{R_2} = G_2(-E_2 + U_{ab}) = -G_2 E_2 + G_2 U_{ab};$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = G_3 U_{ab}.$$

В эти выражения введены проводимости:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См}; \quad G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См}; \quad G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См}.$$

Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Подставим в него выражения для токов:

$$-G_1 E_1 + G_1 U_{ab} - G_2 E_2 + G_2 U_{ab} + G_3 U_{ab} = 0.$$

Используем выражение для второй ЭДС  $E_2 = k_U U_{ab}$ :

$$-G_1 E_1 + G_1 U_{ab} - G_2 k_U U_{ab} + G_2 U_{ab} + G_3 U_{ab} = 0.$$

Напряжение между узлами схемы и вторая ЭДС:

$$U_{ab} = \frac{G_1 E_1}{G_1 + G_2 + G_3 - G_2 k_U} = \frac{0,1 \cdot 60}{0,1 + 0,1 + 0,1 - 0,1 \cdot 5} = -30 \text{ В};$$

$$E_2 = k_U U_{ab} = 5(-30) = -150 \text{ В}.$$

Токи в ветвях найдем по приведенным выше формулам:

$$I_1 = G_1(E_1 - U_{ab}) = 0,1(60 + 30) = 9 \text{ А};$$

$$I_2 = G_2(-E_2 + U_{ab}) = 0,1(150 - 30) = 12 \text{ А};$$

$$I_3 = G_3 U_{ab} = 0,1(-30) = -3 \text{ А}.$$

Проверка:

$$I_1 = I_2 + I_3; \quad 9 = 12 - 3; \quad 9 = 9.$$

Соберем схему в Multisim (рис. 1.16).

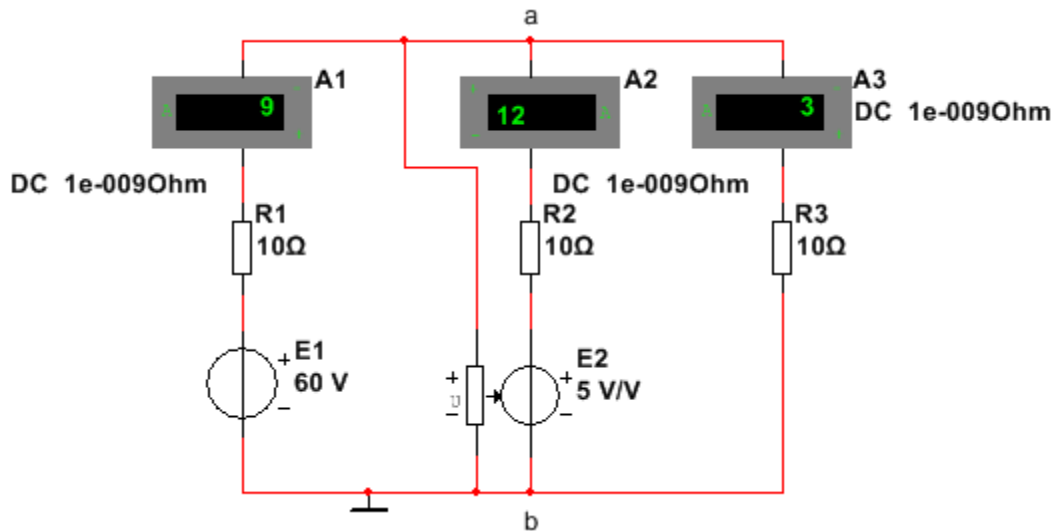


Рис. 1.16. Цепь с ИНУН

**Пример 1.3.** В цепи (рис. 1.17) действует независимый источник тока  $J$  и ИНУТ (ICVS) с ЭДС  $E = k_Z I_2$ . Найти токи в ветвях, если  $R_1 = 15$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $k_Z = 7$  Ом,  $J = 2$  А.

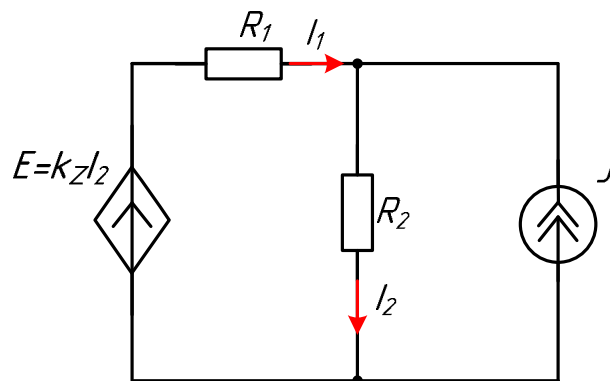


Рис. 1.17. Схема с ИНУТ

**Решение.** Запишем для левого контура уравнение по второму закону Кирхгофа и подставим в него выражение для первого тока  $I_1 = I_2 - J$ :

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = k_Z I_2; \quad R_1 (I_2 - J) + R_2 I_2 = k_Z I_2;$$

$$R_1 I_2 - R_1 J + R_2 I_2 = k_Z I_2.$$

Отсюда получаем:

$$I_2 = \frac{R_1 J}{-k_Z + R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 2}{-7 + 15 + 2} = 3 \text{ А};$$

$$I_1 = I_2 - J = 3 - 2 = 1 \text{ А}.$$

Соберем схему в Multisim (рис. 1.18).

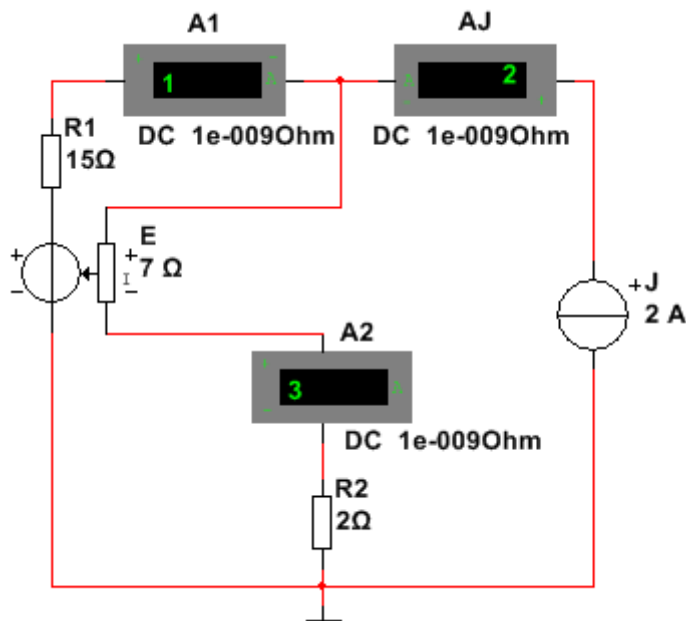


Рис. 1.18. Цепь с ИНУТ

**Пример 1.4.** В цепи (рис. 1.19) действует независимый источник напряжения с ЭДС  $E = 100$  В и ИТУТ (ICIS)  $J = k_I I_1$  ( $k_I = -5$ ). Найти токи в ветвях, если  $R_1 = 1$  кОм,  $R_2 = 4$  кОм,  $R_3 = 1$  кОм,  $R_4 = 5$  кОм.

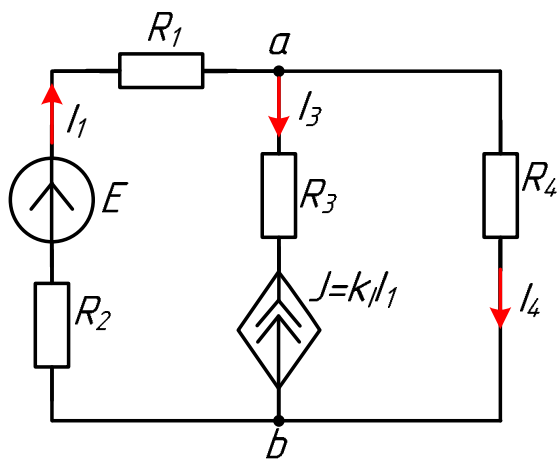


Рис. 1.19. Схема с ИТУТ

**Решение.** Запишем для внешнего контура уравнение по второму закону Кирхгофа и подставим в него выражение для тока в правой ветви  $I_4 = I_1 + k_I I_1$ :

$$(R_1 + R_2)I_1 + R_4 I_4 = E; \quad (R_1 + R_2)I_1 + R_4 I_1 + R_4 k_I I_1 = E.$$

Отсюда получаем:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_2 + (1 + k_I)R_4} = \frac{150}{1 + 4 + (1 - 5)5} = -10 \text{ мА}.$$

Остальные токи:

$$I_4 = (1 + k_I)I_1 = (1 - 5)(-10) = 40 \text{ мА};$$

$$I_3 = -k_I I_1 = 5 \cdot (-10) = -50 \text{ мА}.$$

Проверка:

$$I_1 = I_3 + I_4; \quad -10 = -50 + 40; \quad -10 = -10.$$

Соберем схему в Multisim (рис. 1.20).

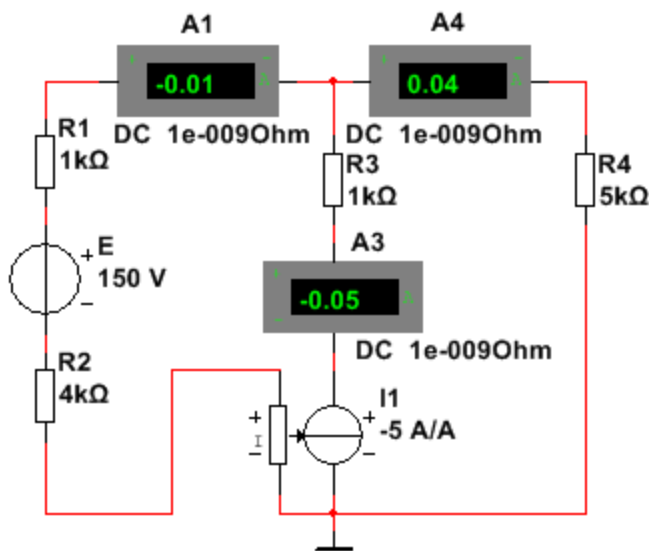


Рис. 1.20. Цепь с ИТУТ

**Пример 1.5.** В цепи (рис. 1.21) действует независимый источник тока  $J_1 = 1 \text{ А}$  и ИТУН (VCIS)  $J_2 = k_y U_{10}$  ( $k_y = 2 \text{ А/В} = 2 \text{ См}$ ). Найти напряжения  $U_{10}$  и  $U_{20}$ , если  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ .

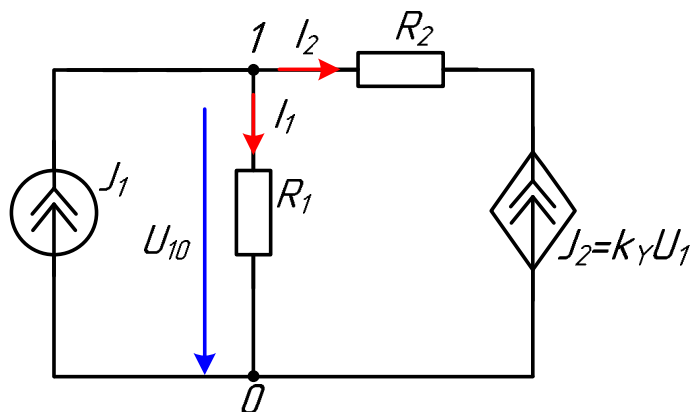


Рис. 1.21. Схема с ИТУН

**Решение.** Управляющее напряжение  $U_{10} = R_1 I_1$ . Поэтому ток зависимого источника  $J_2 = k_y U_{10} = k_y R_1 I_1$ . Ток второй ветви  $I_2 = -J_2 = -k_y R_1 I_1$ . Согласно первому закону Кирхгофа имеем уравнение для токов:

$$J_1 = I_1 + I_2 = I_1 - k_y R_1 I_1 = (1 - k_y R_1) I_1.$$

Отсюда получаем:

$$I_1 = \frac{J_1}{1 - k_y R_1} = \frac{1}{1 - 2 \cdot 1} = -1 \text{ A};$$

$$U_{10} = I_1 R_1 = -1 \cdot 1 = -1 \text{ В.}$$

Следовательно

$$I_2 = J_1 - I_1 = 1 - (-1) = 2 \text{ А.}$$

Из уравнения второго закона Кирхгофа

$$R_2 I_2 + U_{20} - U_{10} = 0$$

Получаем второе искомое напряжение:

$$U_{20} = U_{10} - R_2 I_2 = -1 - 2 \cdot 2 = -5 \text{ В.}$$

Соберем схему в Multisim (рис. 1.22).

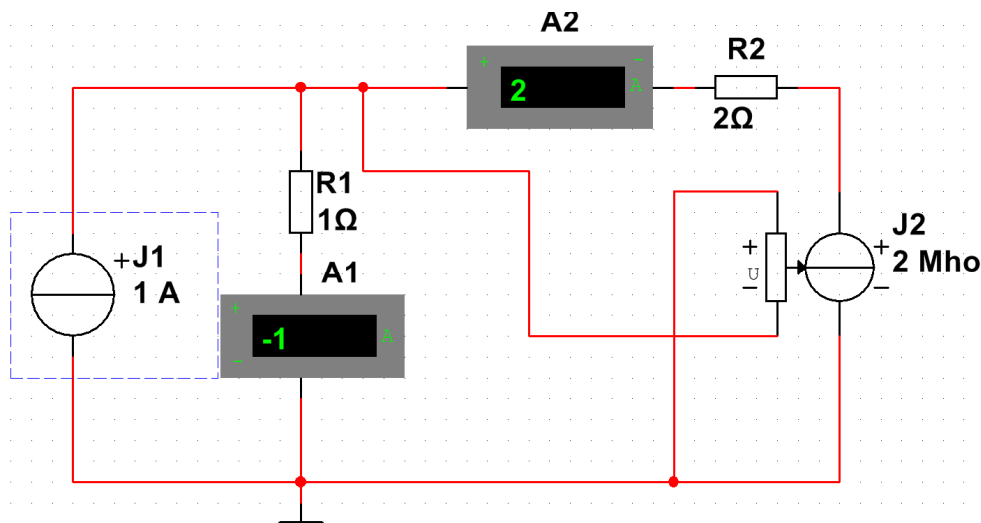


Рис. 1.22. Цепь с ИНУТ

**Пример 1.6.** В цепи, содержащей ИТУТ (ICIS), действует источник гармонической ЭДС  $e(t) = 100 \sin(\omega t + 17^\circ)$  В. Найти напряжение  $u_{ab}(t)$ , если  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом,  $C = 1$  мкФ,  $R_3 = 10$  Ом,  $f = 100$  кГц. Комплекс тока зависимого источника  $\dot{J} = \underline{k}_I \dot{I}_2$ ,  $\underline{k}_I = 0,5e^{-j40^\circ} = 0,383 - j0,321$ .

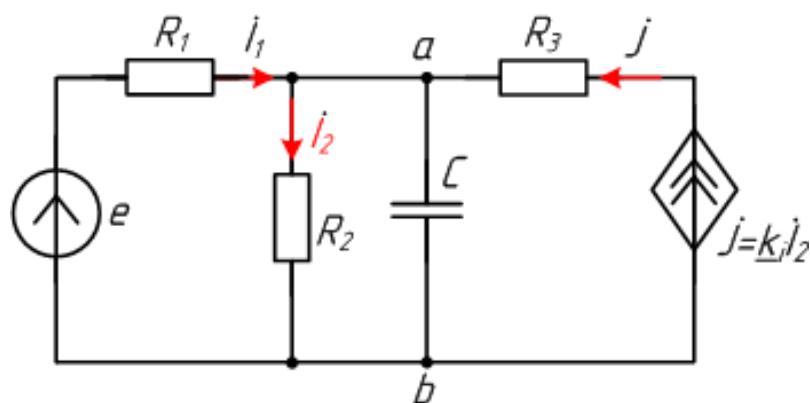


Рис. 1.23. Схема для примера 1.6

**Решение.** Емкостное и комплексное сопротивление емкости:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 1,592 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = -jX_C = -j1,592 = 1,592e^{-j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Комплекс ЭДС:

$$\dot{E} = \frac{100}{\sqrt{2}} e^{j17^\circ} = 70,71e^{j17^\circ} \text{ В.}$$

Комплекс напряжения между узлами согласно методу двух узлов:

$$\dot{U}_{ab} = \frac{\frac{\dot{E}}{R_1} + j}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} = \frac{\frac{\dot{E}}{R_1} + \underline{k}_1 \dot{I}_2}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} = \frac{\frac{\dot{E}}{R_1} + \underline{k}_1 \frac{\dot{U}_{ab}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}.$$

Здесь использовано выражение для комплекса управляющего тока:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_2}.$$

Из формулы для узлового напряжения получаем:

$$\dot{U}_{ab} = \frac{\frac{\dot{E}}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\underline{Z}_C} - \frac{\underline{k}_1}{R_2}} =$$



$$\frac{\dot{E}}{R_1} = 1,064e^{-j66,8^\circ} \text{ В}$$

$$\frac{1}{100} + \frac{1}{10} + \frac{1}{1,592e^{-j90^\circ}} - \frac{0,5e^{-j40^\circ}}{10}$$

Мгновенное значение узлового напряжения, В:

$$u_{ab} = 1,064\sqrt{2} \sin(\omega t - 66,8^\circ)$$

### 1.3. Подготовка и выполнение работы

1. Для каждого из вариантов (последняя цифра номера зачетной книжки) в таблице 1.2 задаются значения параметров электрических схем, приведенных выше на соответствующих рисунках.

2. Рассчитать схему с зависимым источником и определить величины, указанные в условиях соответствующих рисункам задач.

3. Провести эксперимент в программе Multisim и записать в общую таблицу результаты расчета и эксперимента.

Таблица 1.2.

№	$E_1$ В	$E$ В	$J$ А	$J_1$ А	$k_U$ -	$k_Z$ Ом	$k_I$ -	$k_Y$ См	$R_1$ Ом	$R_2$ Ом	$R_3$ Ом	$R_4$ Ом	Рис.
0	100	-	-	-	4	-	-	-	20	15	10	-	1.15
1	-	-	4	-	-	5	-	-	25	5	-	-	1.17
2	-	200	-	-	-	-	-8	-	40	40	10	50	1.19
3	-	-	-	2	-	-	-	4	2	4	-	-	1.21
4	150	-	-	-	6	-	-	-	40	25	20	-	1.15
5	-	-	6	-	-	10	-	-	50	10	-	-	1.17
6	-	400	-	-	-	-	-6	-	20	20	20	20	1.19
7	-	-	-	4	-	-	-	8	4	8	-	-	1.21
8	200	-	-	-	8	-	-	-	60	10	30	-	1.15
9	-	-	8	-	-	15	-	-	20	15	-	-	1.17

### 1.4. Контрольные вопросы

1. Источники энергии называются активными двухполюсниками. Это – независимые источники. Почему они получили такое название? Чем отличается идеальный источник ЭДС от идеального источника тока?

2. Реальный источник с известной ЭДС и внутренним сопротивлением можно заменить двумя схемами замещения. Какие это схемы, как определяются параметры одной схемы через параметры другой схемы и как определить параметры каждой из схем опытным путем?

3. В схемах замещения используются зависимые источники. Сколько типов таких источников используются в схемах? Привести их полные и

краткие названия на русском и английском языках и их графические обозначения в литературе и Multisim.

4. При расчете электрических цепей используются два закона Кирхгофа. Привести формулировку каждого из них для цепей постоянного тока.

5. В работе для измерения постоянных напряжений и токов используются вольтметры и амперметры. Чем отличается один прибор от другого и как включается в цепь каждый из них?

6. В результате расчета схемы некоторое напряжение или какой-либо ток может оказаться отрицательным числом. Что это означает с физической точки зрения?

## 2. ЛР № 2. НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ

**Цель работы.** Приобретение навыков в расчете электрических цепей постоянного тока с нелинейными резистивными элементами и имитационном моделировании таких цепей в программе Multisim.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

#### 2.1. Нелинейные резистивные элементы, их характеристики и параметры

Резистивный элемент представлен идеальным двухполюсником – сопротивлением, т.е. элементом, в котором происходит только необратимое преобразование электрической энергии в другие ее виды. Свойства сопротивления как элемента полностью определяются его статической вольт-амперной характеристикой (ВАХ). По виду ВАХ различают линейные и нелинейные сопротивления (рис.2.1). Для линейного сопротивления зависимость между током и напряжением имеет линейный характер, т.е. его ВАХ суть прямая линия, а его сопротивление или проводимость как параметр являются постоянными величинами. Выражения  $u_R(t) = Ri_R(t)$  или  $i_R(t) = Gu_R(t)$  являются уравнениями прямых линий при условии  $R = \text{const}$  и  $G = \text{const}$ .

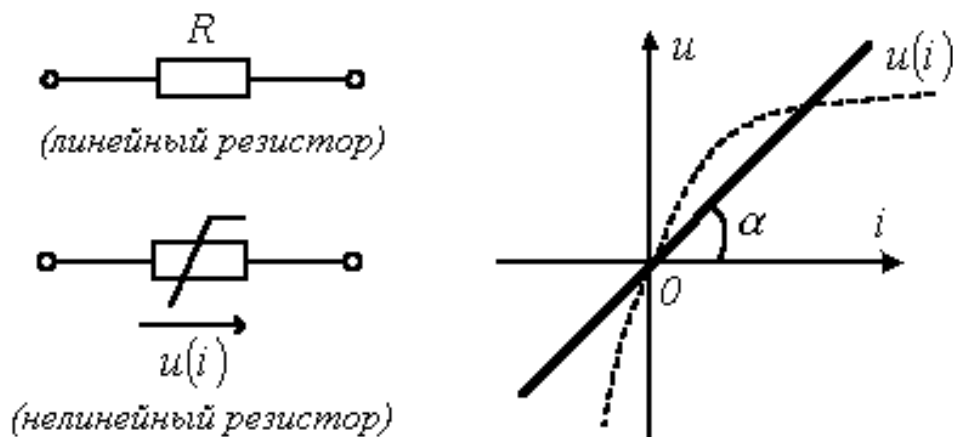


Рис. 2.1. Условные графические обозначения сопротивлений и ВАХ линейного (сплошная линия) и нелинейного сопротивлений (резисторов)

ВАХ нелинейного двухполюсного элемента может быть симметричной или несимметричной относительно начала координат. Для элемента с симметричной характеристикой выполняется условие

$$i(u) = -i(-u) \quad \text{или} \quad u(i) = -u(-i).$$

Режим работы нелинейной цепи, т.е. цепи, содержащей хотя бы один нелинейный элемент, не изменится, если выводы нелинейного элемента с симметричной характеристикой поменять местами.

Каждая точка ВАХ определяет *статическое*

$$R_{ст} = U/I$$

и *дифференциальное*

$$R_{диф} = dU/dI$$

сопротивления нелинейного сопротивления.

Нелинейные свойства сопротивлений лежат в основе принципа действия выпрямителей, стабилизаторов напряжения, усилителей и т.п.

Для расчета нелинейных цепей применяют графические, графоаналитические и численные методы.

## 2.2. Графические методы анализа нелинейных резистивных цепей

### 2.2.1. Последовательное соединение

Пусть схема состоит из двух последовательно включенных нелинейных сопротивлений НС1 и НС2 с заданными ВАХ (рис.2.2). При любом значении тока  $i$  напряжение  $u$  на зажимах схемы равно сумме напряжений на каждом из участков:

$$u = u_1 + u_2; \quad i_1 = i_2 = i.$$

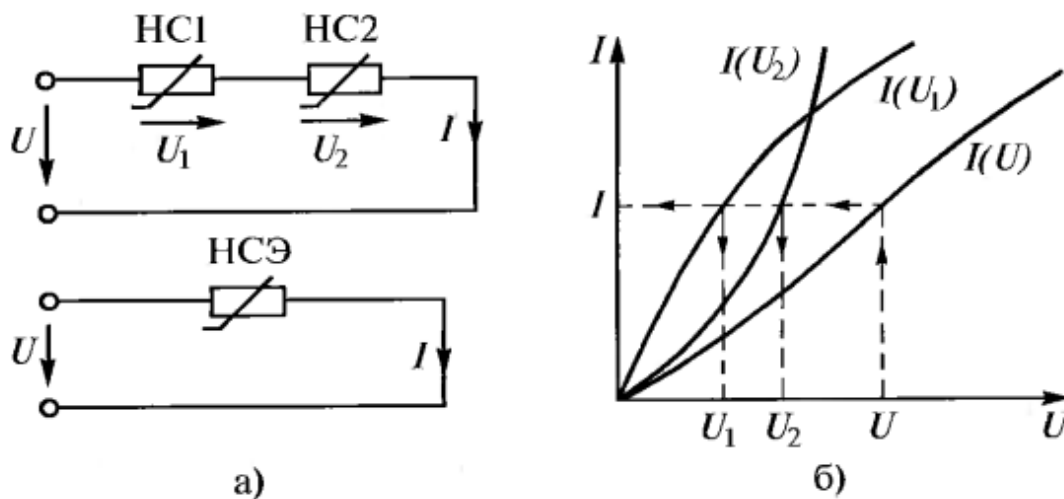


Рис. 2.2. Схема участка цепи с последовательно включенными нелинейными сопротивлениями (а) и их ВАХ (б)

Задаваясь произвольными значениями токов (ординат), суммируют соответствующие им значения напряжений (абсцисс). В результате суммирования получается ВАХ, соответствующая всей цепи, которая может рассматриваться как ВАХ одного нелинейного элемента. Далее по напряжению  $U$ , приложенному к цепи, находят ток  $I$  и напряжение на каждом

элемента  $U_1$  и  $U_2$ . Аналогично может быть построена ВАХ участка цепи с несколькими последовательно соединенными нелинейными элементами.

### 2.2.2. Параллельное соединение

Пусть схема представляет собой два параллельно включенных нелинейных сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  с заданными ВАХ (рис.2.3). При любом значении напряжения  $u$  на зажимах схемы ток  $i$  на входе (ток до разветвления) равен сумме токов отдельных ветвей:

$$i = i_1 + i_2; \quad u_1 = u_2 = u.$$

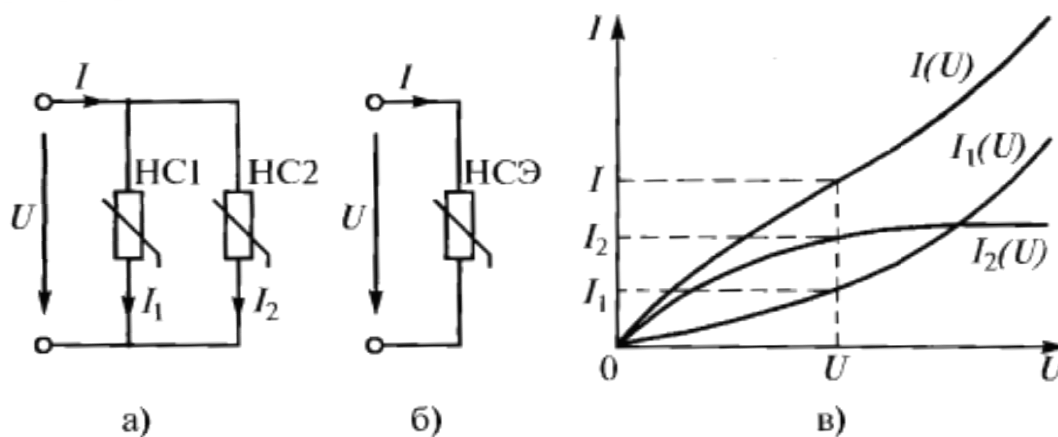


Рис. 2.3. Схема участка цепи с параллельно включенными нелинейными сопротивлениями (а), эквивалентное сопротивление (б) и их ВАХ (в)

Суммируя ординаты характеристик элементов, т.е. токи, получаем зависимость между током  $i$  на зажимах схемы и напряжением  $u$  на ее зажимах (рис.2.3, в). Располагая этой ВАХ, уже можно находить значения тока на входе и частичных токов при любом заданном напряжении на зажимах схемы и наоборот: можно находить значения напряжения на входе и частичных токов при любом заданном токе на входе схемы. Этот алгоритм получения суммарной ВАХ может быть распространен на любое число параллельно включенных нелинейных и линейных сопротивлений.

### 2.2.3. Определение рабочей точки нелинейного резистивного элемента

Одна из задач анализа нелинейной цепи постоянного тока сводится к определению рабочей точки нелинейного сопротивления, т.е. к определению тока и напряжения на зажимах этого сопротивления, соответствующих заданному значению ЭДС или тока независимых источников. Эту задачу удобнее решать графическим методом.

Рассмотрим простую цепь, состоящую из идеального источника ЭДС и двух последовательно включенных сопротивлений, одно из которых является линейным, а другое – нелинейным с заданной ВАХ (рис.2.4).

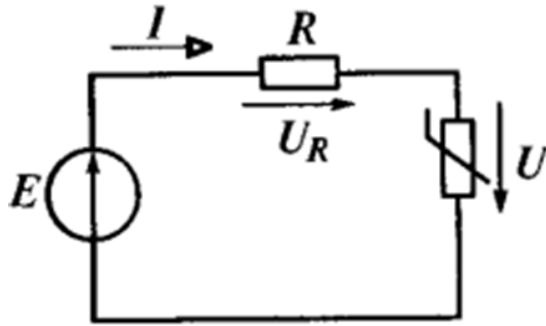


Рис. 2.4. Схема цепи для определения рабочей точки

Запишем уравнение для напряжений:

$$RI + U = E \quad \text{или} \quad I = -\frac{U}{R} + \frac{E}{R}.$$

Полученному выражению соответствует прямая линии ( $y = kx + b$ ), называемая *нагрузочной характеристикой*. Таким образом, с одной стороны напряжение и ток НС связаны ВАХ, а с другой – уравнением прямой линии. Естественно, рабочая точка цепи находится в месте пересечения ВАХ и нагрузочной характеристики. Эту прямую можно провести через две точки, расположенные на осях координат.

При значении напряжения на нелинейном сопротивлении  $U = 0$ , что соответствует режиму КЗ нелинейного элемента, в схеме протекает ток короткого замыкания, равный  $I_k = \frac{E}{R}$ . Эта точка находится на оси токов.

При значении тока  $I = 0$ , что соответствует режиму ХХ схемы, напряжение на нелинейном элементе равно ЭДС, т.е.  $U = E$ . Эта точка находится на оси напряжений. Искомые значения тока в схеме и напряжения на нелинейном элементе определяются координатами точки пересечения ВАХ и нагрузочной прямой:  $I = I_A$  и  $U = U_A$  (рис.2.5). Точка пересечения называется *рабочей точкой цепи*.

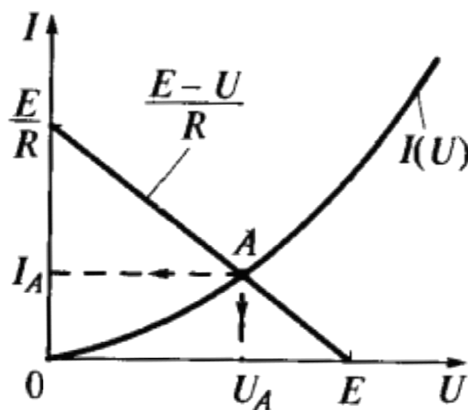


Рис. 2.5. Нахождение координат рабочей точки цепи

#### 2.2.4. Преобразования активных нелинейных резистивных двухполюсников

Если последовательно с НЭ включен источник постоянной ЭДС, то ВАХ участка цепи с этим НЭ и источником получается сдвижением характеристики НЭ влево на значение ЭДС источника, если направление ЭДС совпадает с током, и вправо, если не совпадает (рис.2.6). Этот вывод следует из уравнения, записанного для каждой схемы, по второму закону Кирхгофа.

Для первого случая:

$$U_1 - U = E \quad \text{или} \quad U = U_1 - E.$$

Для второго случая:

$$U_1 - U = -E \quad \text{или} \quad U = U_1 + E.$$

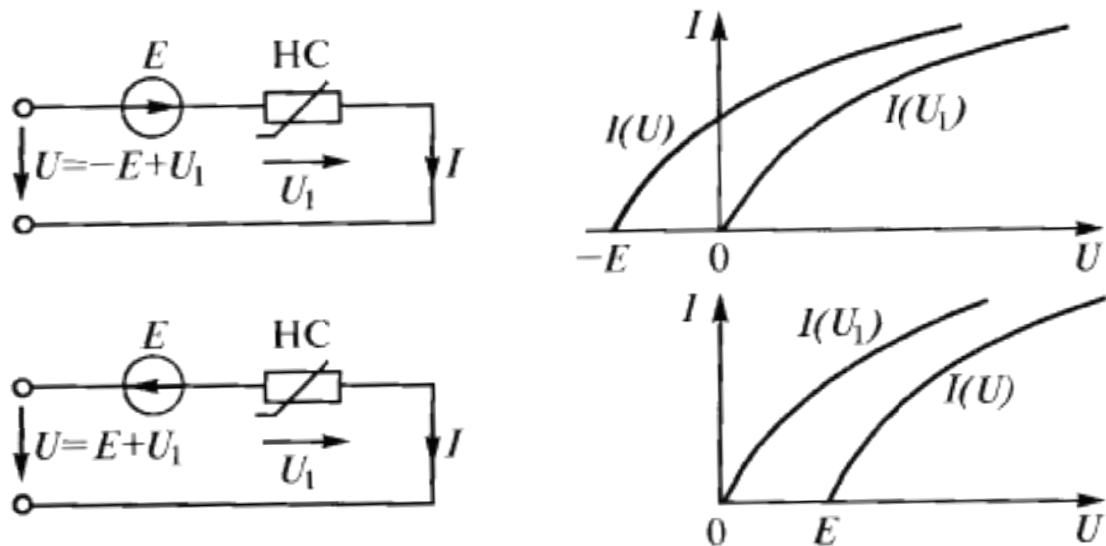


Рис. 2.6. ВАХ НС с источником ЭДС

Если параллельно с НЭ включен источник постоянного тока, то ВАХ участка цепи, содержащего НЭ и источник, получается сдвижением характеристики НЭ вверх на значение тока источника, если его направление совпадает с напряжением, и вниз, если не совпадает (рис.2.7). Этот вывод следует из уравнения, записанного для каждой схемы, по первому закону Кирхгофа.

Рассмотрим участок цепи с параллельно включенными источником постоянного тока  $J$  и нелинейным сопротивлением  $R$  с известной ВАХ (рис.2.7). Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I_n + J = I.$$

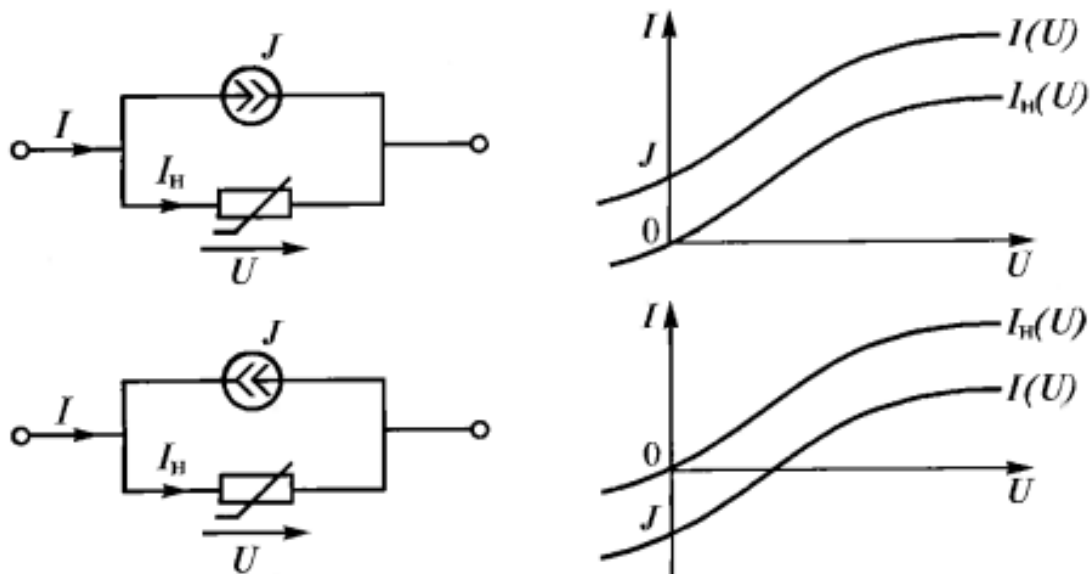


Рис. 2.7. ВАХ НС с источником тока

Из этого выражения следует, что ВАХ участка цепи может быть получена путем смещения ВАХ нелинейного элемента вверх на величину  $J$  по ординате на оси токов. Если ток  $J$  направлен наоборот, то ВАХ нужно сместить вниз на величину  $J$ .

### 2.3. Определение реакции нелинейного элемента на гармоническое воздействие

Пусть зависимость  $y(x)$  – ВАХ некоторого нелинейного элемента (рис.2.8), причем  $x$  – внешнее воздействие, а  $y$  – реакция НЭ на это воздействие. Пусть внешнее воздействие изменяется по гармоническому закону с амплитудой  $X_m$  и угловой частотой  $\omega$ :  $x(t) = X_m \sin \omega t$ . График  $x(t)$  расположен в нижней части рисунка так, чтобы оси  $x(t)$  и  $x$  были параллельны, а ось времени – направлена вниз. Зависимость  $y = y(t)$  построим в правой части рисунка так, чтобы ось времени была направлена вправо, а ось  $y(t)$  расположена параллельно оси  $y$  ВАХ. Теперь нужно выполнить следующие построения: для момента времени  $t_1$  по графику  $x(t)$  найти мгновенное значение внешнего воздействия  $x(t_1)$ , затем по ВАХ определить соответствующее значение реакции  $y(t_1)$  и построить точку с ординатой  $y(t_1)$  на графике  $y = y(t)$ . Перемещаясь с шагом  $T/8$ , что соответствует углу в  $45^\circ$  (если по осям времени отложена величина  $\omega t$ ), получим достаточное количество точек для построения графика реакции цепи на заданное внешнее воздействие. Как видно из рисунка, реакция не является синусоидальной функцией времени, даже на гармоническое воздействие.



Это объясняется нелинейностью ВАХ нелинейного элемента. Так как ВАХ находится в I и III квадрантах, то реакция цепи имеет как положительные, так и отрицательные мгновенные значения.

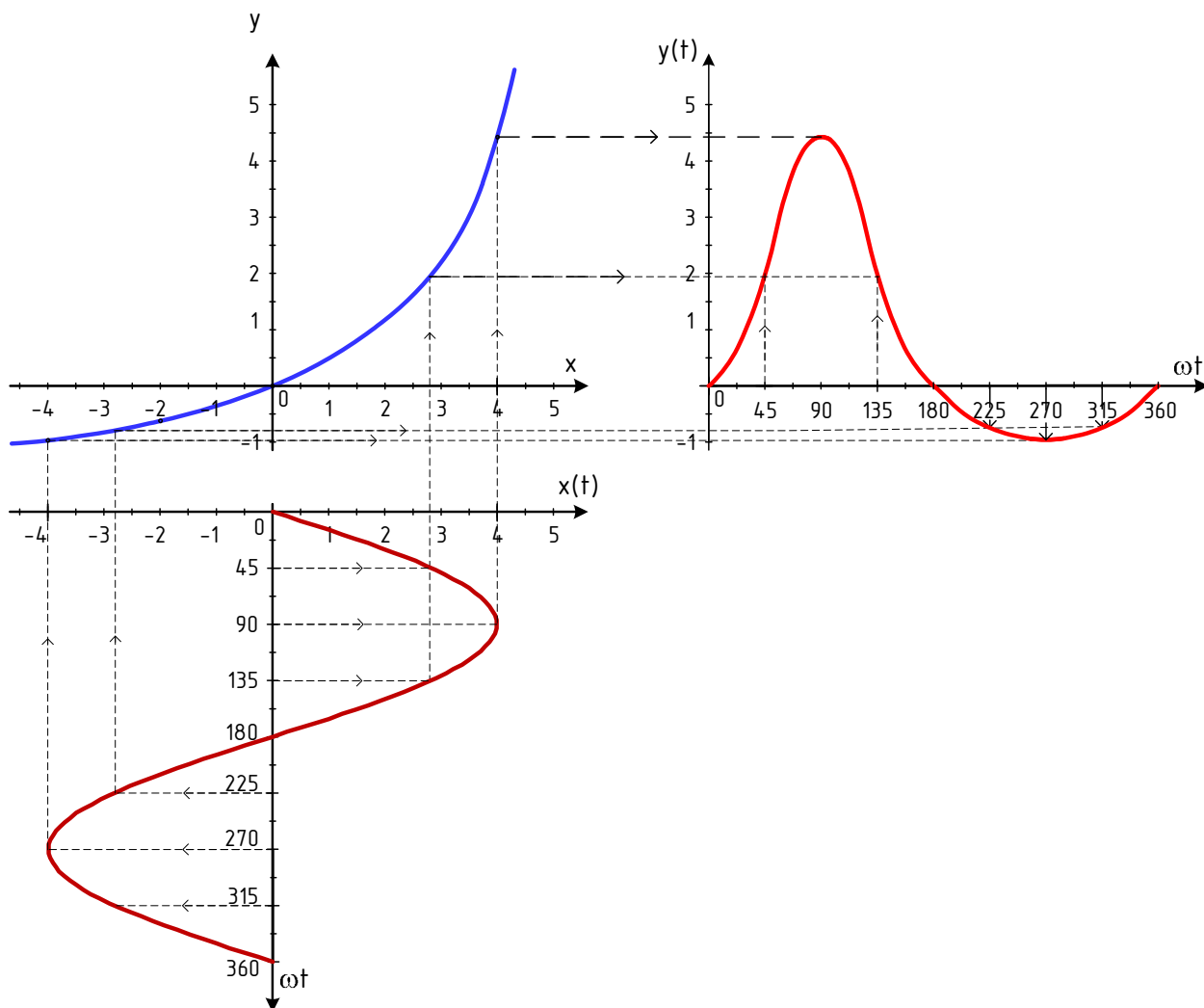


Рис. 2.8. Определение реакции НЭ на гармоническое воздействие

Для избавления от отрицательных значений график  $y = y(t)$  нужно его поднять вверх, т.е. сместить вправо рабочую точку на ВАХ. С этой целью к зажимам НЭ наряду с источником гармонического воздействия прикладывают некоторое постоянное напряжение  $U_0$  (если входным воздействием является напряжение), называемое *напряжением смещения*, рис.2.9. При этом напряжение смещения должно быть больше амплитуды напряжения источника:  $U_0 > U_m$ .

Запишем для контура, состоящего из стрелок напряжений, уравнение по второму закону Кирхгофа (рис.2.10):

$$u_{\text{ex}} - u - U_0 = 0,$$

откуда  $u_{\text{ex}} = u + U_0$ .

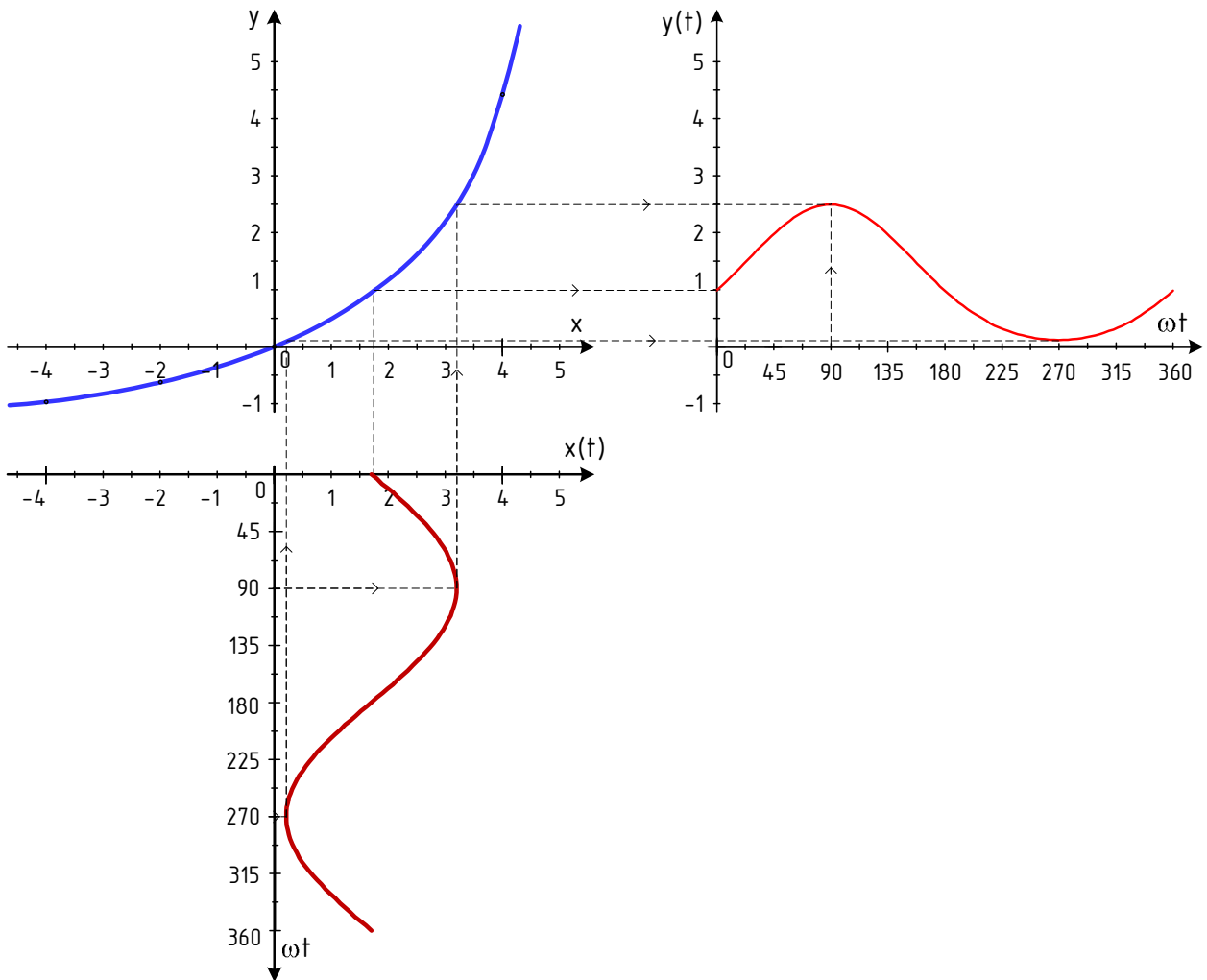


Рис. 2.9. Определение реакции НЭ на гармоническое воздействие с постоянной составляющей

Этому уравнению и соответствует схема на рисунке 2.10.

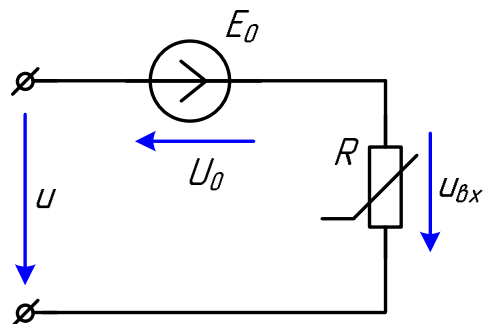


Рис. 2.10. Схема активного двухполюсника под действием переменного напряжения

Таким образом, к НЭ приложено напряжение

$$u_{вх} = U_0 + U_m \sin \omega t .$$

Если амплитуда переменной составляющей напряжения  $U_m = 0$ , то через сопротивление течет постоянный ток  $I_{\Pi}$ , называемый током покоя. Напряжение смещения и ток покоя позволяют определить статическое сопротивление, т.е. сопротивление НЭ постоянному току в выбранной рабочей точке:

$$R_{ст} = \frac{U_0}{I_{\Pi}}.$$

При определении реакции НЭ нужно рассматривать два режима – режим малого сигнала и режим большого сигнала. В *режиме малого сигнала* амплитуда переменной составляющей входного напряжения НЭ настолько мала, что ВАХ в пределах рабочей точки может быть приближенно заменена отрезком прямой линии. В этом случае ток в НЭ является синусоидальной функцией времени с постоянной составляющей, равной току покоя. Следовательно, в режиме малого сигнала НЭ ведет себя как линейный элемент, а нелинейность его проявляется только в том, что значения статического и динамического сопротивлений зависят от выбора рабочей точки.

В *режиме большого сигнала* амплитуда переменной составляющей велика, так что ВАХ в пределах рабочей точки не может быть приближенно заменена отрезком прямой. В этом случае ток в НЭ является периодической несинусоидальной функцией времени с постоянно составляющей, не равной току покоя, так как постоянная составляющая – это среднее значение функции за период. Эта кривая тока может быть разложена в ряд Фурье.

#### 2.4. Разложение несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье

Как известно, ряд Фурье для периодической функции, например, для напряжения, с периодом  $2\pi$ , отвечающей условиям Дирихле, записывается в виде суммы бесконечно большого числа слагаемых:

$$\begin{aligned} u(\omega t) &= U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots = \\ &= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_k). \end{aligned}$$

Такую запись будем называть *первой формой ряда Фурье*.

Первый член ряда  $U_0$  называется *постоянной составляющей* или *нулевой гармоникой*, второй член  $U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$  называется *основной гармонической* или *первой гармоникой*, а все остальные члены вида

$U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$  при  $k > 1$  носят название *высших гармоник*. Период несинусоидальной кривой  $T$  определяет *основную угловую частоту*  $\omega = 2\pi/T$ .

Постоянная составляющая ряда – это среднее значение функции за период:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t).$$

Таким образом, для  $U_0$  имеется формула, а для амплитуд  $U_{km}$  и начальных фаз  $\psi_k$  отдельных гармоник формул нет. Для нахождения этих величин нужна другая форма ряда, которую мы назовем *второй формой ряда Фурье*. Эту форму можно получить, если воспользоваться формулой синуса суммы двух углов:

$$\begin{aligned} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) &= U_{km} \cos \psi_k \sin k\omega t + U_{km} \sin \psi_k \cos k\omega t = \\ &= B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t. \end{aligned}$$

Здесь  $B_{km} = U_{km} \cos \psi_k$  и  $C_{km} = U_{km} \sin \psi_k$  – амплитуды синусных и косинусных составляющих второй формы записи ряда Фурье.

В результате указанного разложения получим ряд, содержащий синусные и косинусные составляющие отдельных гармоник:

$$\begin{aligned} u(\omega t) &= U_0 + B_{1m} \sin \omega t + C_{1m} \cos \omega t + \dots + B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t + \dots = \\ &= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t). \end{aligned}$$

Амплитуды синусных и косинусных составляющих определяются по формулам:

$$B_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t); \quad C_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t).$$

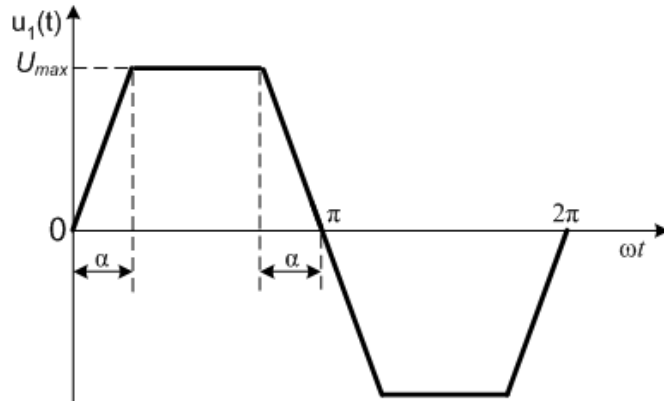
По амплитудам синусной и косинусной составляющих  $k$ -ой гармоники определяются амплитуда и начальная фаза  $k$ -ой гармоники с помощью определения комплексной амплитуды:

$$\dot{U}_{km} = B_{km} + jC_{km} = U_{km} e^{j\psi_k}.$$

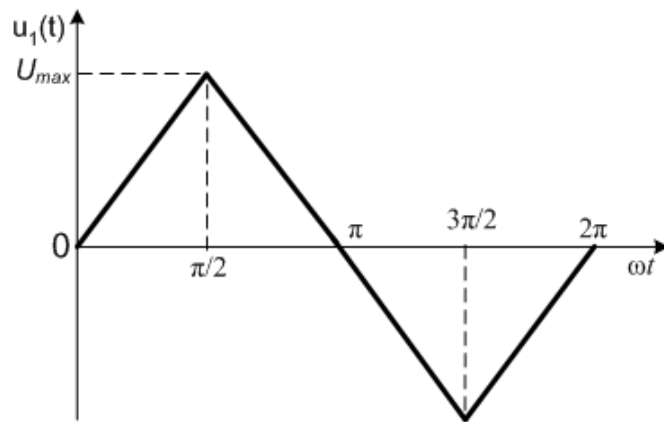
Т.к. модулем комплексной амплитуды напряжения является его амплитуда, а аргументом – начальная фаза, то теперь можно записать  $k$ -ю гармонику:

$$u_k = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

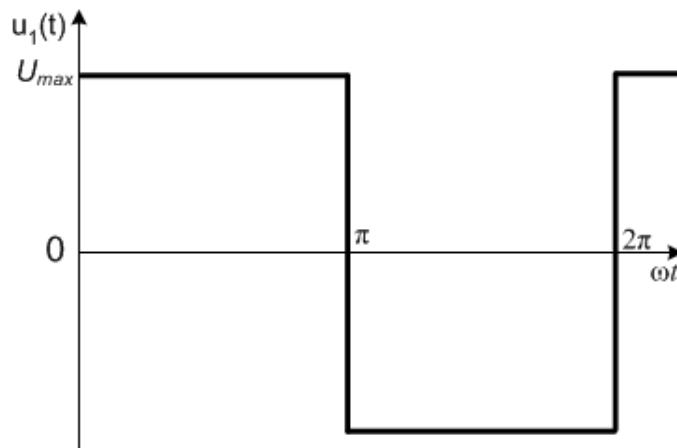
Имеются несколько геометрически правильных кривых с известными рядами Фурье. Приведем некоторые из них (рис.2.11):



$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\alpha\pi} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right)$$



$$u(\omega t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t \dots \right)$$



$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t \dots \right)$$

Рис. 2.11. Геометрически правильные кривые и их ряды Фурье

Напряжение на выходе однополупериодного выпрямителя с идеальными диодами раскладывается в ряд Фурье

$$u(\omega t) = \frac{2U_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right].$$

Напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя с идеальными диодами раскладывается в ряд Фурье:

$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right].$$

**Пример 2.1.** Максимальное значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя  $U_m = 300$  В. Построить график выходного напряжения, учитывая первые три (нулевую, вторую и четвертую) гармоники.

Решение. Запишем ряд Фурье с указанным числом гармоник:

$$\begin{aligned} u(\omega t) &= \frac{2U_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t \right] = \\ &= \frac{2 \cdot 300}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t \right] = \\ &= 95,5 + 150 \cos \omega t + 63,7 \cos 2\omega t - 12,7 \cos 4\omega t = \\ &= 95,5 + 150 \sin(\omega t + 90^\circ) + 63,7 \sin(2\omega t + 90^\circ) + 12,7 \sin(4\omega t - 90^\circ) \text{ В.} \end{aligned}$$

Построим в программе Mathcad график напряжения (рис.2.12).

$$\begin{aligned} U_m &:= 300 & A &:= \frac{2 \cdot U_m}{\pi} \\ U_0 &:= A \cdot \frac{1}{2} & U_{m1} &:= A \cdot \frac{\pi}{4} & U_{m2} &:= A \cdot \frac{1}{3} & U_{m4} &:= A \cdot \frac{1}{15} \\ U_0 &= 95.5 & U_{m1} &= 150.0 & U_{m2} &= 63.7 & U_{m4} &= 12.7 \\ u(\theta) &:= U_0 + U_{m1} \cos(\theta) + U_{m2} \cos(2 \cdot \theta) - U_{m4} \cos(4 \cdot \theta) \\ u(\theta) &\text{ float, 3} \rightarrow 95.4 + 150 \cdot \cos(\theta) + 63.6 \cos(2 \cdot \theta) - 12.7 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \\ \theta &:= 0, \frac{\pi}{100} .. 6 \cdot \pi \end{aligned}$$

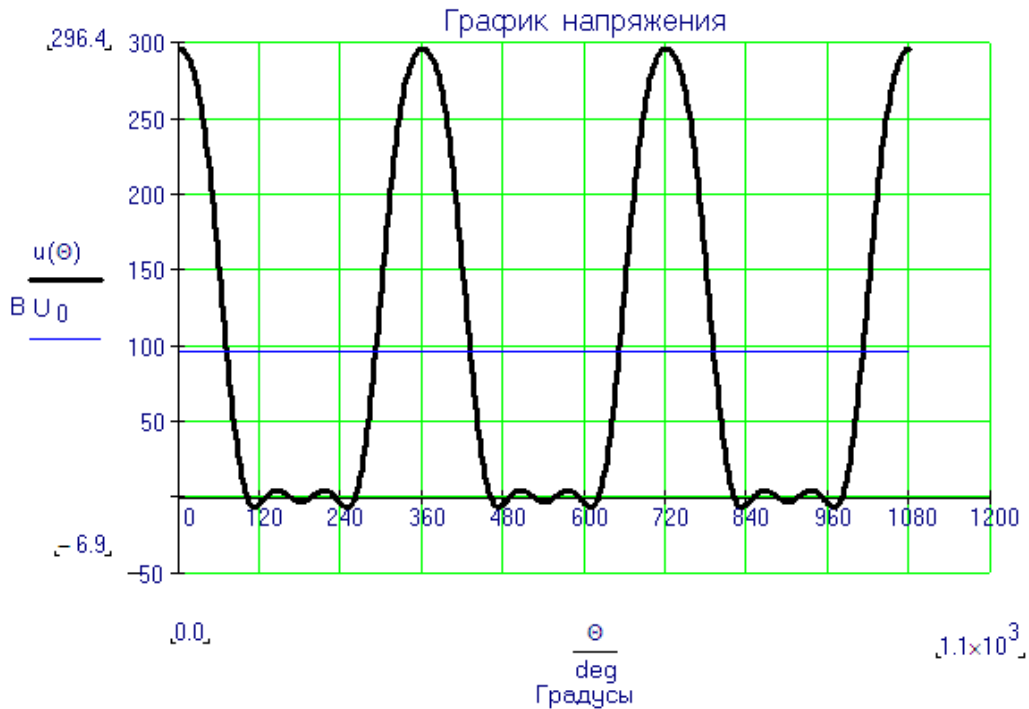


Рис. 2.12. Кривая напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя с максимальным значением  $U_m = 300 \text{ В}$

Действующее значение напряжения определяется как корень квадратный из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений отдельных гармоник. Действующее значение синусоиды меньше ее амплитуды в  $\sqrt{2}$ :

$$U_1 := \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} \quad U_2 := \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} \quad U_4 := \frac{U_{m4}}{\sqrt{2}}$$

$$U_1 = 106.1 \quad U_2 = 45.0 \quad U_4 = 9.0$$

$$U := \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_4^2} \quad U = 149.9$$

Соберем схему в программе Multisim, используя источники ЭДС, напряжения на зажимах которых представляют собой соответствующие гармоники (рис. 2.13).

Особенностью программы Multisim является то, что вольтметр и амперметр переменных напряжения и тока (AC – alternating current) показывают действующие значения этих величин без постоянной составляющих. Поэтому показание вольтметра равно:

$$U := \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_4^2} \quad U = 115.6$$

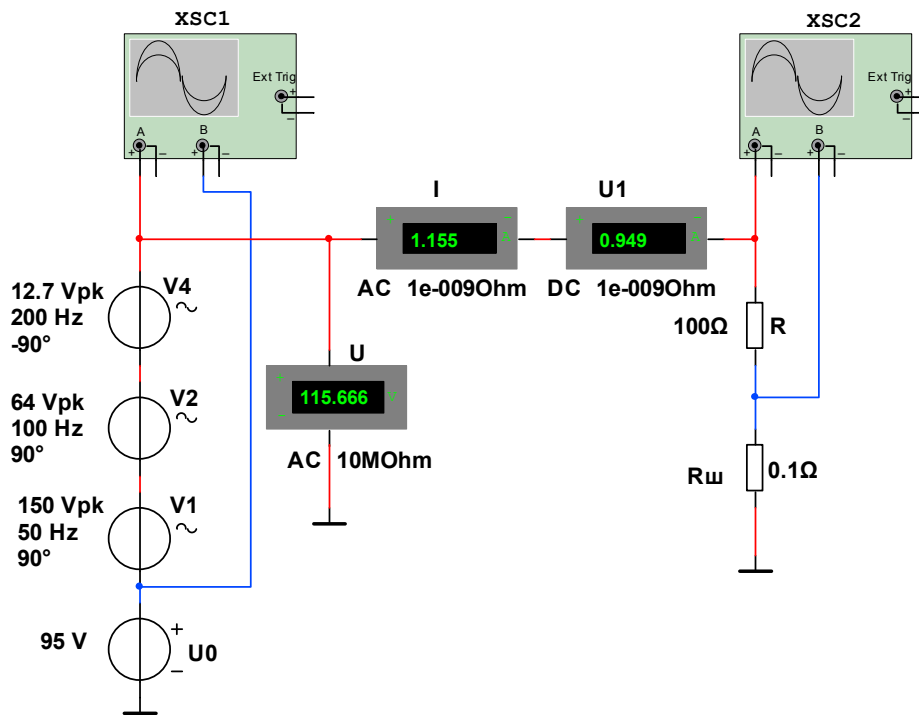


Рис. 2.13. Схема для получения однополупериодного напряжения

Для измерения постоянной составляющей нужен прибор постоянного тока (DC – direct current).

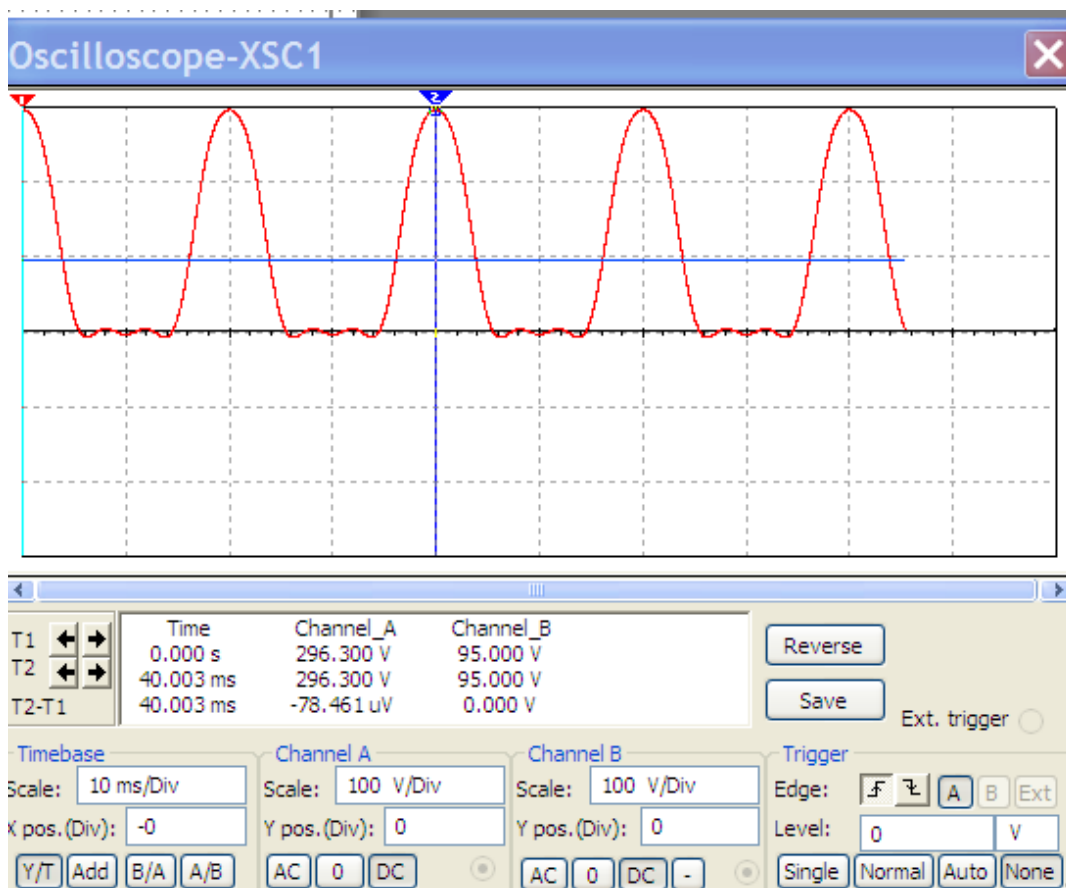


Рис. 2.14. График входного напряжения без постоянной составляющей.



Осью абсцисс является синяя линия на высоте  $U_0 = 95 \text{ В}$  относительно общей оси абсцисс

Студентам нужно обосновать показания приборов в приведенной выше схеме с одним резистором. Сопротивление шунта  $R_{\text{ш}}$  используется для получения формы кривой тока, так как ток на резисторе, согласно формулы  $i(t) = \frac{u(t)}{R} = Gu(t)$ , повторяет по форме напряжение на нем.

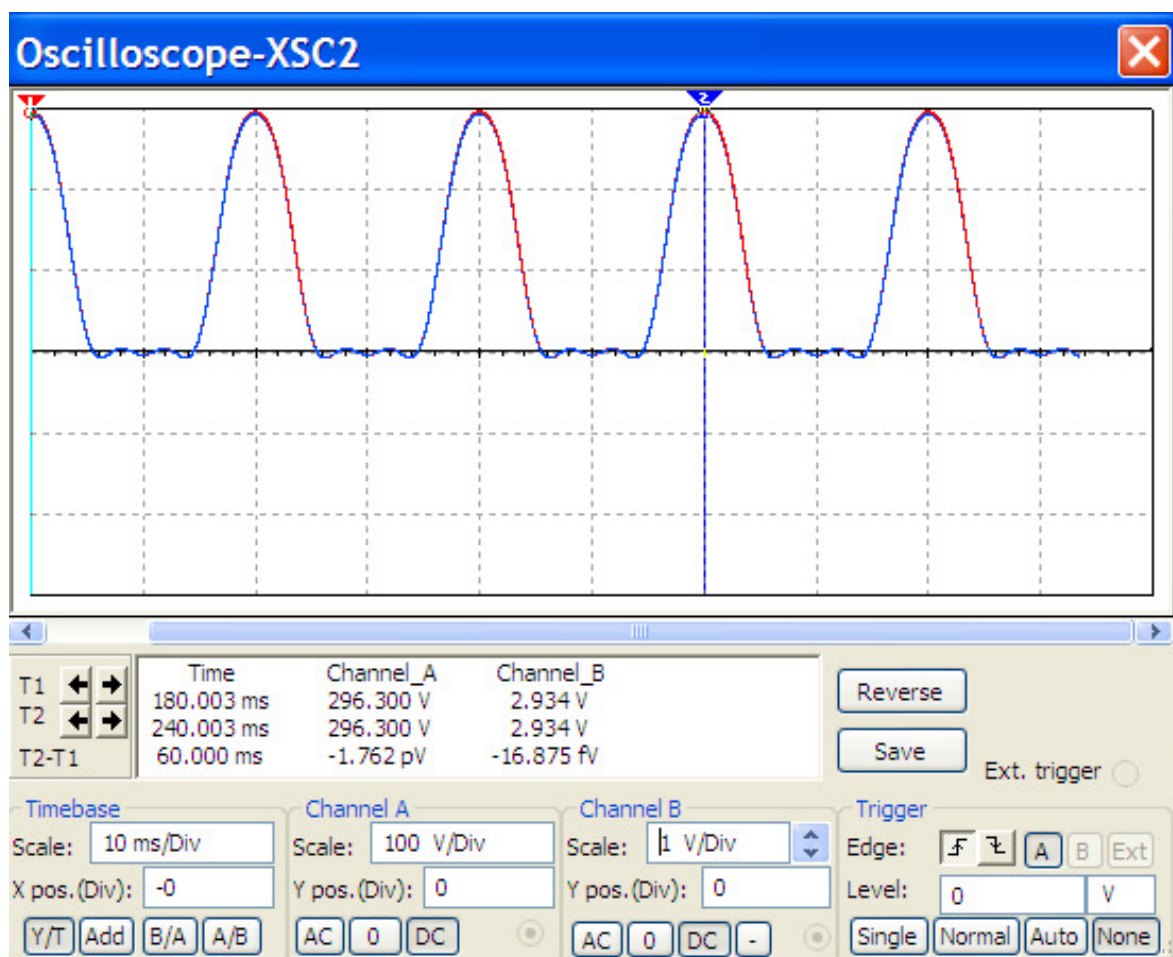


Рис. 2.15. График выходного напряжения с постоянной составляющей, благодаря наличию которой напряжение носит пульсирующий характер, т.е. не имеет отрицательных значений

### **Пример выполнения лабораторной работы.**

**Задание.** Электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных диода 1N4001 (нелинейное сопротивление) и линейного резистора с сопротивлением  $R$ , подключена к источнику постоянной ЭДС (рис.2.16).

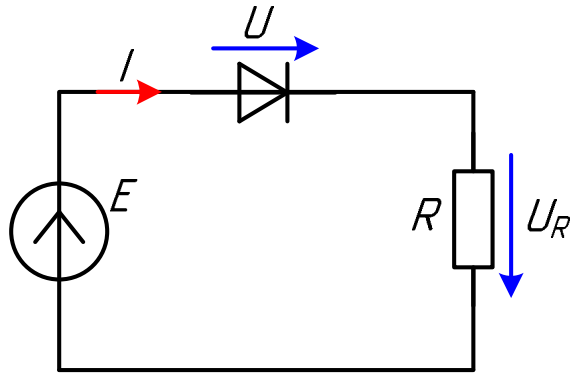


Рис. 2.16. Электрическая цепь с нелинейным элементом (диодом)

Провести следующий объем работ.

а). Снять ВАХ диода с помощью прибора **IV analyzer**.

б). Определить графоаналитическим методом ток в цепи для каждого из четырех случаев:

1). ЭДС  $E = 0,8$  В; сопротивление  $R = 10$  Ом.

2). ЭДС  $E = 0,8$  В; сопротивление  $R = 5$  Ом.

3). ЭДС  $E = 1,0$  В; сопротивление  $R = 10$  Ом.

4). ЭДС  $E = 1,0$  В; сопротивление  $R = 5$  Ом.

с). Провести имитационное моделирование цепи в программе Multisim и результаты расчета и моделирования свести в таблицу.

**Выполнение задания.** Используем прибор **IV analyzer** и снимаем ВАХ диода (рис.2.17). На рисунке 2.18 приведено окно для определения начального (**start**) и конечного (**stop**) значений подаваемого на диод напряжения.

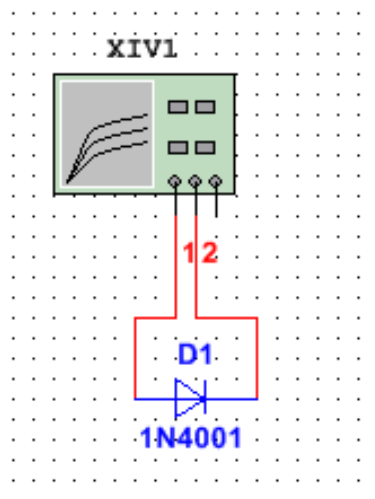


Рис. 2.17. Схема для снятия ВАХ диода

На рисунке 2.19 показано окно для определения с помощью курсора координат одной из точек.

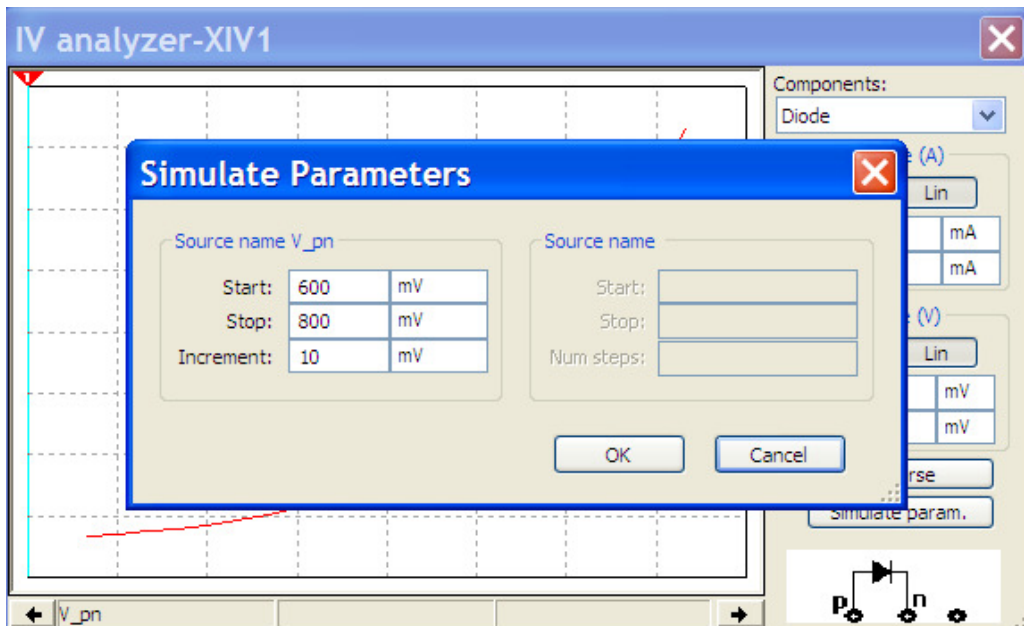


Рис. 2.18. Окно для определения моделируемых параметров

Координаты выбранной точки указаны в нижней строке ( $U = 700,597 \approx 701$  mV;  $I = 23,919 \approx 23,9$  mA). Определив координаты нескольких точек, их значения сводим в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

<b><i>I, mA</i></b>	<b><i>7,6</i></b>	<b><i>13</i></b>	<b><i>24</i></b>	<b><i>36</i></b>	<b><i>60</i></b>	<b><i>80</i></b>	<b><i>100</i></b>	<b><i>141</i></b>
<b><i>U, V</i></b>	<b><i>0,64</i></b>	<b><i>0,67</i></b>	<b><i>0,70</i></b>	<b><i>0,722</i></b>	<b><i>0,75</i></b>	<b><i>0,766</i></b>	<b><i>0,77</i></b>	<b><i>0,80</i></b>

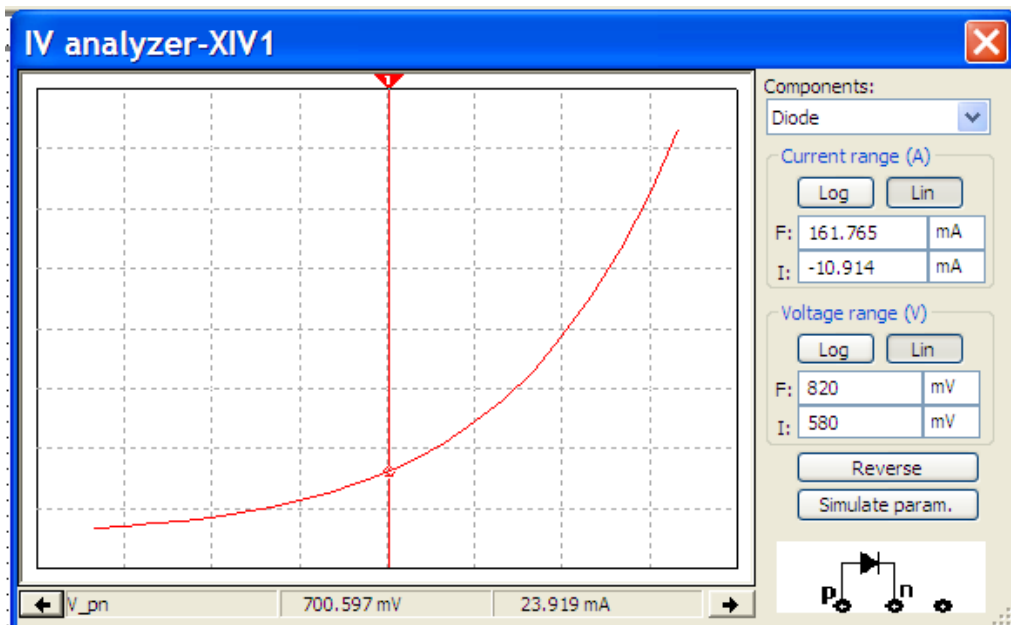


Рис. 2.19. Окно для определения координат выбранной точки

Определяем ток короткого замыкания для каждого случая.

$$1). E = 0,8 \text{ В}; R = 10 \text{ Ом}; I_{к1} = \frac{E}{R} = \frac{0,8}{10} = 0,08 \text{ А} = 80 \text{ мА};$$

$$2). E = 0,8 \text{ В}; R = 5 \text{ Ом}; I_{к2} = \frac{E}{R} = \frac{0,8}{5} = 0,16 \text{ А} = 160 \text{ мА};$$

$$3). E = 1,0 \text{ В}; R = 10 \text{ Ом}; I_{к3} = \frac{E}{R} = \frac{1,0}{10} = 0,1 \text{ А} = 100 \text{ мА};$$

$$4). E = 1,0 \text{ В}; R = 5 \text{ Ом}; I_{к4} = \frac{E}{R} = \frac{1,0}{5} = 0,2 \text{ А} = 200 \text{ мА}.$$

Используя полученные данные, т.е. значения ЭДС и тока короткого замыкания, проводим четыре нагрузочные характеристики, т.е. четыре прямых линии (рис. 2.20).

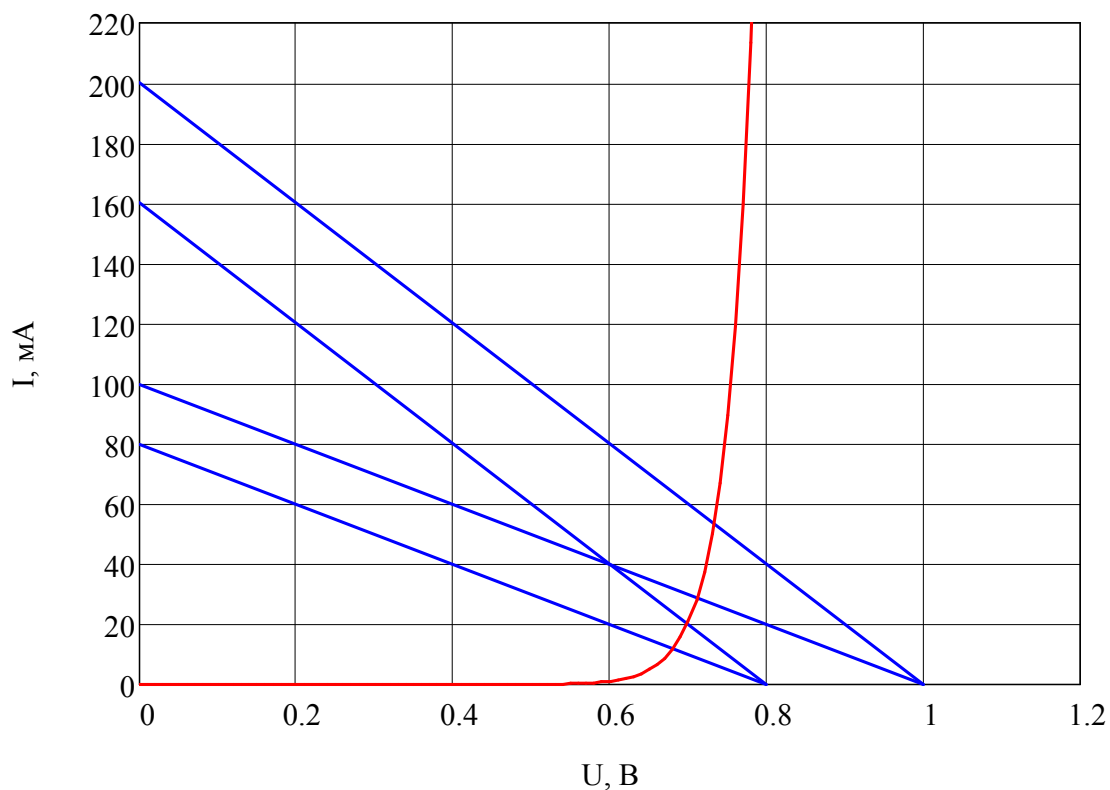


Рис. 2.20. Графический способ определения рабочей точки

В точках пересечения этих линий с ВАХ диода (точках покоя) получаем четыре рабочих точки цепи со следующими координатами:

$$П1: I_1 = 13 \text{ мА}; U_1 = 0,67 \text{ В}; \quad П2: I_2 = 21 \text{ мА}; U_2 = 0,69 \text{ В};$$

$$П3: I_3 = 29 \text{ мА}; U_4 = 0,71 \text{ В}; \quad П4: I_4 = 52 \text{ мА}; U_4 = 0,74 \text{ В}.$$

Эти значения будем называть *расчетными данными*. Значения, полученные экспериментальным методом, в данном случае с помощью имитационного моделирования, будем называть *опытными данными*. Далее

проводим четыре опыта имитационного моделирования, устанавливая соответствующие значения ЭДС источника и сопротивления резистора.

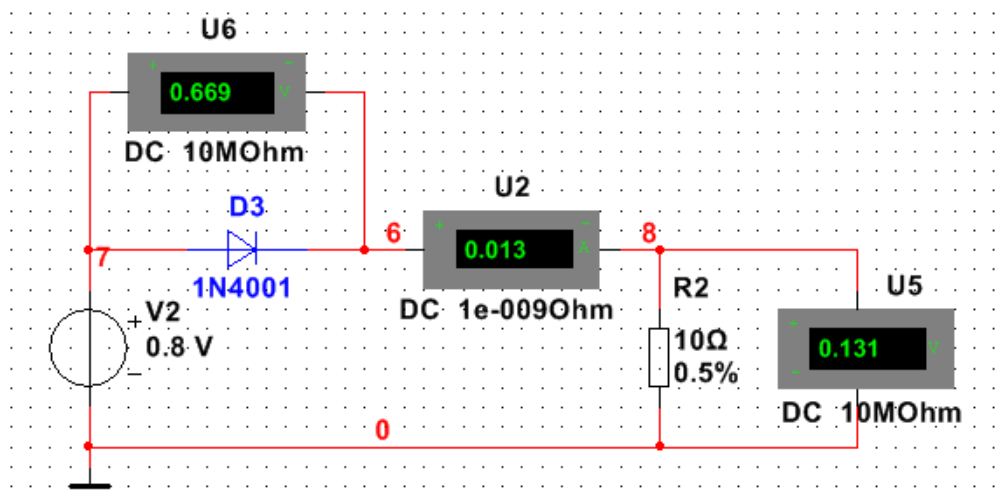


Рис. 2.21. Схема опыта №1

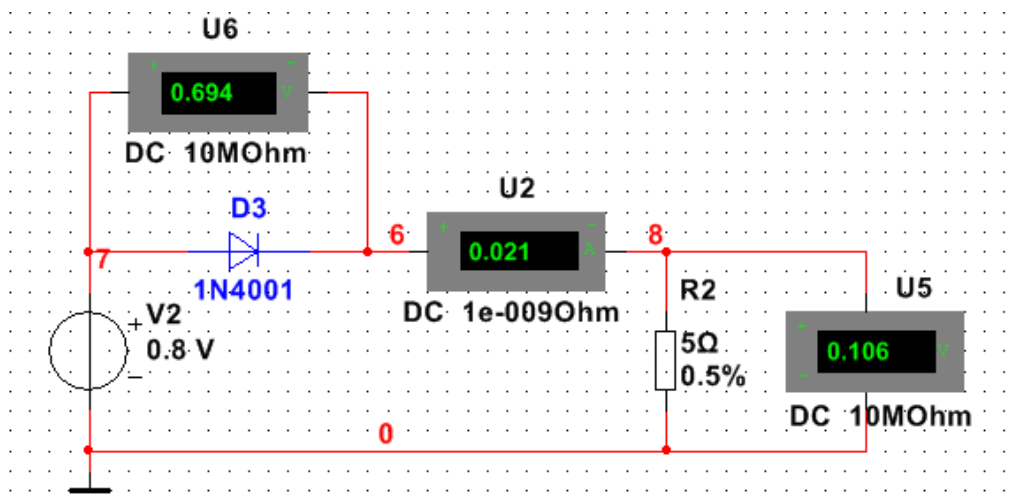


Рис. 2.22. Схема опыта №2

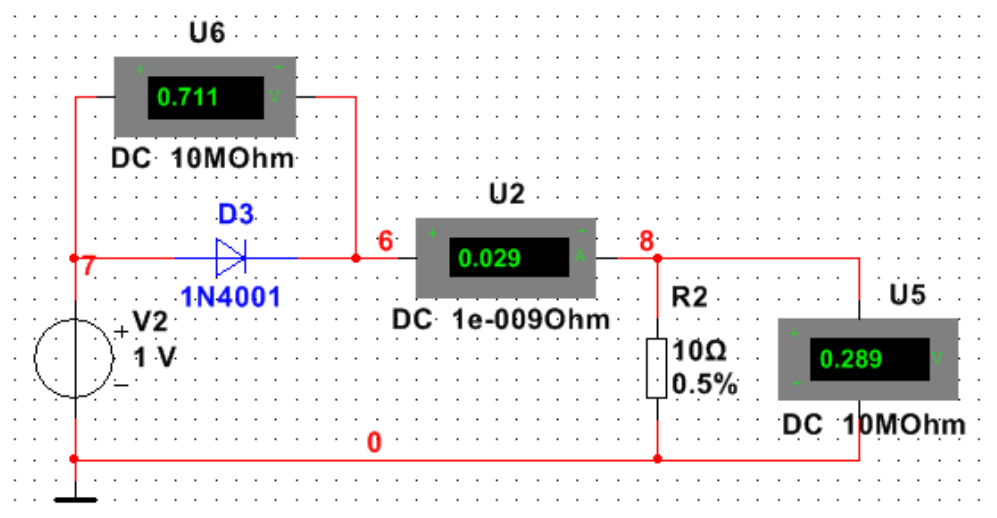


Рис. 2.23. Схема опыта №3

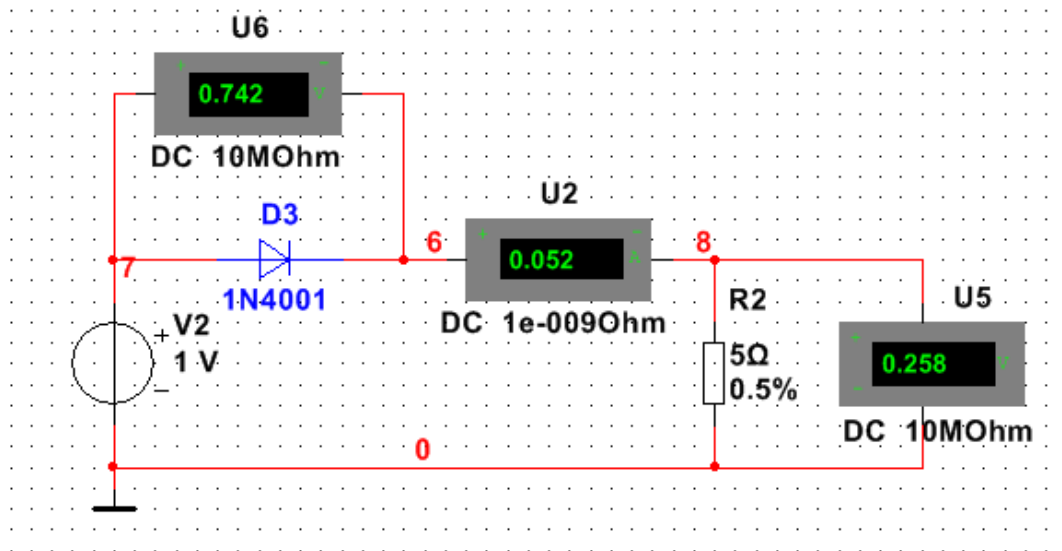


Рис. 2.24. Схема опыта №4

Подготовим таблицу и внесем в нее данные расчета и данные эксперимента. В таблице 2.2 напряжения указаны в вольтах (В), токи – в миллиамперах (мА).

Таблица 2.2.

Величины	$U_1$	$I_1$	$U_2$	$I_2$	$U_3$	$I_3$	$U_4$	$I_4$
Расчет	0,67	13	0,69	21	0,71	29	0,74	52
Опыт	0,669	13	0,694	21	0,711	29	0,741	52

**Вывод.** Расчетные данные практически совпадают с расчетными. Небольшое отличие объясняется недостатком графоаналитических методов – их невысокой точностью.

## 2.5. Подготовка и выполнение работы

Электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных диода 1N3900 (нелинейное сопротивление) и линейного резистора с сопротивлением  $R$ , подключена к источнику постоянной ЭДС (рис. 2.16).

Провести следующий объем работ.

а). Снять ВАХ диода с помощью прибора **IV analyzer** (6–7 точек). Установить **start** = 700 мВ, **stop** = 850 мВ и **increment** = 10 мВ.

б). Определить графо-аналитическим методом ток в цепи для каждого из четырех случаев:

- 1). ЭДС  $E = 0,8$  В; сопротивление  $R = 0,8$  Ом.
- 2). ЭДС  $E = 0,8$  В; сопротивление  $R = 0,5$  Ом.
- 3). ЭДС  $E = 1,0$  В; сопротивление  $R = 1$  Ом.
- 4). ЭДС  $E = 1,0$  В; сопротивление  $R = 0,625$  Ом.

с). Провести имитационное моделирование цепи в программе Multi-sim, результаты расчета и моделирования свести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3.

Величины	$U_1$	$I_1$	$U_2$	$I_2$	$U_3$	$I_3$	$U_4$	$I_4$
Расчет								
Опыт								

## 2.6. Контрольные вопросы

1. В чем отличие линейного резистивного элемента от нелинейного?
2. Значения тока и напряжения на нелинейном элементе цепи с последовательным соединением линейного и нелинейного резистивных элементов определяют ее рабочую точку на ВАХ нелинейного элемента. Как найти положение рабочей точки?
3. Положение рабочей точки цепи можно изменять. Какие существуют способы для этой цели?
4. Почему реакция НЭ на гармоническое воздействие (ток при заданном напряжении или напряжение при заданном токе) является периодической функцией времени? Как графическим путем найти эту реакцию?
5. Периодическую несинусоидальную функцию времени можно записать в виде ряда Фурье. Как называются слагаемые этого ряда, записанного в первой форме?
6. Для нелинейного элемента используются два режима работы – режим малого сигнала и режим большого сигнала. Чем отличаются эти режимы друг от друга, и какой из них предпочтительнее?
7. Какой вид имеет напряжение на линейном резисторе в цепи с последовательным включением полупроводникового диода и линейного резистора при наличии на входе цепи гармонического напряжения?

### 3. ЛР № 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ

**Цель работы:** освоение программы Multisim для целей получения ВАХ полупроводниковых диодов и стабилитронов и исследования электрических схем для выпрямления синусоидального напряжения и его стабилизации.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

##### 3.1. Введение в физику полупроводников

Полупроводниковые приборы являются основными компонентами электронных, электрических и мехатронных систем. Они могут использоваться для разработки бесчисленных задач в телекоммуникационных системах, промышленном управлении процессами, развлекательных системах, бытовой технике, спутниковом управлении и многих других. В этой работе мы будем изучать такие полупроводниковые приборы, как диоды, биполярные транзисторы (BJT – *Bipolar Junction Transistor*) и полевые транзисторы (FET – *Field-Effect-Transistors*). Хотя существует больше типов полупроводниковых приборов, упомянутые здесь, безусловно, наиболее широко используются в современной электронике. В целом, за исключением диодов, большинство полупроводниковых приборов известны как активные элементы. С другой стороны, резисторы, конденсаторы и индуктивные катушки являются пассивными элементами электрических и электронных цепей.

##### 3.1.1. Беспримесные полупроводники

##### Энергетическая диаграмма кристалла

По своим электрическим свойствам (по электропроводности) твердые вещества можно разделить на три класса: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики (изоляторы). Класс, в который попадает тот или иной материал, зависит от поведения электронов на внешней орбите атома. Число этих электронов определяет валентность вещества. Так, кремний и германий, относящиеся к классу полупроводников, являются четырехвалентными, т.к. на внешней орбите их атомов находятся по четыре электрона. Для изучения принципа действия ПП приборов, их параметров и характеристик важно понимать физическую сущность электропроводности.

В соответствии с принципами квантовой механики, или согласно постулатам Бора, энергия электрона в изолированном атоме может принимать строго дискретные значения (также говорят, что электрон находится



на одной из орбиталей), т.е. электрон в атоме может находиться только на определенном (разрешенном) энергетическом уровне (рис. 3.1, а).

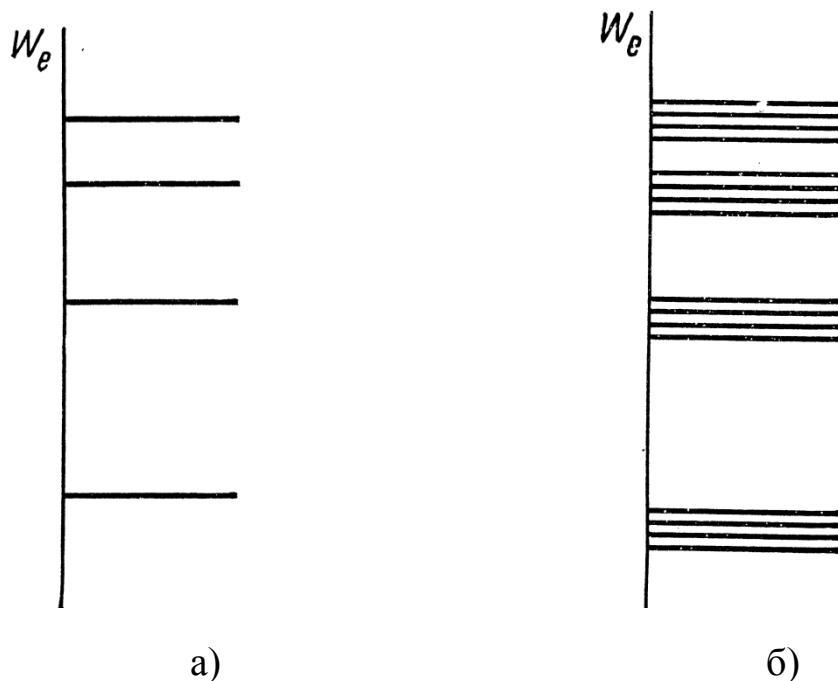


Рис. 3.1. Энергетические диаграммы атомов

а – энергетическая диаграмма изолированного атома; б – энергетическая диаграмма группы (четырех) близко расположенных атомов

Электроны низших уровней сильно связаны с атомом. По мере увеличения энергии уровня, занимаемого электроном, эта связь ослабевает. При наличии внешних воздействий (тепловые кванты – фононы, кванты света – фотоны, электрическое или магнитное поле) электроны атома приобретают дополнительную энергию и переходят на более высокие энергетические уровни (*возбуждение* атома) или вовсе освобождаются от атома и становятся свободными, не связанными с атомом (*ионизация* атома: если электрон покидает валентную зону, то атом становится положительным ионом). При этом внешнему воздействию подвержены электроны высоких энергетических уровней, слабее связанные с атомом.

Согласно квантовой теории, энергетическая диаграмма группы близко расположенных атомов, объединённых химической связью, претерпевает изменения по сравнению с изолированным атомом (рис. 3.1, б). Вследствие взаимодействия атомов друг с другом разрешенные уровни электронов соседних атомов смещаются, образуя близко расположенные *смещенные уровни энергии – подуровни*. При этом смещению подвергаются и уровни высоких энергий, где электроны слабо связаны с атомом. Подуровни образуют *зоны разрешенных уровней энергии*, которые отделены друг от друга *запрещенными зонами*.

Кристалл твердого тела состоит из большого числа близко расположенных атомов. Поэтому число подуровней, входящих в разрешенные зоны его энергетической диаграммы, довольно велико.

### *Носители заряда в беспримесных (чистых) полупроводниках*

На электропроводность твердого тела оказывает существенное влияние расположение двух соседних зон разрешенных уровней энергии в верхней части энергетической диаграммы (рис. 3.1, б). Между соседними зонами разрешенных уровней энергии либо может располагаться запрещенная зона, либо ее может и не быть. Эти две вероятности, а также ширина запрещенной зоны, и определяют три класса кристаллических веществ: *проводники, полупроводники и диэлектрики.*

Расположение двух соседних зон разрешенных уровней в верхней части их энергетических диаграмм приведено на рисунке 3.2.

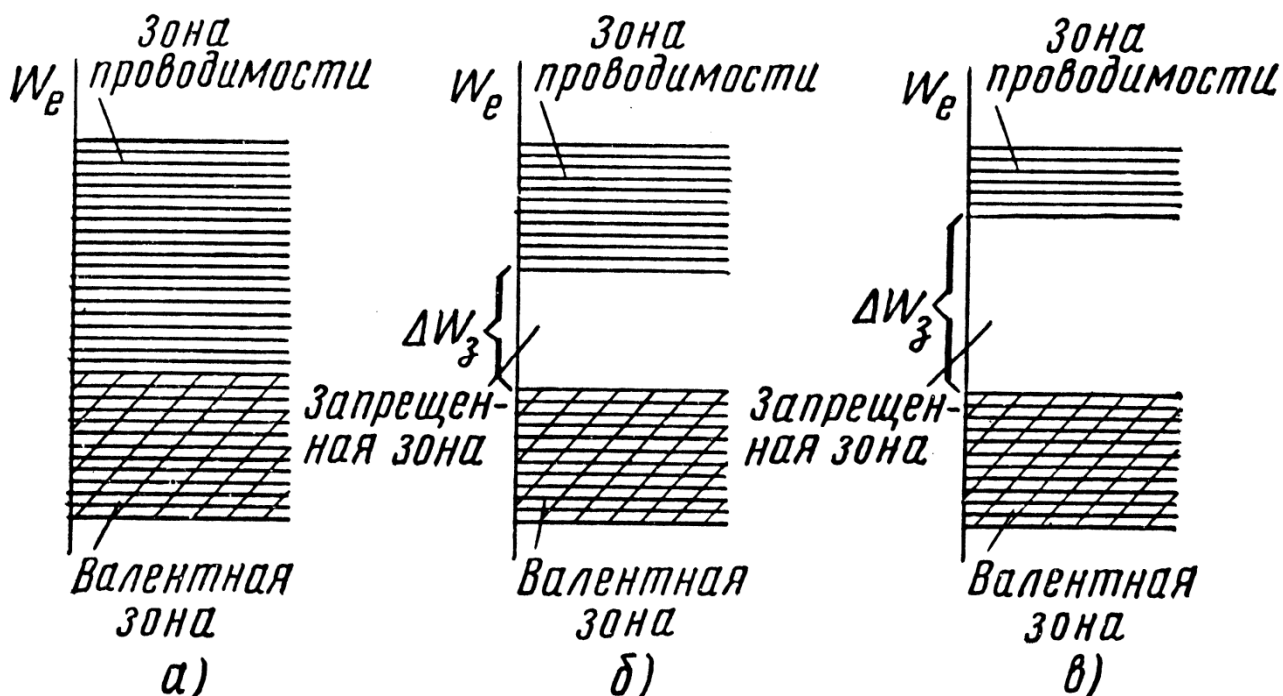


Рис. 3.2. Энергетическая диаграмма металла (а), полупроводника (б) и диэлектрика (в)

В *металлах* (рис. 3.2, а) запрещенной зоны нет: электроны валентной зоны можно легко перевести в зону свободных уровней, сообщив им весьма малую энергию. Поэтому уже при воздействии только электрического поля в металле имеется большое число свободных (не связанных с атомами) электронов, которые и обеспечивают его высокую электрическую проводимость.

В *полупроводниках* (рис. 3.2, б) свободная зона отделена от валентной зоны запрещенной зоной энергии  $\Delta W_3$ . Величина  $\Delta W_3$  определяет энергию (в электрон-вольтах), которую нужно сообщить электрону, расположенному на верхнем энергетическом уровне в валентной зоне, чтобы

перевести его на нижний энергетический уровень в зоне свободных уровней.

*Электрон-вольт* – это единица измерения энергии, равная энергии, приобретаемой частицей, несущей один элементарный заряд (заряд электрона) при перемещении в ускоряющем электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов 1 В. Обозначается эВ. При этом  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . (Определяется по формуле энергии  $W = qU = eU$ , заряд электрона составляет  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ).

Достаточно широкая запрещенная зона приводит к уменьшению числа свободных электронов в полупроводнике по сравнению с металлом и, как следствие, к уменьшению его электрической проводимости. Повышение температуры приводит к росту числа электронов, способных преодолеть запрещенную зону. Поэтому с повышением температуры проводимость чистых полупроводников возрастает (в отличие от проводников).

Ширина запрещенной зоны полупроводников не превышает 3 эВ. Их электрическая проводимость возникает при температуре выше 80–100 К.

*Диэлектрики* (рис. 3.2, в) отличаются от полупроводников более широкой запрещенной зоной. У них  $\Delta W_3 > 3 \text{ эВ}$  и может достигать 6–10 эВ. В связи с этим проводимость диэлектриков мала и становится заметной лишь при температуре не ниже 400°–800°С или сильных электрических полях, при которых происходит пробой диэлектрика.

Наличие на энергетической диаграмме запрещенной зоны обуславливает особенности образования носителей заряда в полупроводниках по сравнению с металлами (у которых вообще нет запрещенной зоны).

Полупроводники являются необычным материалом. Полупроводником, чаще всего применяемым в транзисторах, является *кремний* (Si), хотя используется и *германий* (Ge). Оба эти элемента – четырехвалентные, то есть на внешней орбите их атомов находится по четыре электрона. Их кристаллы имеют очень ясную и стройную структуру, благодаря которой атомы удерживаются вместе в устойчивом образовании; их устойчивость обеспечивается парноэлектронной или *ковалентной* связью (рис. 3.3). Известно, что при наличии у атома *восьми* валентных электронов вещество оказывается очень стабильным (инертные газы находятся в таком состоянии). Соседние атомы в кристалле Ge или Si принимают совместное участие в таком образовании, в результате чего каждое ядро имеет «половинную» долю в восьми валентных электронах вместо индивидуального владения четырьмя валентными электронами, которыми обладал бы изолированный атом.

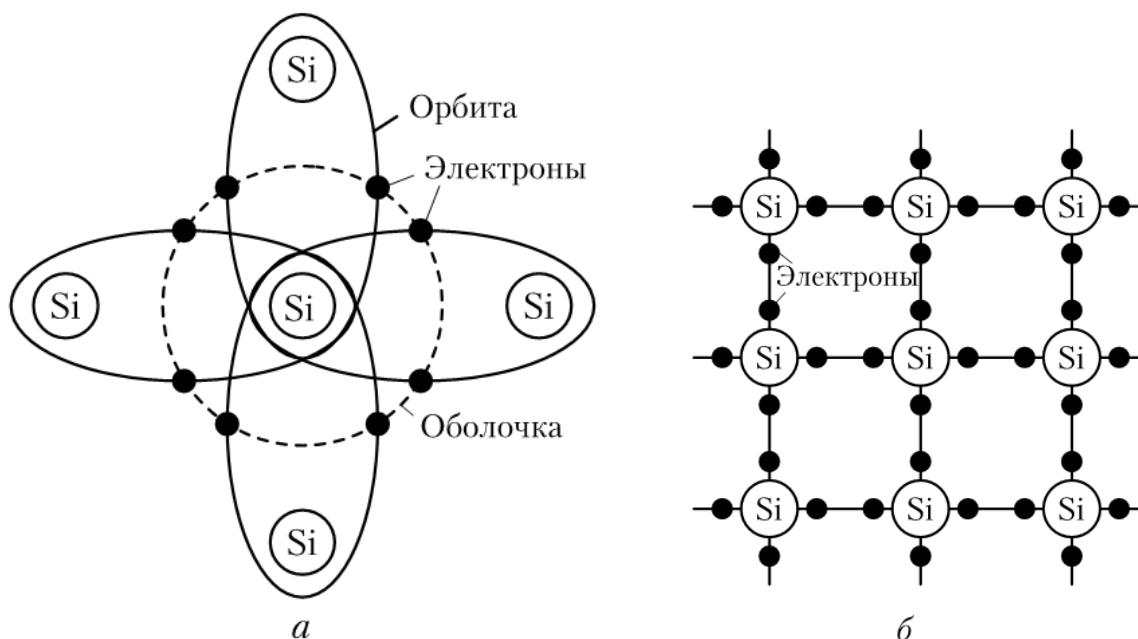


Рис. 3.3. Ковалентные связи (а) и кристаллическая решетка (б) кремния

Такая структура из атомов кремния схематически показана на рис. 3.3, а; каждая из указанных на рисунке связей между атомами представляет собой совместно используемый электрон. Здесь интересно отметить, что чрезвычайная твердость алмаза связана с тем, что четырехвалентные атомы углерода имеют такую же организацию ковалентных связей в кристалле. Алмаз действительно считается полупроводником, но прочность ковалентных связей, которая и обеспечивает его физическую твердость, приводит фактически к очень слабой электропроводности. Так что Ge и Si являются намного лучшими и значительно более дешевыми альтернативными материалами.

Итак, элементы Ge и Si принадлежат к IV группе Периодической системы элементов. На внешней оболочке их атомов находятся четыре валентных электрона. Каждый такой элемент, в отличие от металла, имеет запрещенную зону. Ширина запрещенной зоны германия и кремния равны соответственно:  $\Delta W_{\text{Ge}} = 0,72$  эВ,  $\Delta W_{\text{Si}} = 1,12$  эВ.

Повышение температуры кристалла вызывает увеличение энергии тепловых квантов энергии – фононов. При некоторой температуре эта энергия становится достаточной для освобождения электрона от связей с атомами кристаллической решетки. Валентный электрон переходит с уровня валентной зоны на уровень зоны проводимости, освобождается и становится свободным (рис. 3.4). Свободный электрон способен перемещаться между узлами кристаллической решетки под воздействием электрического поля, т.е. участвовать в создании тока. Там, где электрон становится свободным, он оставляет после себя дырку или отсутствие отрицательного заряда, которое также может казаться перемещающимся, если разорванная связь заполняется валентным электроном из соседнего атома.

Исчезновение дырки в одном месте кристалла и ее появление в другом учитывают (условно) как движение дырки.

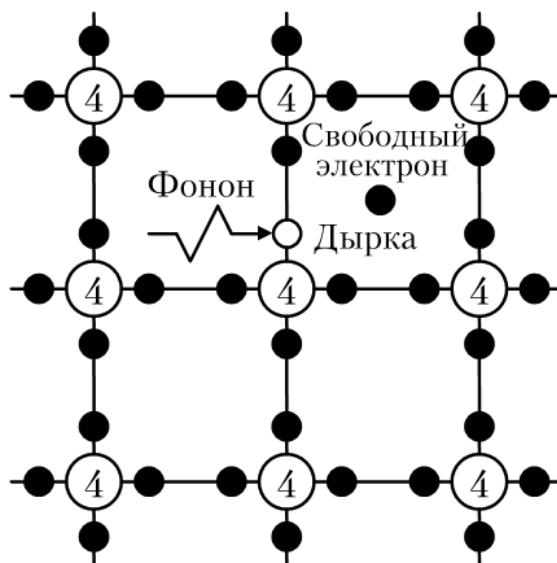


Рис. 3.4. Механизм собственной электропроводности элемента четвертой группы

При температуре выше абсолютного нуля переход из валентной зоны в зону проводимости возможен у многих электронов. В результате этого процесса, получившего название *термогенерация носителей заряда*, в полупроводнике создается некоторая концентрация электронов  $n_i$  в свободной зоне и равная ей концентрация дырок  $p_i$  в валентной зоне (индекс  $i$  означает, что речь идет о чистых полупроводниках – *intrinsic semiconductor* – собственный полупроводник). При неизменной температуре существует динамическое равновесие в кристалле, при котором число вновь возникающих носителей заряда (термогенерация) равно количеству рекомбинирующих носителей за счет возвращения электронов из зоны проводимости на вакантные уровни валентной зоны.

### 3.1.2. Примесные полупроводники

#### **Носители заряда в примесных полупроводниках**

Добавление примесей в полупроводник приводит к интересным результатам. Атомы некоторых примесей способны внедряться в кристаллическую решетку, не внося в нее чрезмерной деформации, и в случае, когда валентность этих атомов отличается от собственной валентности полупроводника, проводимость кристалла значительно возрастает. Введение примеси позволяет получить электронные ( $n$ -типа) и дырочные ( $p$ -типа) полупроводники. Введение примесей в п\п называют *легированием*.

#### **Полупроводник $n$ -типа.**

Для получения п\п с электропроводностью  $n$ -типа (начальная буква английского слова *negative*) в чистый п\п вводят примесь, создающую в п\п

только свободные электроны. Такая примесь является «поставщиком электронов», поэтому ее называют *донорной примесью*. Для Ge и Si, относящихся к IV группе Периодической системы элементов, донорной примесью служат элементы V группы (фосфор – P, сурьма – Sb, мышьяк – As, ванадий – V), атомы которых имеют *пять валентных электронов*.

Атомы примеси замещают атомы исходного п/п в отдельных узлах кристаллической решетки. Четыре электрона кадного атома донорной примеси участвуют в ковалентной связи с соседними атомами исходного материала, а пятый («избыточный») электрон, не участвующий в ковалентной связи, оказывается значительно слабее связанным со своим атомом. Это объясняется тем, что энергетический уровень донора расположен в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости (рис. 3.5). Для того, чтобы донорный электрон смог перейти в зону проводимости и стать свободным, нужна дополнительная энергия  $\Delta W_D$ , которая значительно меньше энергии, необходимой для освобождения электрона из ковалентной связи. В результате приобретения такой энергии избыточный электрон покидает атом и становится свободным, а атом пятивалентной примеси превращается в *неподвижный положительный ион* (протонов больше, чем электронов). Так как ширина  $\Delta W_D$  мала, то уже при комнатной температуре практически все электроны донорных уровней перейдут в зону проводимости и смогут участвовать в создании тока (при наличии напряжения между боковыми поверхностями кристалла).

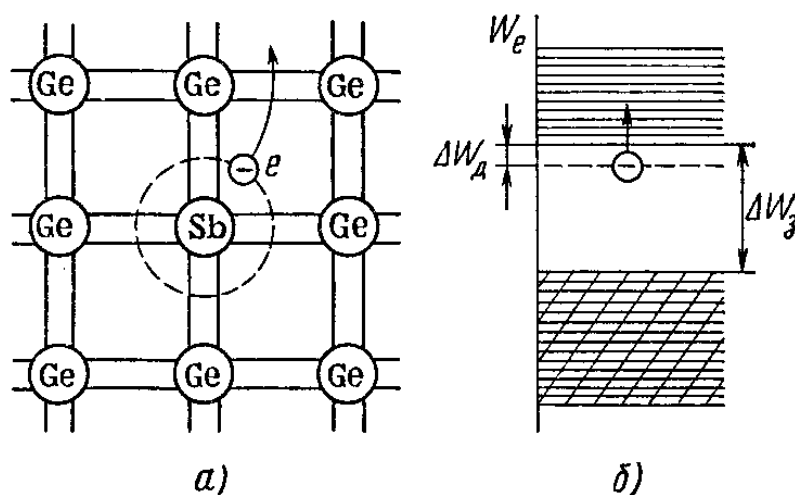


Рис. 3.5. Возникновение свободного электрона в кристалле полупроводника *n*-типа (а) и отражение этого процесса на энергетической диаграмме (б)

В п/п *r*-типа ток создается в основном электронами, т.е. *основными носителями заряда* являются электроны, а дырки, образующиеся в

результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости и которых значительно меньше, являются неосновными носителями заряда.

### Полупроводник *p*-типа.

В полупроводниках *p*-типа (*positive*) введение примеси направлено на получение концентрации дырок. Для этого в качестве примеси используются элементы III группы Периодической системы: бор (B), алюминий (Al), индий (In). Эти элементы имеют по три валентных электрона. Каждый атом примеси образует только три заполненные ковалентные связи с соседними атомами исходного полупроводника в кристаллической решетке. Четвертая связь остается незаполненной. Недостающий валентный электрон для заполнения связи принимается от одного из соседних атомов кристаллической решетки, так как требуемая для такого энергия невелика. Переход электрона приводит к появлению дырки в ковалентной связи соседнего атома, откуда ушел электрон, и превращению атома трехвалентной примеси в *неподвижный отрицательный ион*. В результате за счет примеси достигается повышение концентрации дырок в полупроводнике. Атомы примеси, принимающие валентные электроны соседних атомов, называют *акцепторными* (*to accept* – принимать), а саму примесь – *акцепторной*.

В полупроводнике *p*-типа акцепторный уровень находится вблизи потолка валентной зоны (рис. 3.6). Для образования дырки нужна дополнительная энергия  $\Delta W_A$ , которая значительно меньше энергии, необходимой для освобождения электрона из ковалентной связи. Поэтому при комнатной температуре все акцепторные уровни будут заняты электронами, перешедшими из валентной зоны.

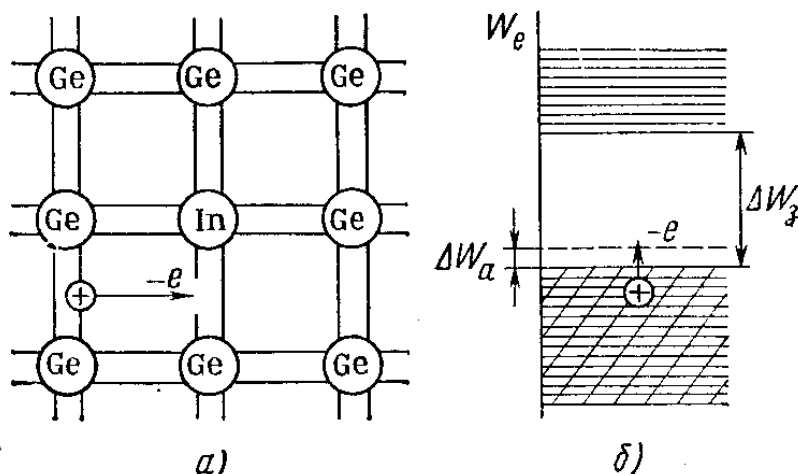


Рис. 3.6. Возникновение дырки в кристалле полупроводника *p*-типа (а) и отражение этого процесса на энергетической диаграмме (б)

В валентной зоне появится большая концентрация дырок, которая определяется преимущественно концентрацией внесенной акцепторной

примеси. По этой причине ток в дырочном полупроводнике создается в основном дырками. В этом случае дырки являются основными носителями заряда, а электроны – неосновными носителями заряда.

Таким образом, в примесных полупроводниках концентрации основных носителей заряда ( $n_n$  – электронного полупроводника и  $p_p$  – дырочного полупроводника) создаются за счет внесения примеси, а концентрации неосновных носителей заряда ( $p_n$ ,  $n_p$  – соответственно электронного и дырочного полупроводников) – за счет термогенерации носителей заряда, связанного с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Необходимая примесь вводится в количестве, при котором концентрация основных носителей заряда существенно (на два-три порядка) превышает концентрацию неосновных носителей заряда. В зависимости от концентрации введенной примеси удельная проводимость примесного полупроводника возрастает по сравнению с чистым полупроводником в десятки и сотни тысяч раз.

### Образование $p$ - $n$ -перехода

Работа полупроводникового прибора, такого как транзистор, определяется эффектами, имеющими место на границе между материалами  $p$ - и  $n$ -типа. Здесь важно понять, что полупроводниковый переход представляет собой изменение материала с  $p$ -типа на  $n$ -тип в пределах одной и той же кристаллической решетки. В германиевых и кремниевых диодах такая двухслойная  $p$ - $n$ -структура (рис. 3.7) создается введением в один из слоев монокристалла акцепторной примеси, а в другой – донорной примеси. При комнатной температуре атомы акцепторов и доноров можно считать полностью ионизированными, т.е. практически все акцепторные атомы присоединяют к себе электроны, создавая при этом дырки, а донорные атомы отдают свои электроны, которые становятся свободными. Кроме основных носителей заряда в каждом из слоев имеются неосновные носители заряда, создаваемые путем перехода электронов основного материала из валентной зоны в зону свободных уровней.

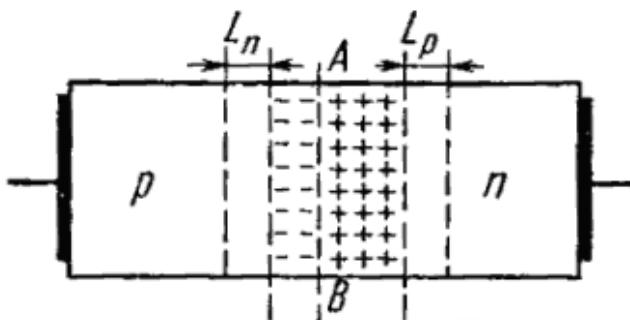


Рис. 3.7. Образование  $p$ - $n$ -перехода в  $p$ - $n$ -структуре полупроводника



В приграничной области возникает диффузионное движение основных носителей заряда во встречном направлении через границу раздела. Дырки из  $p$ -области диффундируют в  $n$ -область, электроны из  $n$ -области диффундируют в  $p$ -область. Уход электронов из  $n$ -области приводит к появлению в приконтактной ее части некомпенсированных положительно заряженных неподвижных ионов донорной примеси, а приход электронов в  $p$ -область благодаря рекомбинации с дырками – к созданию в приконтактной части  $p$ -области отрицательно заряженных ионов акцепторной примеси. Эти заряженные ионы образуют потенциальный барьер, препятствующий дальнейшему перемещению электронов через переход, благодаря чему наступает равновесие. В результате такого начального перемещения дырок и свободных электронов вблизи  $p$ - $n$ -перехода практически не остается свободных носителей. Эта область, шириной менее одного микрона, называется *обедненным слоем*.

Таким образом, запирающий слой на границе двух полупроводниковых сред с различным типом проводимости является электронно-дырочным переходом или  $p$ - $n$ -переходом, который представляет собой слой из неподвижных ионов вблизи металлургической границы, обедненный подвижными носителями, поэтому обладает относительно малой удельной проводимостью (имеет повышенное сопротивление).

### 3.2. Полупроводниковые диоды

**Неравновесное состояние  $p$ - $n$ -перехода.** Подключение источника напряжения к кристаллу, в котором создан  $p$ - $n$ -переход, приводит к нарушению равновесия и протеканию тока. Внешнее напряжение  $U$  почти полностью прикладывается к переходу, так как его удельное сопротивление намного больше сопротивления остальной части кристалла. Высота потенциального барьера  $\phi_k$  изменяется на величину  $U$ , и вместе с ней изменяются ширина перехода и концентрации носителей вблизи металлургической границы. Рассмотрим особенности неравновесных состояний электронно-дырочного перехода при разных полярностях внешнего напряжения.

**Состояние при прямой полярности.** При прямом включении (рис. 3.8) подаваемое на  $p$ - $n$ -переход напряжение равно  $U_{p-n} = \phi_k - U$ . С увеличением  $U$  снижается потенциальный барьер, уменьшается толщина запирающего слоя, благодаря чему облегчается диффузия основных носителей.

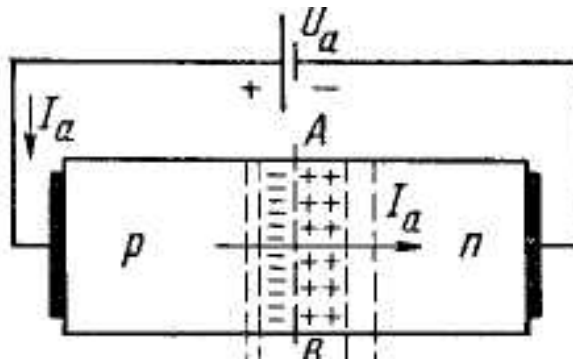


Рис. 3.8. Полупроводниковый диод при подключении внешнего напряжения в прямом направлении

Независимо от напряжения под воздействием тепла через переход течет тепловой ток. Следовательно, результирующий ток через переход складывается из диффузионного тока основных носителей  $I_D$  и теплового тока  $I_0$  неосновных носителей, направленного ему навстречу:

$$I = I_D - I_0 = I_0 e^{U/\varphi_T} - I_0 = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1).$$

Диффузионный ток связан с напряжением экспоненциальным законом

$$I_D = I_0 e^{U/\varphi_T},$$

где  $\varphi_T = kT / q$  – температурный потенциал ( $\varphi_T = 26$  мВ при  $T = 300$  К).

Вычислим ток диода при его прямом включении, рис. 3.9.

Напряжение источника:  $U_{ист} = U_1 = 10$  В.

Прямое напряжение на диоде:  $U_{пр} = U_2 = 0,927$  В.

Прямой ток диода:  $I = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{10 - 0,927}{10} = 9,073$  А.

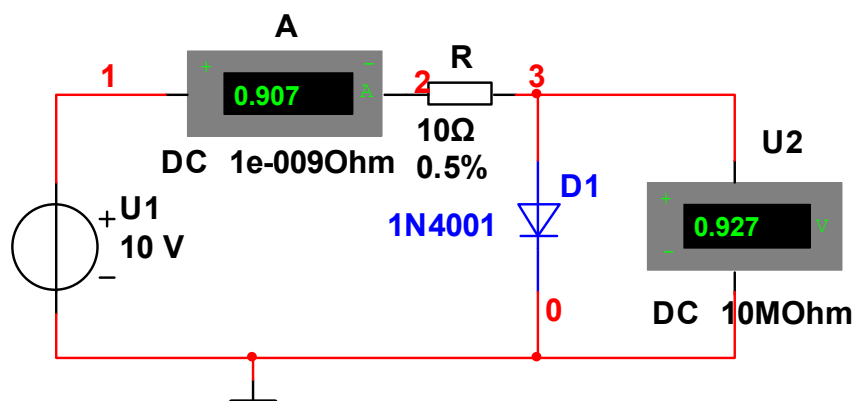


Рис. 3.9. Прямое включение диода

**Состояние при обратной полярности.** При обратном включении подводимое внешнее напряжение  $U$  совпадает с полярностью контактной разности потенциалом, из-за чего повышается потенциальный барьер. Внешнее электрическое поле складывается с внутренним (напряженности электрических полей  $E_{внут} = E_{внеш}$  совпадают по направлению), в результате увеличивается ширина  $p$ - $n$ -перехода и его сопротивление.

При увеличении обратного напряжения  $U$  диффузионный поток основных носителей заряда уменьшается, а после превышения некоторого порогового значения практически прекращается. Через  $p$ - $n$ -переход будут свободно проходить только потоки *неосновных носителей*, движению которых потенциальный барьер не препятствует. Они создают постоянный обратный ток  $I_0$ , который называют током насыщения или, учитывая его природу, *тепловым* током.

Собираем схему, в которой диод будет перевернут, рис. 3.10.

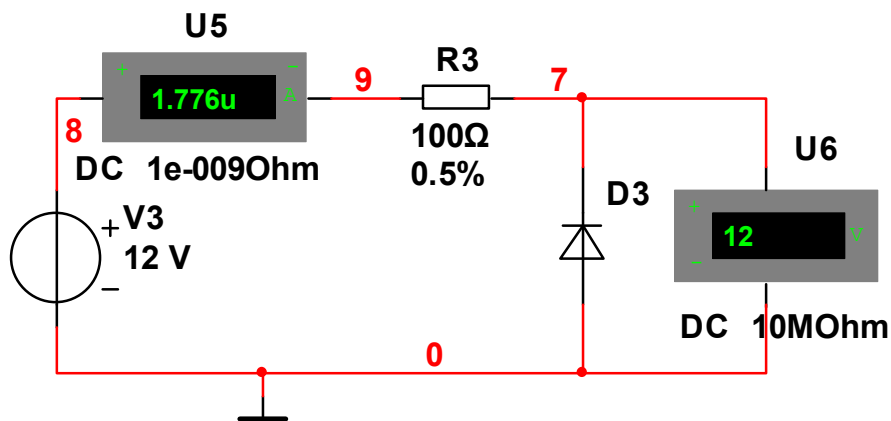


Рис. 3.10. Обратное включение диода

Так как диод закрыт, ток в схеме незначителен, составляет  $I = 1,776 \text{ мА} = 1,776 \cdot 10^{-3} \text{ А}$  и является обратным (тепловым) током:

Выражение для тока  $I = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1)$  описывает изображенную на рисунке 3.11 вольт-амперную характеристику (ВАХ)  $p$ - $n$ -перехода с ярко выраженным вентиляльным эффектом: большим током при прямом смещении и ничтожно малым током при обратном напряжении на переходе.

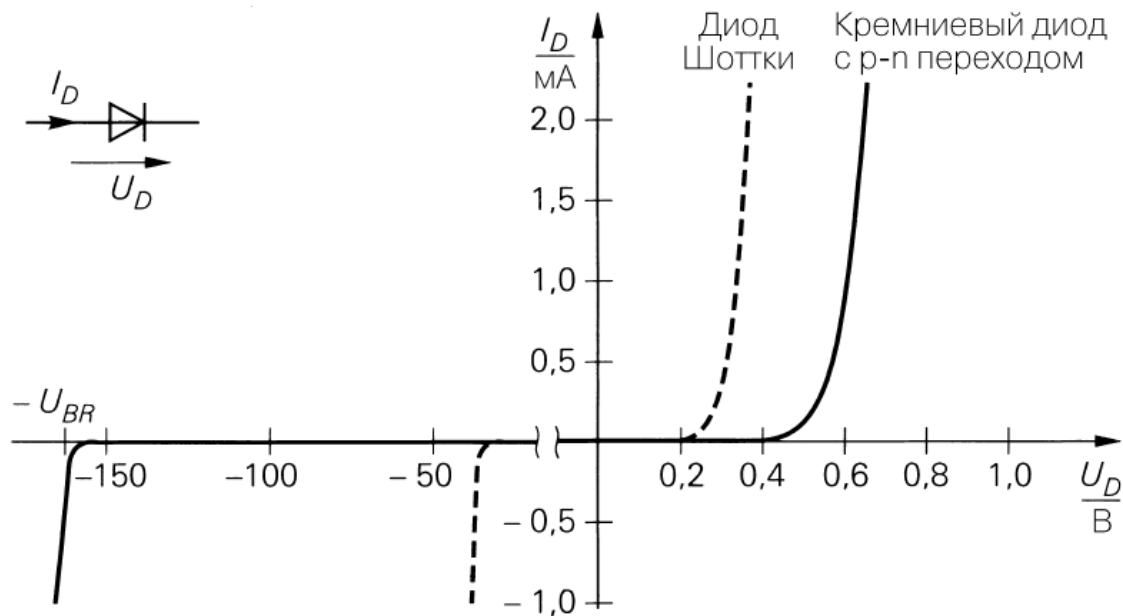


Рис. 3.11. Вольт-амперная характеристика диодов

Следует отметить, что при увеличении напряжения прямого смещения эффективное сопротивление перехода уменьшается из-за понижения потенциального барьера. В результате небольшое увеличение напряжения, приложенного в прямом направлении, вызывает значительное увеличение тока. Обычно у маломощных кремниевых диодов напряжение прямого смещения 0,6 В вызывает ток около 1 мА, а при напряжении 0,8 В ток возрастает до 100 мА. Кремниевый переход практически не проводит ток, пока напряжение прямого смещения не превышает 0,5 В. У германиевых переходов эта величина меньше и составляет 0,2 В.

Таким образом, диод представляет собой электронный ключ, управляемый приложенным к нему напряжением. При прямом напряжении ключ замкнут, при обратном – разомкнут. Однако в обоих этих случаях ключ не является идеальным. При подаче прямого напряжения за счёт падения напряжения  $U_{пр}$  на открытом диоде выпрямленное напряжение, снимаемое с нагрузки, несколько ниже входного напряжения.

### Выпрямительные или силовые диоды.

В процессе работы диод может находиться в областях *проводимости*, *запирания* и *пробоя*.

Диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются выпрямительными; они попеременно работают в областях проводимости и запирания. Диоды, сконструированные для работы в области пробоя – стабилитроны (диоды Зенера) применяют для стабилизации напряжения.

Диод представляет собой полупроводниковый элемент с двумя выводами, один из которых называют анодом (А), а другой – катодом (К), рис. 3.12.



Рис. 3.12. Условное графическое изображение диода

В настоящее время используются в основном кремниевые выпрямительные диоды, имеющие высокое значение допустимого обратного напряжения 1000–1500 В (у германиевых диодов – 100-400 В) и широкий рабочий диапазон температур – от –60 до +150 °С (у германиевых – от –60 до +85 °С).

Основные электрические параметры выпрямительных диодов связаны с вентильным эффектом:

- $I_{\text{пр макс}}$ , прямой максимальный ток;
- $U_{\text{пр}}$ , падение напряжения при прямом смещении и заданном прямом токе. Значение  $U_{\text{пр}}$  открытого диода не превышает для кремниевых диодов 1,5 В, а для германиевых диодов не превышает 0,5 В;
- $U_{\text{обр доп}}$ , наибольшее допустимое значение постоянного обратного напряжения диода;
- $f_{\text{max}}$ , максимальная допустимая частота входного напряжения.

Выпрямительные диоды классифицируют:

1) по мощности:

- маломощные ( $I_{\text{пр макс}} \leq 0,3 \text{ А}$ );
- средней мощности ( $0,3 \text{ А} < I_{\text{пр макс}} < 10 \text{ А}$ );
- большой мощности ( $I_{\text{пр макс}} > 10 \text{ А}$ ).

2) по частоте:

- низкочастотные ( $f_{\text{max}} < 10^3 \text{ Гц}$ );
- высокочастотные ( $f_{\text{max}} > 10^3 \text{ Гц}$ ).

В качестве выпрямительных применяются также диоды, выполненные на выпрямляющем переходе металл – полупроводник (диоды Шотки). Их отличают меньшие, чем у диодов с *p-n*-переходом, напряжение  $U_{\text{пр}}$  и более высокие рабочие частоты.

Поведение диода проще всего представить с помощью его вольтамперной характеристики, описывающей зависимость тока, протекающего через диод от приложенного к нему напряжения в случае, когда все величины постоянны или медленно меняются во времени.

Если к диоду приложить напряжение  $U_D = U_{AK}$  и измерить ток  $I_D$ , полагая, что на анод относительно катода поступает напряжение, мы получим характеристики, представленные на рисунке 3.11. Обратите внимание на гораздо более крупный масштаб в области положительных напряжений. При  $U_D > 0$  В диод работает в *области проводимости*. Здесь ток растет экспоненциально с напряжением. У диодов с р-п переходом заметный ток течет при  $U_D > 0,4$  В. При  $-U_{BR} < U_D < 0$  В диод заперт, и ток становится пренебрежимо малым. Этот участок называют *областью запираения*. Напряжение пробоя  $U_{BR}$  зависит от типа элемента и у выпрямительных диодов составляет от  $-50$  до  $-1500$  В. При  $U_D < -U_{BR}$  наступает пробой диода и возникает обратный ток. В этой области способны работать длительное время только стабилитроны. Для диодов других типов наличие обратного тока при отрицательном напряжении нежелательно.

В области проводимости диода при средних токах напряжение оказывается почти постоянным благодаря крутому подъему характеристики. Это напряжение  $U_F$  называется прямым.

При несложных вычислениях диод можно рассматривать в виде ключа, разомкнутого в области запираения или замкнутого в области проводимости. Если допустить, что напряжение на диоде в области проводимости постоянно, а в области запираения ток не течет, диод легко заменить идеальным ключом, который управляется напряжением, и источником прямого напряжения  $U_F$ , как показано на рисунке 3.13, а. Характеристика, соответствующая эквивалентной схеме, приведена на рисунке 3.13, б. Она состоит из двух полупрямых (кусочно-линейная аппроксимация):

$$I_D = 0 \quad \text{для } U_D < U_F \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)}$$

$$U_D = U_F \quad \text{для } I_D > 0 \rightarrow \text{ключ замкнут (б)}$$

С учетом прямого сопротивления  $R_B$  получим:

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_D < U_F \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)} \\ \frac{U_D - U_F}{R_B} & U_D \geq U_F \rightarrow \text{ключ замкнут (б)} \end{cases}$$

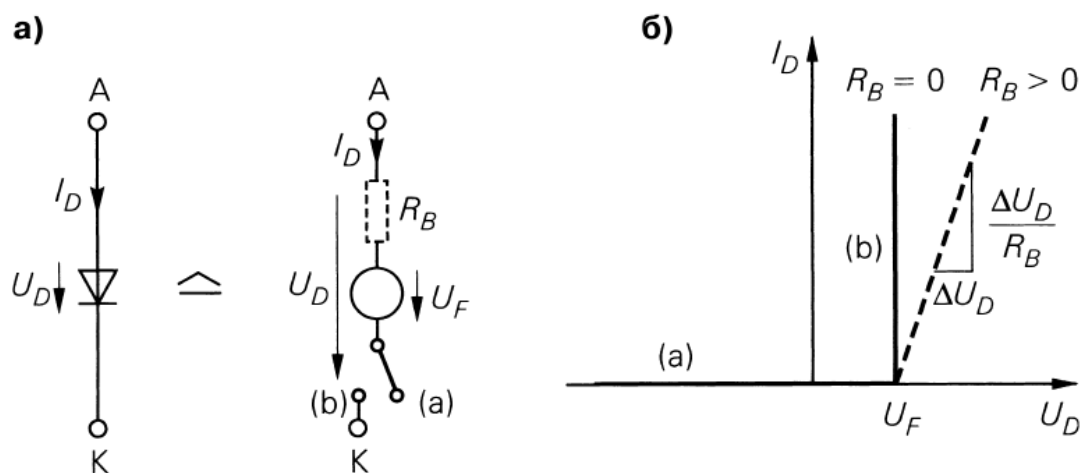


Рис. 3.13. Эквивалентная схема диод

У кремниевых диодов с  $p$ - $n$ -переходом  $U_F = 0,6$  В, а у диодов Шоттки  $U_F = 0,3$  В. Соответствующая схема и характеристика выделены на рисунке 3.13 пунктиром.

#### Предельные параметры и токи запириания.

В спецификациях диодов указываются различные предельные параметры, превышение которых недопустимо. Они подразделяются на *предельные напряжения, предельные токи и максимальную мощность рассеяния*. Чтобы величину предельных параметров отображать положительными величинами, в области запириания используются противоположные отсчетные направления тока и напряжения, а к соответствующим величинам добавляется индекс  $R$  (reverse, обратный); соответственно в области проводимости применяется индекс  $F$  (forward, прямой).

#### Предельные напряжения

При напряжении пробоя  $U_{BR}$  или  $U_{(BR)}$  диод в области запириания пробивается, и обратный ток резко возрастает. Поскольку ток заметно усиливается уже с приближением к напряжению пробоя, обычно приводится максимальное напряжение запириания  $U_{R,max}$ , до достижения которого обратный ток остается меньше некоторой предельной величины в диапазоне микроампер.

#### Предельные токи

Для области проводимости указывается максимальный прямой постоянный ток  $I_{F,max}$ . Он соответствует условиям, при которых температура корпуса диода составляет  $t = 25$  °С. При более высоких температурах выбирают постоянный максимальный ток меньшей величины.

#### Ток запириания

Ток запириания  $I_R$  измеряется при напряжении запириания, меньшем напряжения пробоя, и сильно зависит от первого из них и температуры

диода. У кремниевых выпрямительных диодов, прямые токи которых измеряются амперами,  $I_R = 1 \dots 10$  мкА.

### **Максимальная мощность рассеяния**

Мощностью, рассеиваемой в диоде, считается мощность, которая превращается в тепло:  $P_V = U_D I_D$ . Она возникает в запиорном слое, а при сильных токах и на прямом сопротивлении  $R_B$ . В спецификациях приводится максимальная мощность рассеивания  $P_{tot}$  для случая, когда температура корпуса диода составляет  $25^\circ$ . При более высоких температурах  $P_{tot}$  понижается.

Дополнительным параметром служит ток  $I_K$ , соответствующий изгибу характеристики и ограничивающий область сильных токов.

### **Прямое сопротивление**

Для полного описания статического режима надо знать величину прямого сопротивления  $R_B$ . Прямое сопротивление составляет от 0,01 Ом у мощных диодов до 10 Ом у диодов, работающих со слабыми сигналами.

Таблица 3.1. Параметры модели диода

Параметр	PSpice	Обозначение
Статические характеристики		
$I_S$	IS	Обратный ток насыщения
$n$	N	Коэффициент эмиссии
$I_{S,R}$	ISR	Обратный ток насыщения утечки
$n_R$	NR	Коэффициент эмиссии
$I_K$	IK	Ток в точке изгиба при сильной инжекции
$I_{BR}$	IBV	Ток пробоя в точке изгиба
$n_{BR}$	NBV	Коэффициент эмиссии
$U_{BR}$	BV	Напряжение пробоя
$R_B$	RS	Прямое сопротивление
Динамические характеристики		
$C_{S0}$	CJO	Начальная барьерная емкость
$U_{Diff}$	VJ	Диффузионное напряжение
$m_S$	M	Емкостный коэффициент
$f_S$	FC	Коэффициент емкостной зависимости
$\tau_T$	TT	Постоянная времени р-п перехода

Таблица 3.2. Параметры некоторых диодов



Параметр	PSpice	1N4148	1N4001	BAS40	Размерность
$I_S$	IS	2,68	14,1	0	нА
$n$	N	1,84	1,98	1	
$I_{S,R}$	ISR	1,57	0	254	фА
$n_R$	NR	2	2	2	
$I_K$	IK	0,041	94,8	0,01	А
$I_{BR}$	IBV	100	10	10	мкА
$n_{BR}$	NBV	1	1	1	
$U_{BR}$	BV	100	75	40	В
$R_B$	RS	0,6	0,034	0,1	Ом
$C_{S0}$	CJO	4	25,9	4	пФ
$U_{Diff}$	VJ	0,5	0,325	0,5	В
$m_S$	M	0,333	0,44	0,333	
$f_S$	FC	0,5	0,5	0,5	
$\tau_T$	TT	11,5	5700	0,025	нс
$x_{TJ}$	XTI	3	3	2	

1N4118 – маломощный диод; 1N4001 – выпрямительный диод; BAS40 – диод Шотки

ВАХ диода (прямую и обратную ветви) можно получить в программе Multisim. Диоды доступны из группы **Diode** в **Components toolbar** на панели инструментов. Диалоговое окно выбора конкретного диода показано на рисунке 3.14.

В этом окне мы видим, что доступны различные типы диодов, такие как ZENER, LED, SCHOTTKY, диодные мосты и т. д. При размещении в принципиальной схеме диоды обозначаются буквой D.

Для получения ВАХ диода и других полупроводниковых приборов в программе Multisim имеется прибор **IV analyzer** или Характериограф-IV.

Характериограф предназначен для наблюдения и исследования характеристик радиоэлектронных устройств и компонентов, при этом измерительная информация отображается на экране в виде кривых. В Multisim характериограф-IV (I — ток, V — напряжение) используется для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов, биполярных и полевых транзисторов. При этом в отличие от других виртуальных приборов Multisim характериограф-IV подключается не к схеме, а непосредственно к исследуемому устройству. В том случае, когда необходимо произвести измерение параметров устройства, уже используемого в схеме, следует предварительно отключить его от схемы. Для того чтобы открыть лицевую панель прибора, нужно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по его пиктограмме на схеме.

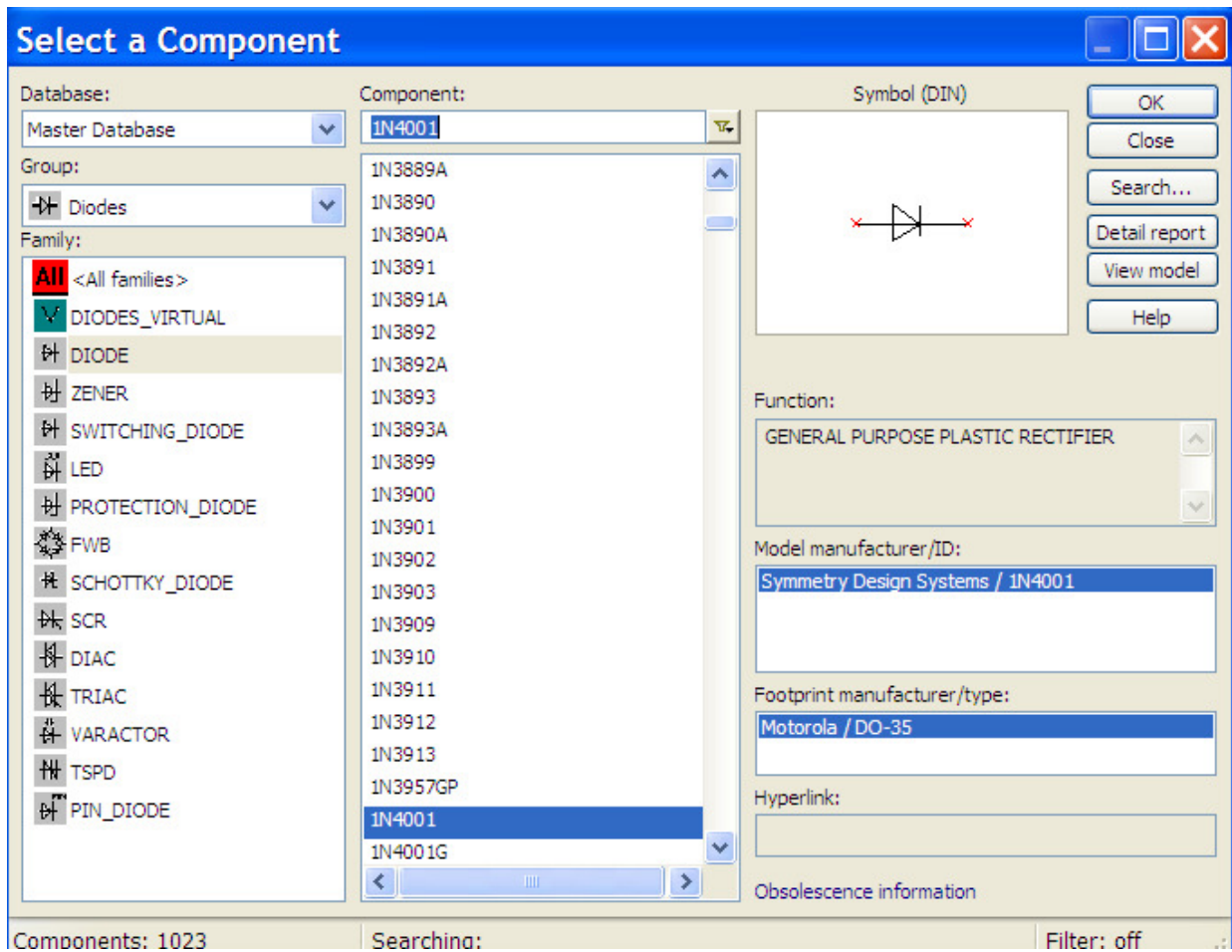


Рис. 3.14. Диалоговое окно выбранного диода

Рассмотрим лицевую панель характеристикографа-IV более подробно, рис. 3.15.

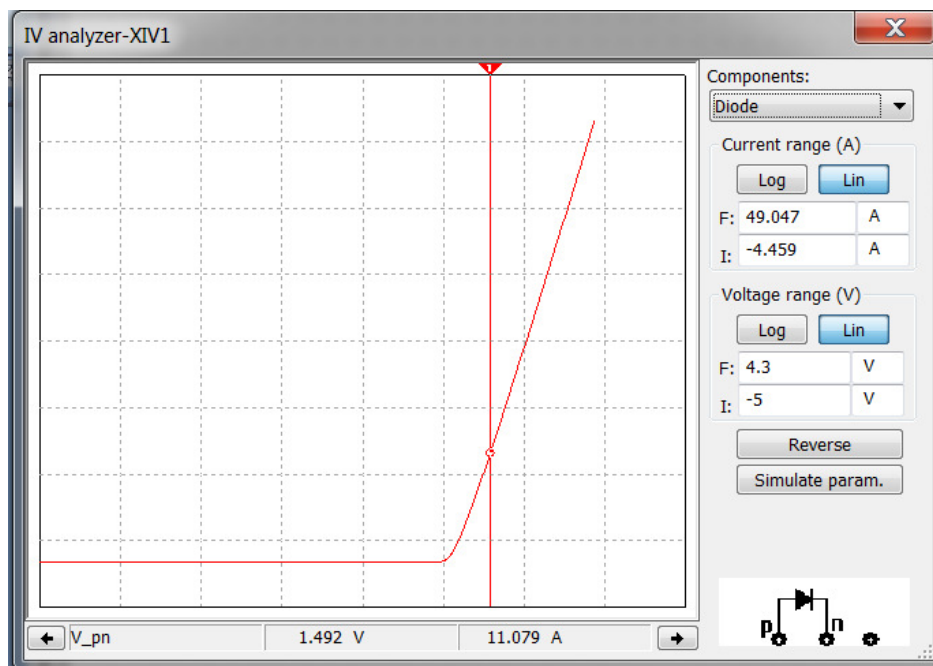


Рис. 3.15. Панель характеристикографа-IV – IV analyzer

В левой части панели расположен графический дисплей, предназначенный для графического отображения формы сигнала. Также прибор оснащен вертикальным *курсором* для проведения измерений в любой точке графика; если необходимо, курсор надо перемещать при помощи левой кнопки мыши. Управлять положением курсора можно и при помощи стрелок перемещения вертикального курсора, которые расположены в нижней левой части лицевой панели характериографа-IV под графическим дисплеем. Между стрелками находятся три информационных поля, где отображаются данные, полученные на пересечении вертикального курсора и кривой. Кривую (если их несколько), для которой будут отображаться данные, можно выбрать при помощи щелчка по ней левой кнопкой мыши, в результате на пересечении вертикального курсора и кривой появится метка-точка (именно для той кривой, на которой находится метка-точка, и будут отображаться данные в информационных полях).

В правой части лицевой панели прибора есть панель управления, предназначенная для настройки параметров характериографа-IV. В верхней части панели находится поле **Components** – «Выбор компонента», в котором из выпадающего списка можно выбрать для анализа следующие компоненты: Diode, BJT PNP, BJT NPN, PMOS, NMOS.

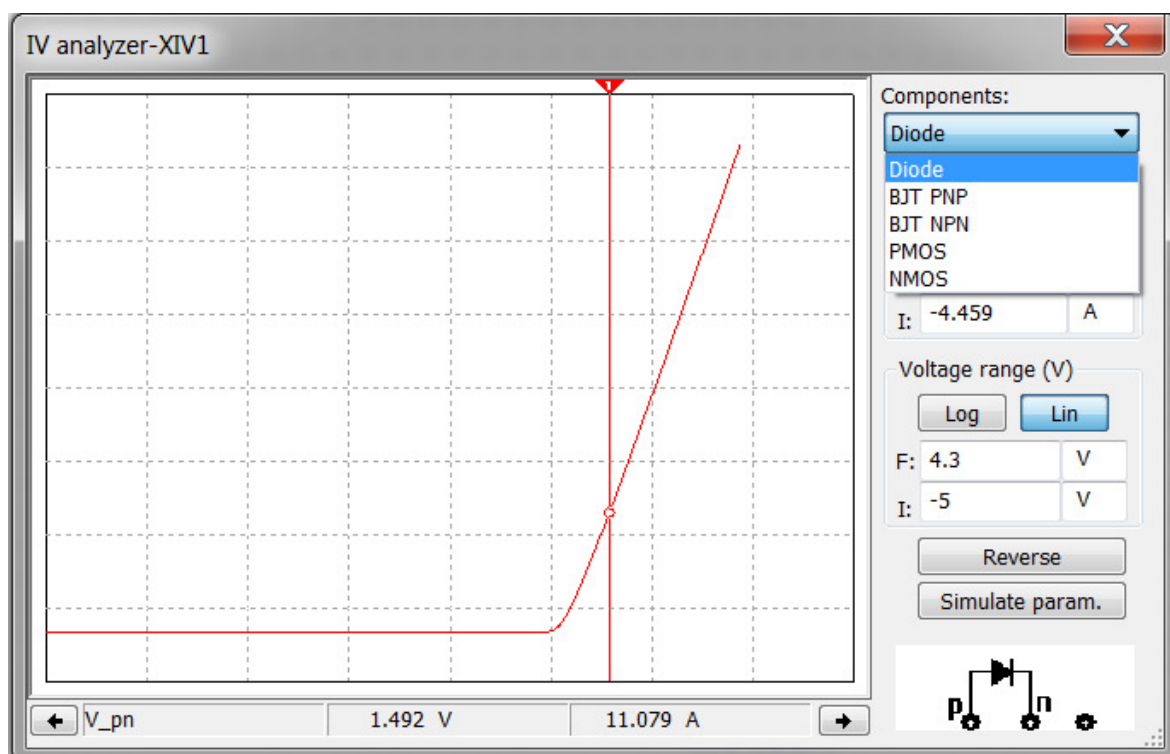


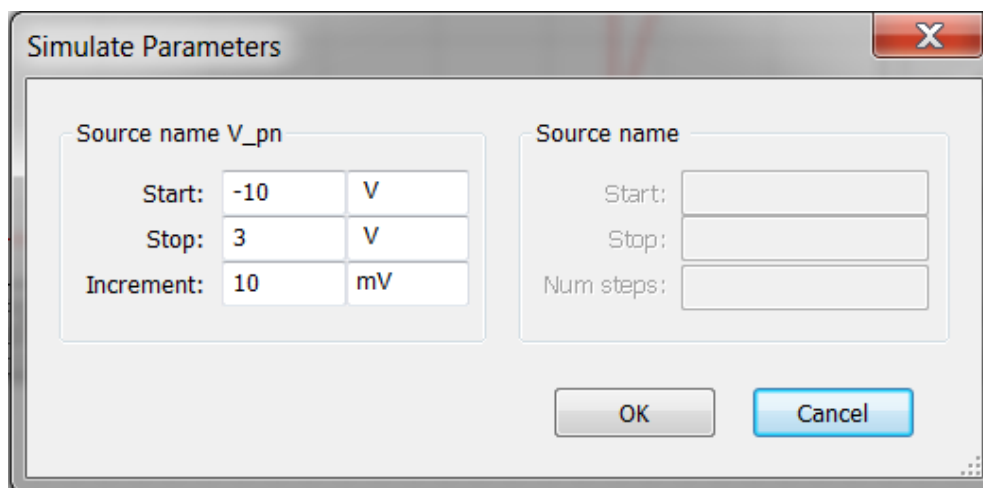
Рис. 3.16. Выбор компонентов

Под полем **Components** расположены поля **Current range (A)** and **Voltage range (V)** – «Шкала тока (A)» и «Шкала напряжения (V)» соответственно, где можно задать параметры горизонтальной и вертикальной

осей координат при логарифмической или линейной шкале. Переключение шкалы выполняется при помощи кнопок **Lin** (linear) и **Log** (logarithmic). В этом примере используется линейная шкала и для тока и для напряжения. Масштаб горизонтальной (ось X) и вертикальной (ось Y) осей определяется начальным **F** (final) and конечным **I** (initial) значениями.

Обычно нет необходимости изменять настройки тока и напряжения **F** (конечные) и **I** (начальные). После запуска моделирования они настраиваются таким образом, чтобы кривые отображались полностью.

Под полем **Voltage range (V)** размещены две кнопки. Кнопка «**Reverse**» предназначена для инверсии цвета графического дисплея (черный/белый). Кнопка **Simulate param.** используется для произведения настроек параметров моделирования. После нажатия на эту кнопку открывается окно **Simulate Parameters**.



*Рис. 3.17. Настройка параметров моделирования*

Содержание данного диалогового окна меняется в зависимости от компонента, выбранного из выпадающего меню в поле **Components** и подробно будет рассмотрено далее для каждого компонента в отдельности. В нижней правой части лицевой панели характеристикографа-IV имеется окно, отображающее схему подключения выбранного компонента к данному виртуальному прибору.

Пример подключения характеристикографа-IV к диоду 1N4001, ВАХ и лицевая панель данного прибора представлены на рис. 3.18.

Порядок выполнения операций.

1. Нажмите на кнопку инструмента IV Analyzer (в правой части окна расположен столбец инструментов), поместите его значок в рабочее пространство и дважды щелкните значок, чтобы открыть инструмент.

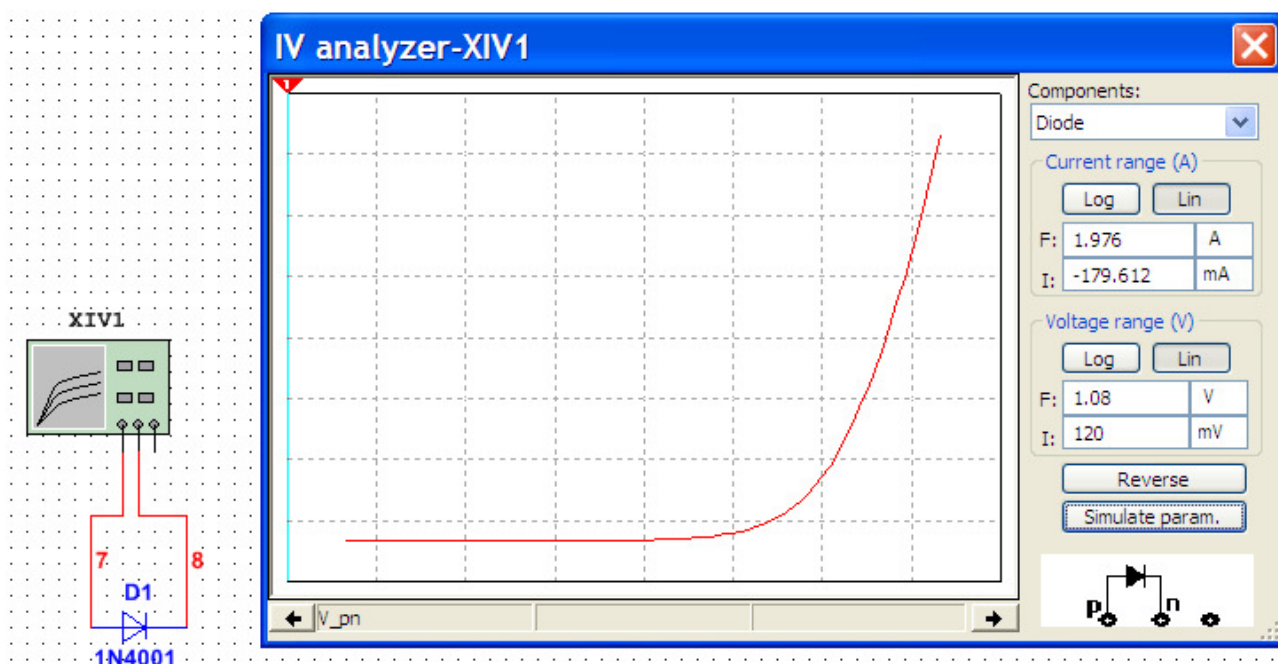


Рис. 3.18. Подключения характеристического IV к диоду 1N4001

2. Выберите тип устройства, которое вы анализируете, в раскрывающемся списке **Components**.
3. Поместите нужное устройство в рабочее пространство и подключите его к анализатору IV, следуя карте символов, отображаемой на передней панели.
4. Нажмите **Simulate param.** для отображения диалогового окна **Simulate Parameters**. Настройте окно для данного диода.

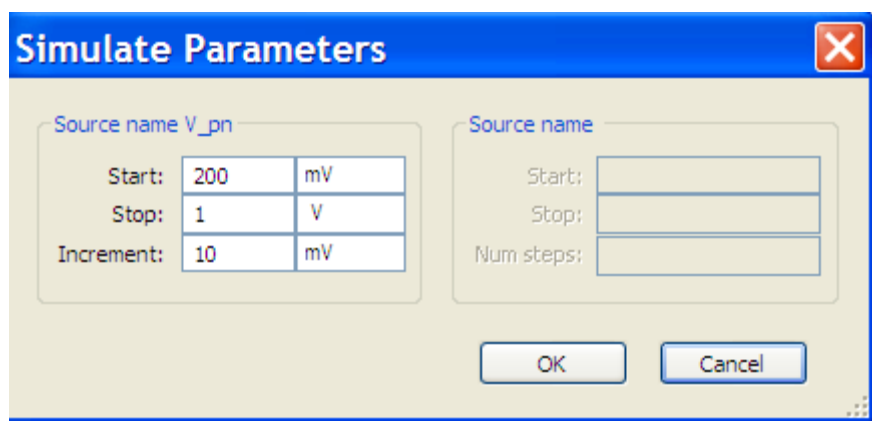


Рис. 3.19. Прямое включение диода

5. Нажмите кнопку **OK**, чтобы сохранить настройки и вернуться в главное диалоговое окно IV Analyzer.

Таким образом, получена прямая ветвь ВАХ выбранного диода (рис.). Воспользуемся вертикальным курсором для получения координат нескольких характерных точек ВАХ.

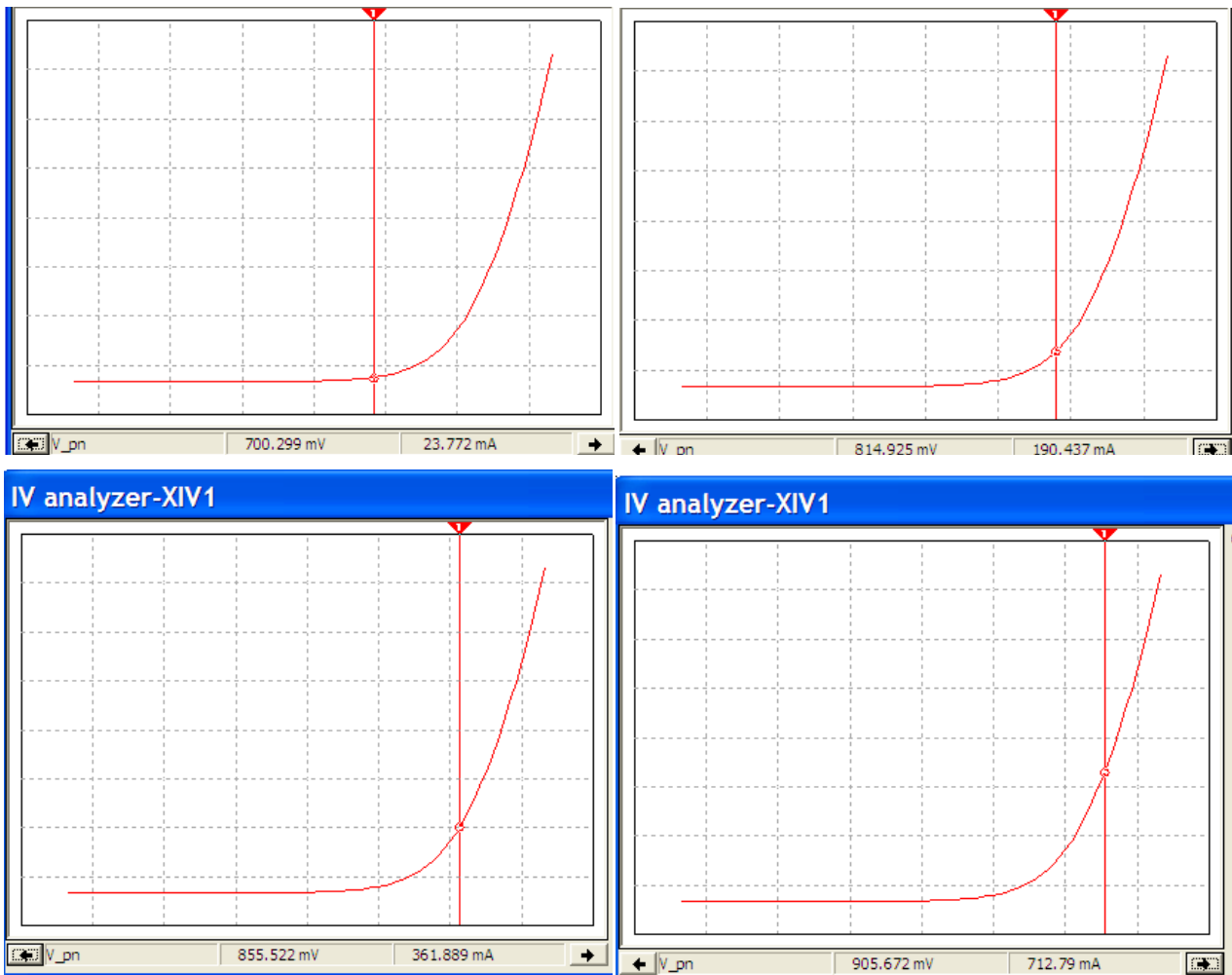


Рис. 3.20. Использование вертикального курсора

Координаты выбранных точек внесем в таблицу 3.3.

Таблица 3.3.

$U, \text{В}$	0,7	0,81	0,86	0,905	0,94	0,98
$I, \text{А}$	0,02	0,19	0,36	0,71	1,09	1,59

По данным таблицы, вручную строим прямую ветвь ВАХ диода (рис. 3.21).

ВАХ диода можно снять экспериментально с помощью двух приборов постоянного тока – амперметра и вольтметра. Схема для снятия ВАХ изображена на рис. 3.22. В качестве источника выбран источник тока, ток которого можно изменять от 0 до установленного значения с помощью ползунка (DC INTERACTIVE CURRENT), который находится в группе **Sources** (источники).

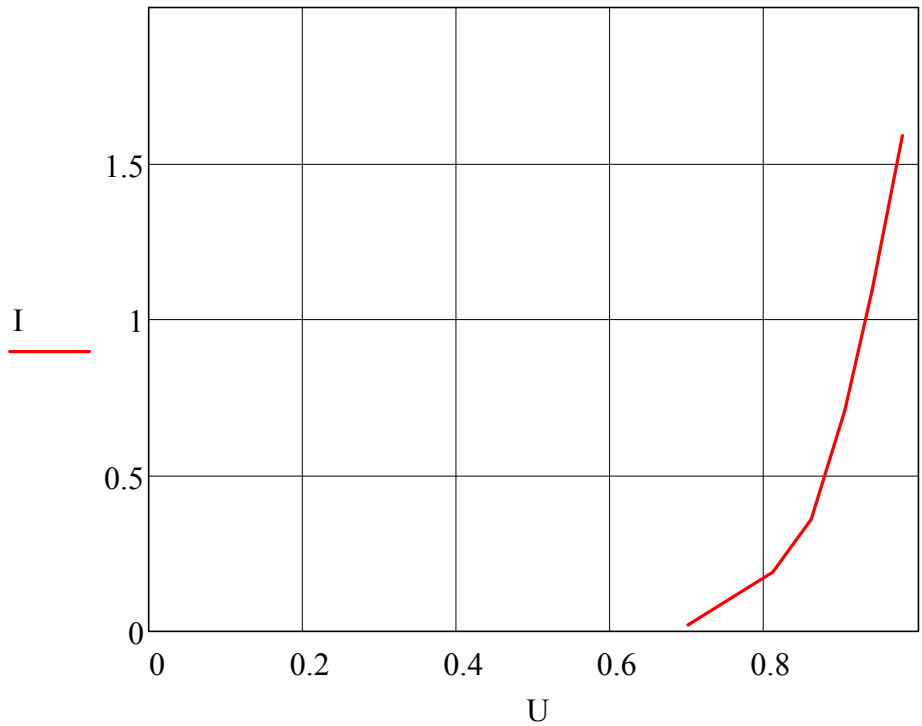


Рис. 3.21. ВАХ диода 1N4001 по данным таблицы

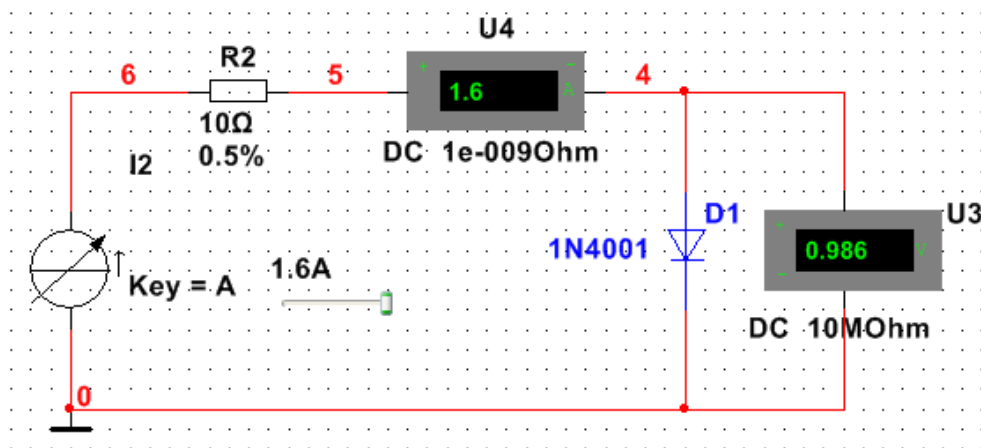


Рис. 3.22. Схема для снятия ВАХ

Устанавливая значения токов, близкие к значениям токов в таблице 3.3, записываем показания приборов в таблицу 3.4.

Таблица 3.4.

$U, \text{В}$	0,7	0,83	0,86	0,907	0,95	0,99
$I, \text{А}$	0,02	0,24	0,36	0,72	1,12	1,6

Значения координат, найденные двумя разными способами, практически совпадают (с учетом округления).

### 3.3. Выпрямители однофазного тока

*Выпрямителем* называют устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток. Необходимость в подобном преобразовании возникает в случае, когда для питания потребителя требуется постоянный ток, а источником электрической энергии является источник переменного тока, как правило, промышленная сеть частотой 50 Гц. При мощности нагрузки до нескольких сотен ватт задачу получения постоянного тока решают с помощью однофазных выпрямителей, питающихся от однофазной сети переменного тока. Структурная схема однофазного выпрямителя показана на рис. 3.23.

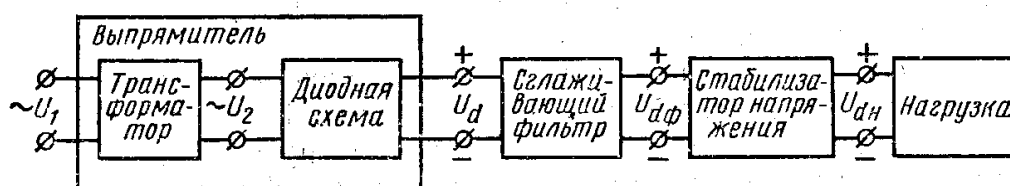


Рис. 3.23. Структурная схема маломощного источника питания

Принцип выпрямления основывается на получении с помощью диодной схемы однополярных полуволн напряжения  $u_d(\omega t)$  из двухполярной кривой синусоидального напряжения  $u_2(\omega t) = U_{2m} \sin \omega t$ . Это напряжение характеризует кривую *выпрямленного напряжения выпрямителя* (рис. 3.24, в). Ее постоянная составляющая  $U_d$  определяет *среднее значение выпрямленного напряжения*.

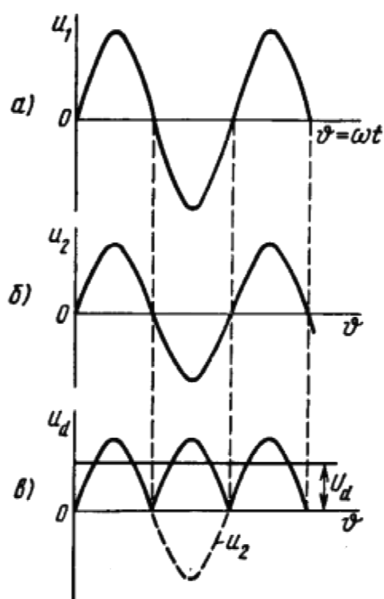


Рис. 3.24. Временные диаграммы, иллюстрирующие принцип выпрямления однофазного тока



Кривую выпрямленного напряжения – результат двухполупериодного выпрямления можно разложить в ряд Фурье:

$$u_2(\omega t) = \frac{4U_{2m}}{\pi} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \dots \right].$$

Постоянная составляющая напряжения равна:  $U_d = \frac{2U_{2m}}{\pi}$ . Наличие переменной составляющей, состоящей из четных косинусоид, в кривой выпрямленного напряжения в подавляющем большинстве случаев является нежелательным. Поэтому осуществляют фильтрацию этого напряжения путем подключения к выходу выпрямителя *сглаживающих фильтров* (рис. 3.25).

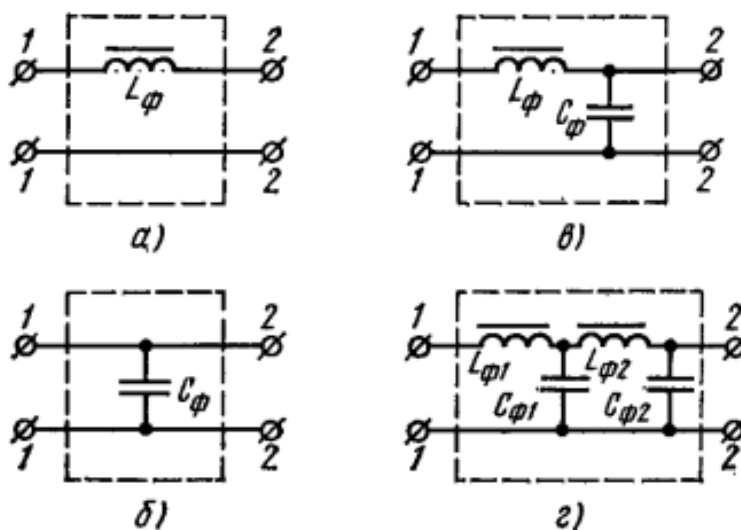


Рис. 3.25. Виды сглаживающих фильтров:

а – простейший индуктивный фильтр; б – простейший емкостной фильтр; в – однозвенный Г-образный LC-фильтр; г – двухзвенный Г-образный LC-фильтр

Сглаживающие фильтры выполняют на основе реактивных элементов – дросселей и конденсаторов: сглаживающий дроссель включают последовательно с нагрузкой, а конденсатор – параллельно ей. Это объясняется тем, что дроссель оказывает малое сопротивление постоянному току и большое – переменному, а конденсатор – наоборот. Практически конденсатор не пропускает постоянный ток. Виды сглаживающих фильтров показаны на рисунке 3.25.

Наличие сглаживающего фильтра оказывает значительное влияние на режим работы выпрямителя и его элементов. Поэтому между фильтром и нагрузкой иногда подключают стабилизатор напряжения, обеспечивающий поддержание с необходимой точностью требуемой величины посто-

янного напряжения на нагрузке в условиях изменения напряжения сети и тока нагрузки.

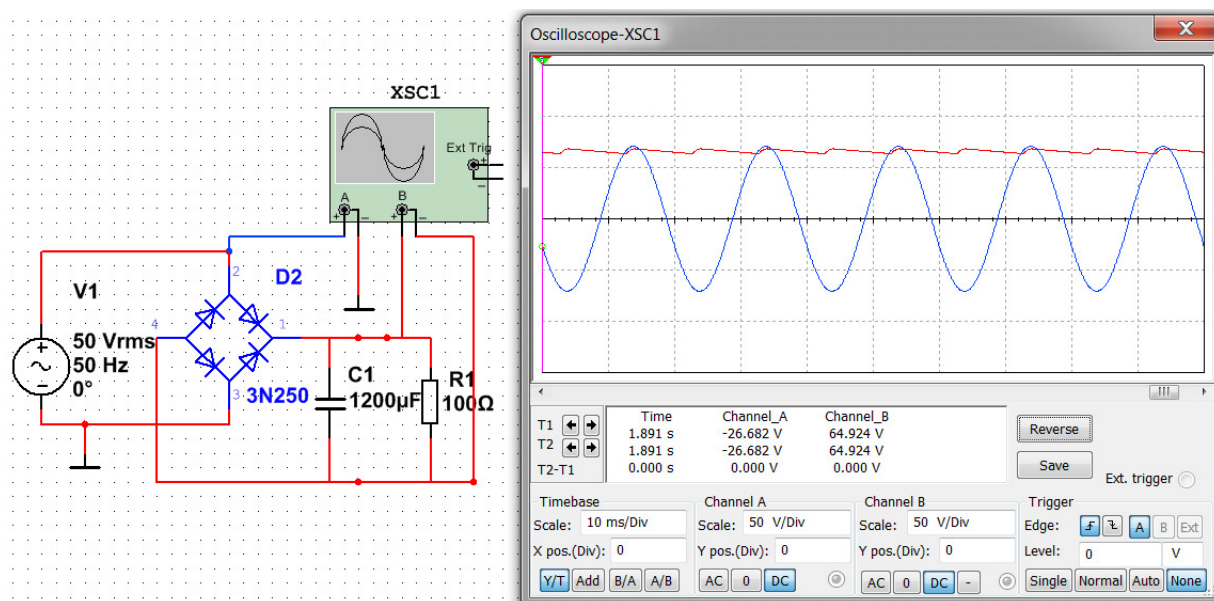


Рис. 3.26. Схема мостового выпрямителя

Расчет стабилизатора приведен в разделе, посвященном стабилизаторам.

### 3.4. Кремниевые стабилитроны

В полупроводниковых стабилитронах используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на  $p-n$ -переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое (рис. 3.27).

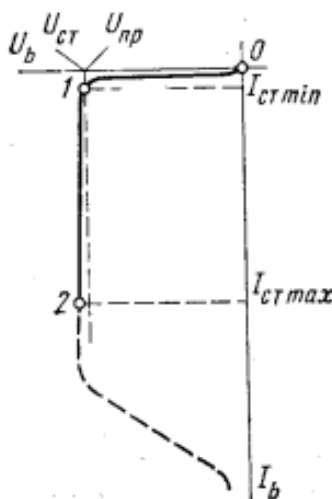


Рис. 3.27. Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона

Участок 1–2 на рисунке является рабочим участком ВАХ стабилитрона. Главным параметром прибора является напряжение стабилизации,

равное напряжению пробоя  $U_{CT} = U_{пр}$ . Шкала напряжений у промышленных типов стабилитронов лежит в пределах 3–180 В.

Точка 1 на характеристике соответствует минимальному току стабилитрона, при котором наступает пробой. Необходимость получения малого значения  $I_{CT\ min}$  является одной из причин выполнения стабилитрона из кремния. Точке 2 соответствует максимальный ток стабилитрона, достижение которого еще не грозит тепловым пробоем  $p-n$ - перехода. В зависимости от типа стабилитрона  $I_{CT\ max}$  может составлять от 2 мА до 1,5 А. Параметром, характеризующим наклон рабочего участка характеристики, является динамическое сопротивление стабилитрона  $R_{\dot{A}} = \frac{\Delta U_{\dot{N}0}}{\Delta I_{\dot{N}0}}$ .

на этого сопротивления для низковольтных стабилитронов лежит в пределах 1–30 Ом, а для высоковольтных – в пределах 18–300 Ом. Схема для снятия ВАХ стабилитрона показана на рис. 3.28, а на рис. 3.29 изображена обратная ветвь его ВАХ.

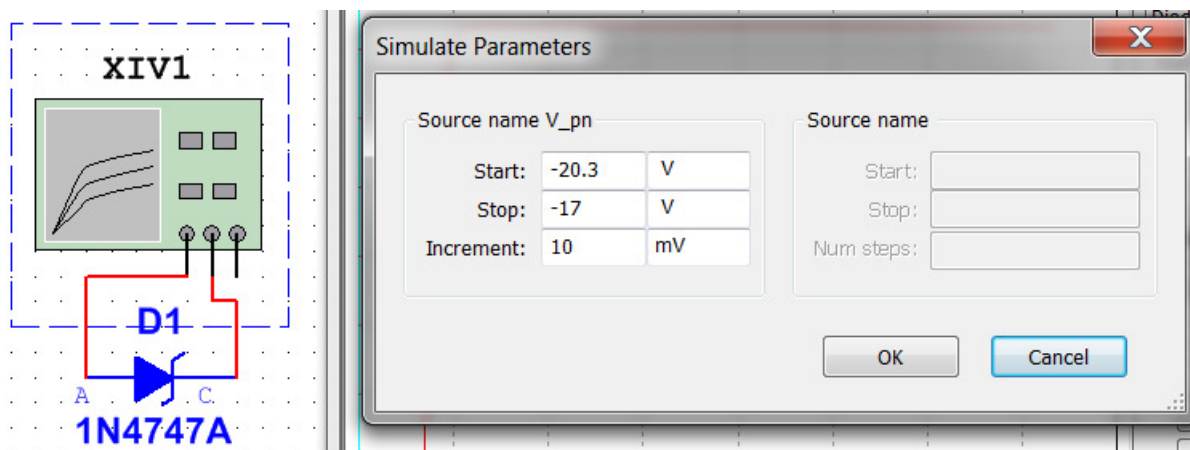


Рис. 3.28. Схема для снятия ВАХ стабилитрона

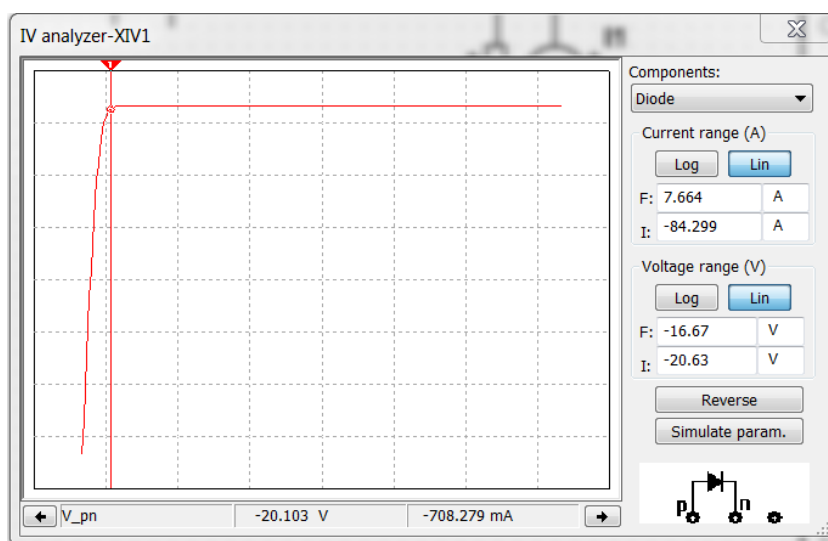


Рис. 3.29. ВАХ стабилитрона 1N4747A

### 3.5. Параметрические стабилизаторы напряжения

Как указывалось выше, напряжение на выходе диодной схемы  $U_d$  зависит от тока нагрузки, а также от изменения напряжения  $U_1$  питающей сети. Поэтому между выпрямителем и нагрузкой включают стабилизатор напряжения.

Схема параметрического стабилизатора напряжения приведена на рисунке 3.30. Она состоит из балластного резистора  $R_b$  и стабилитрона  $D$ . Стабилизатор подключается к выходу выпрямителя с фильтром. Нагрузка подключена параллельно стабилитрону.

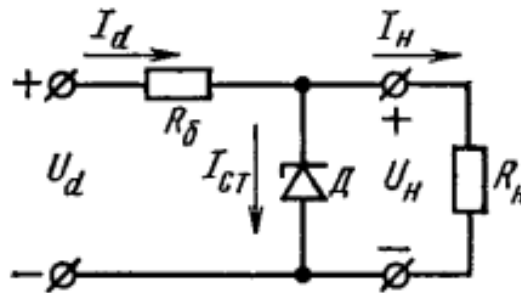


Рис. 3.30. Схема параметрического стабилизатора напряжения

При изменении напряжения на выходе выпрямителя  $U_d$  (из-за колебаний напряжения питающей сети или в результате изменения сопротивления нагрузки  $R_H$ ) напряжение на нагрузке изменяется незначительно, так как оно определяется мало изменяющимся обратным напряжением стабилитрона  $U_{CT}$  при изменении протекающего через него тока.

Главным при расчете стабилизатора является выбор стабилитрона на напряжение нагрузки  $U_{CT} = U_H$  и обеспечение условий его работы, при которых изменяющийся ток стабилитрона  $I_{CT}$  не выходит бы за пределы рабочего участка, т.е. не был меньше  $I_{CT\min}$  и больше  $I_{CT\max}$ . Выведем формулу для тока стабилитрона.

Согласно первому закону Кирхгофа  $I_{CT} = I_d - I_H$ . Напряжение на резисторе  $R_b$  меньше входного напряжения  $U_d$  на величину напряжения на нагрузке:  $U_b = U_d - U_H$ . Поэтому  $I_d = U_b / R_b = (U_d - U_H) / R_b$ . Ток нагрузки определяется по закону Ома:  $I_H = U_H / R_H$ . Используя полученные выражения, запишем формулу для тока стабилитрона:

$$I_{CT} = \frac{U_d - U_H}{R_b} - \frac{U_H}{R_H}.$$

Напряжение  $U_H$ , определяемое напряжением  $U_{CT}$ , изменяется незначительно, в связи с чем его можно считать неизменным (стабильным). В условиях изменения тока нагрузки в результате изменения сопротивления

нагрузки от  $R_{H\min}$  до  $R_{H\max}$ , максимальный ток стабилизатора определяется выражением

$$I_{CT\max} = \frac{U_{d\max} - U_H}{R_{\phi}} - \frac{U_H}{R_{H\max}}$$

и учитывается выбором типа стабилизатора по току, исходя из того, чтобы ток  $I_{CT\max}$  не превышал максимально допустимого тока через стабилизатор.

Величина балластного сопротивления должна быть такой, чтобы через стабилизатор протекал ток  $I_{CT\min}$ , и эта величина определяется по формуле:

$$R_{\phi} = \frac{U_{d\min} - U_H}{I_{CT\min} + U_H / R_{H\min}}$$

Таким образом, в процессе работы стабилизатора напряжение на нагрузке определяется напряжением на стабилизаторе, соответствующим ВАХ прибора.

### 3.6. Подготовка и выполнение работы

Выполнить следующий объем работ.

#### 1. Полупроводниковый диод и его применение для целей выпрямления.

1). Снять ВАХ диода 1N3900 с помощью прибора **IV analyzer** (7 точек). Установить **start** = 100 mV, **stop** = 2 V и **increment** = 10 mV.

Результаты расчета и моделирования свести в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
$U, В$	0						
$I, А$	0						

По данным таблицы построить на миллиметровке ВАХ диода.

2). Собрать электрическую схему мостового выпрямителя с исследуемым диодом 1N3900 (рис. 3.31). В схеме предусмотреть включение конденсатора как сглаживающего фильтра.

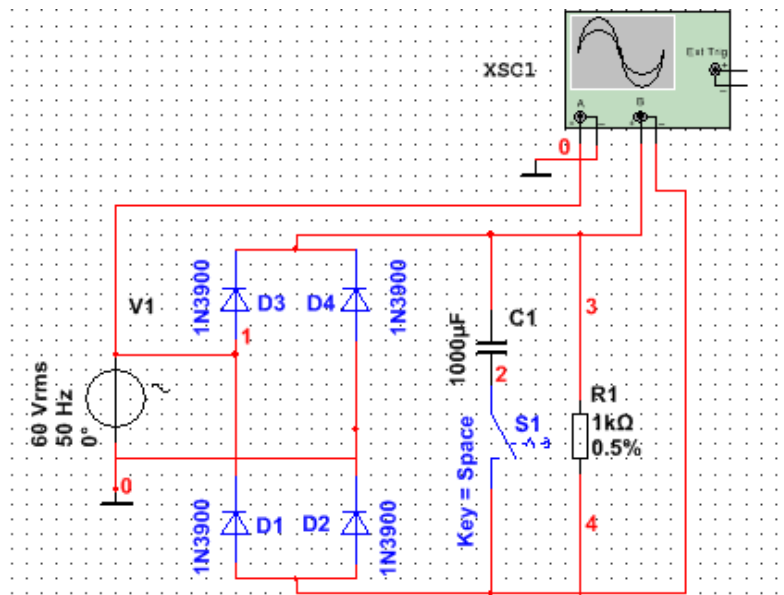


Рис. 3.31. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Вставить в отчет осциллограммы напряжений при включенном и отключенном конденсаторе. Эти кривые имеют вид (рис. 3.32 и рис. 3.33).

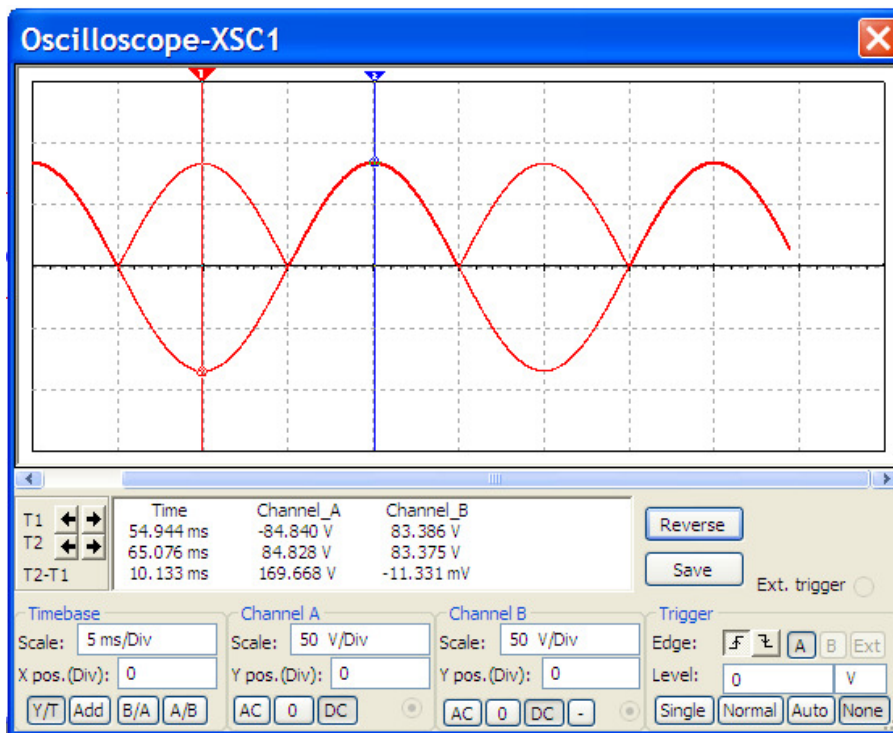


Рис. 3.32. Кривые напряжения источника и выпрямленного напряжения без фильтра (ключ S1 разомкнут)

Ряд Фурье выпрямленного напряжения  $u_a(\omega t)$  содержит постоянную составляющую  $U_{d0} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{\pi} = 0,9U$  и четные косинусные составляющие:

$$u_d(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t - \dots \right).$$

В данном случае действующее значение напряжения ( $V_{rms}$ ), равное действующему значению ЭДС, составляет 60 В ( $U = 60$  В). Поэтому постоянная составляющая имеет значение:

$$U_{d0} = 0,9U = 0,9 \cdot 60 = 54 \text{ В}.$$

Выпрямленное напряжение имеет пульсирующий характер и имеет большие пульсации и не пригодно для применения как постоянное напряжение. Уменьшить пульсации можно с помощью конденсатора как накопителя электрической энергии.

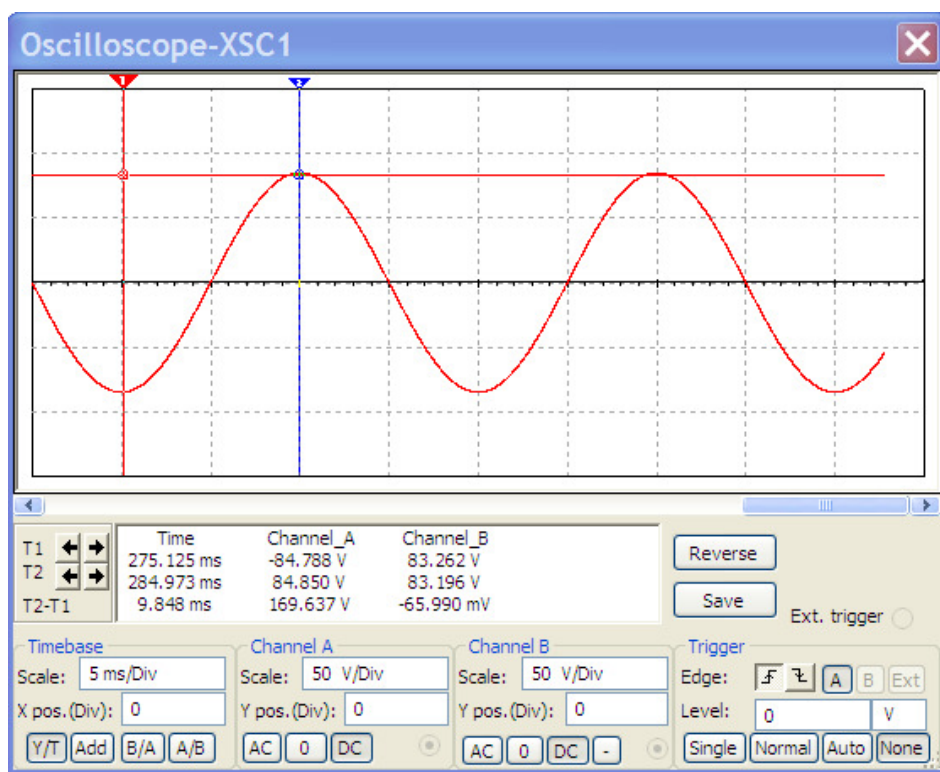


Рис. 3.33. Кривые напряжения источника и выпрямленного напряжения с фильтром (ключ  $S1$  замкнут)

В этом случае постоянная составляющая  $U_{d0} = 83$  В (канал B), т.е. больше постоянной составляющей без конденсатора в  $83/54 = 1,54$  раз.

Таким образом, наличие конденсатора, включенного параллельно активному сопротивлению нагрузки, дает на выходе не только практически постоянно напряжение, но и большее его значение. Значение емкости конденсатора можно определять методом подбора с помощью программы Multisim.

**Задание.** Исследовать кривую выходного напряжения при следующих значениях емкости: 200, 400, 600 и 800 мкФ.

## 2. Полупроводниковый стабилитрон и его применение для целей стабилизации выпрямленного выпрямления.

1). Снять ВАХ стабилитрона 1N4747A с помощью прибора **IV analyzer** (7 точек). Параметры моделирования указаны на рис. 3.34.

Результаты расчета и моделирования свести в таблицу 3.6.

Таблица 3.6.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
$U, В$	0						
$I, А$	0						

По данным таблицы построить на миллиметровке ВАХ диода.

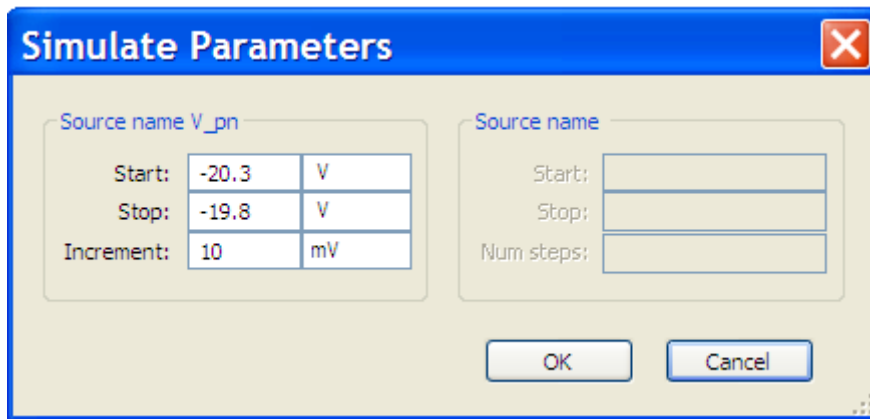


Рис. 3.34. Параметры моделирования (**simulate param.**) стабилитрона

2). Собрать электрическую схему стабилизатора с исследуемым стабилитроном 1N4747A (рис.3.35).

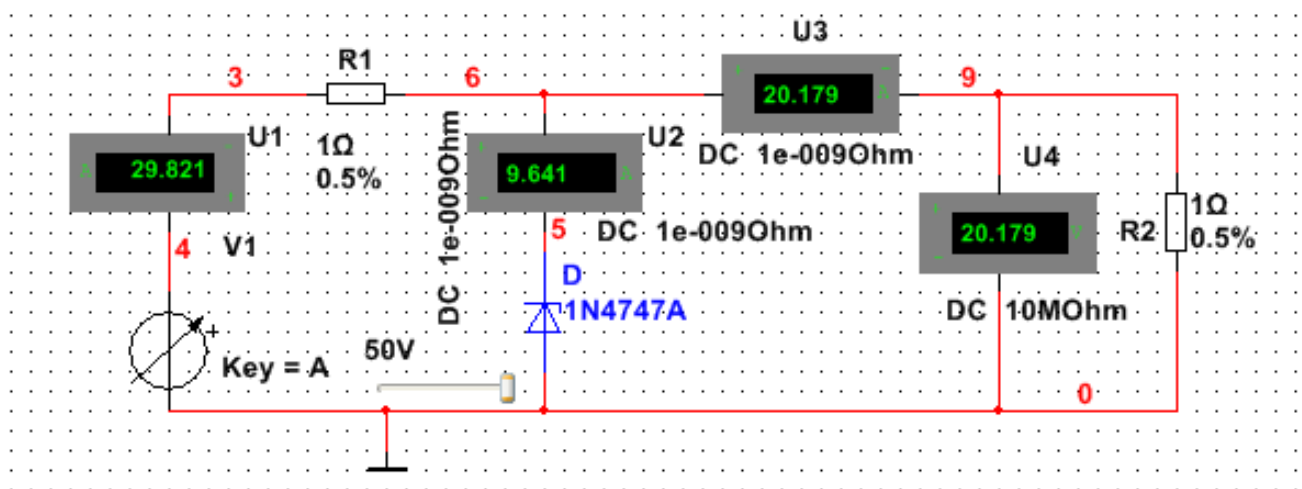


Рис. 3.35. Схема стабилизации напряжения



Изменяя напряжение на входе схемы  $U_1$  с помощью ползунка от 40 В до 50 В, записать значения выходного напряжения  $U_2$ . Результаты записать в таблицу 3.7.

Таблица 3.7.

№ точки	1	2	3	4	5	6
$U_1, В$	40	42	44	46	48	50
$U_2, В$						

По данным таблицы построить зависимость выходного напряжения от входного, т.е. график функции  $U_2 = f(U_1)$ .

### 3.7. Контрольные вопросы

1. Вентильные свойства полупроводниковых диодов объясняются наличием  $p-n$ -перехода. Почему возникает этот переход и как уменьшить или увеличить его ширину?

2. ВАХ диода имеет две ветви – прямую и обратную. Какая ветвь используется в выпрямительных диодах, а какая – в стабилитронах?

3. Диод в каждой точке своей ВАХ характеризуется статическим и дифференциальным сопротивлениями, и эти сопротивления отличаются друг от друга. Чем вызвано такое отличие?

4. Выпрямительные диоды используются для целей выпрямления синусоидального напряжения сети. Привести схему однофазного двухполупериодного выпрямителя с идеальным диодом (диод, на котором нет падения напряжения) и начертить графики входного и выходного напряжений. Какие гармоники содержит кривая выпрямленного напряжения? Как уменьшить пульсации этого напряжения?

5. Полупроводниковый стабилитрон обладает стабилизирующим свойством. Чем объясняется это свойство? Привести схему стабилизатора напряжения и показать, как проявляется это свойство.

## 4. ЛР № 4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

**Цель работы:** освоение программы Multisim для снятия ВАХ биполярных транзисторов и исследования электрических схем усиления электрических сигналов.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

#### 4.1. Транзистор с биполярным переходом

Транзистор с биполярным переходом (BJT - bipolar junction transistor).

Одна из наиболее важных операций в электронике – это усиление. Усиление является процессом, при котором мощность сигнала увеличивается. *Дополнительная мощность берется от некоторого внешнего источника энергии.*

Транзистором называется полупроводниковый прибор, способный усиливать электрическую мощность.

Самым распространенным примером усиления с применением электроники является обычный радиоприемник. Сигнал, принимаемый антенной, очень слаб, обычно менее одного микроватта, но к громкоговорителю подводится мощность в несколько ватт. Дополнительная мощность берется от батареи или выпрямителя переменного напряжения.

Электронные усиливающие устройства обычно называют *активными* компонентами в отличие от не усиливающих элементов цепи, таких как резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, которые объединяются общим названием *пассивные* компоненты.

*Биполярный плоскостной транзистор*, больше известный как просто транзистор, является наиболее распространенным активным элементом в электронике. Условное обозначение транзистора показано на рис. 4.1.

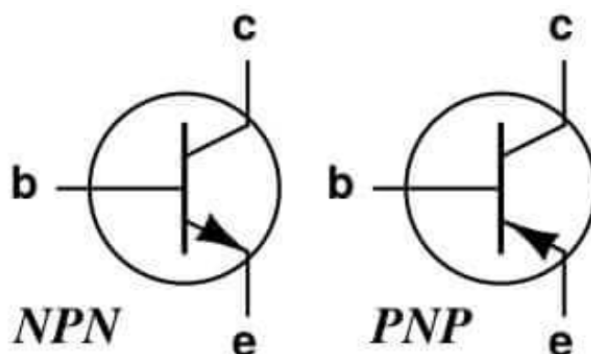


Рис. 4.1. Условное обозначение биполярного транзистора n-p-n и p-n-p типа

Транзистор является усиливающим устройством, который управляется током: если небольшой ток втекает в базу, то это приводит к появлению гораздо большего тока коллектора.

Рассмотрим пример, демонстрирующий усилительные свойства транзистора. Лампа накаливания включена в цепь коллектора (рис. 4.2). Так как база отключена от источника питания, то в базу ток не поступает, транзистор закрыт и через него проходит малый ток утечки коллектор-эмиттер, недостаточный для свечения лампы.

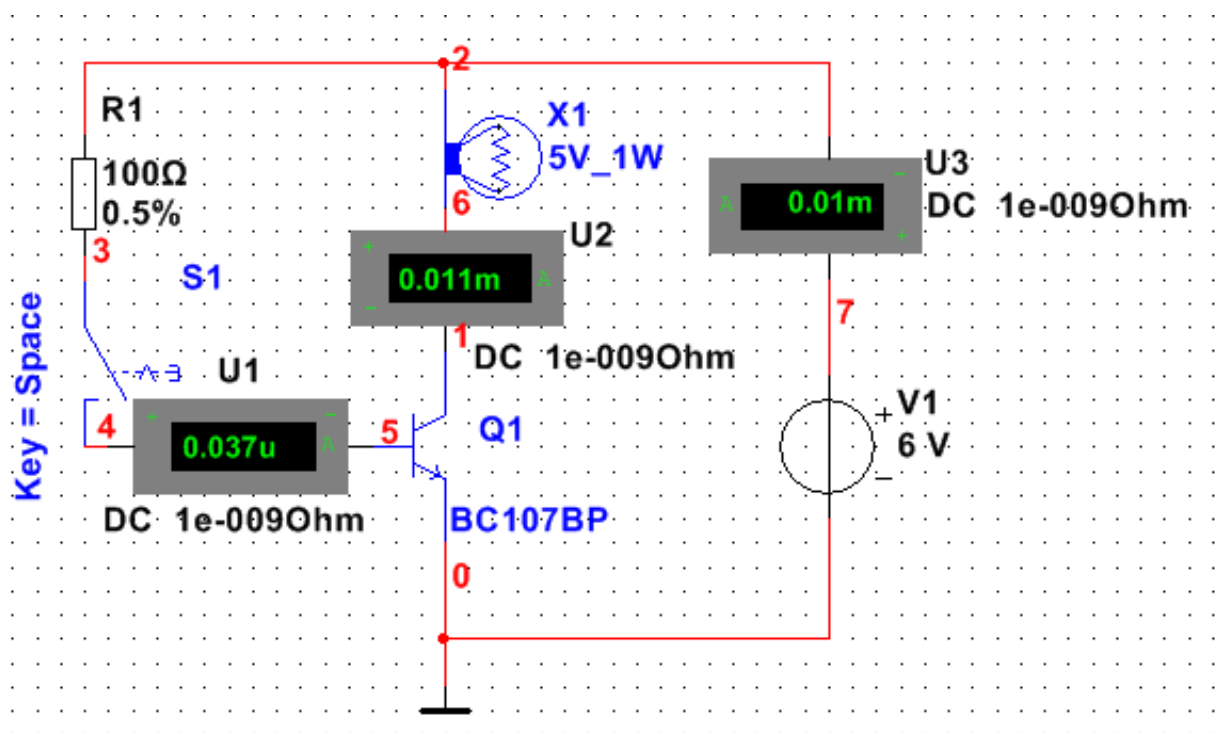


Рис. 4.2. Экспериментальная цепь с лампой. Слабый ток через транзистор не вызывает свечение лампы

Подключим базу к источнику ЭДС (рис. 4.3). В цепь базы включено большое сопротивление, так что ток база достаточно мал (0,05 А). Но теперь ток коллектора достигает большого значения (0,23 А), достаточного для свечения лампы.

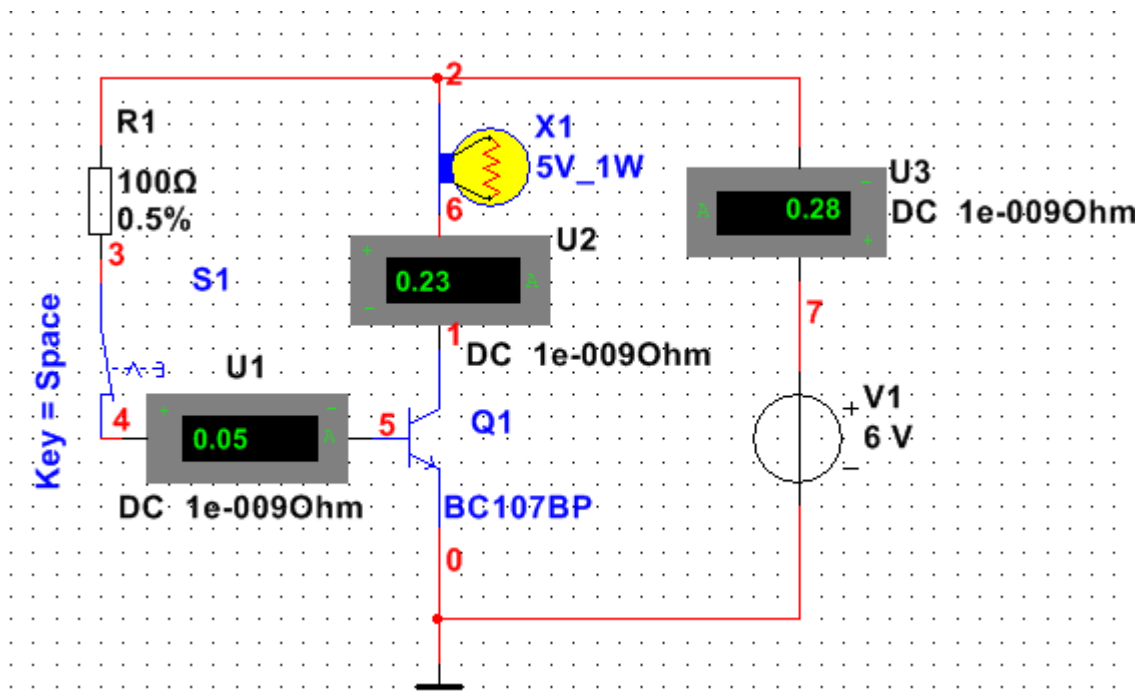


Рис. 4.3. Экспериментальная цепь с лампой. Небольшой ток базы приводит к свечению лампы

Уменьшим еще больше ток базы, увеличив сопротивление в ее цепи (рис. 4.4).

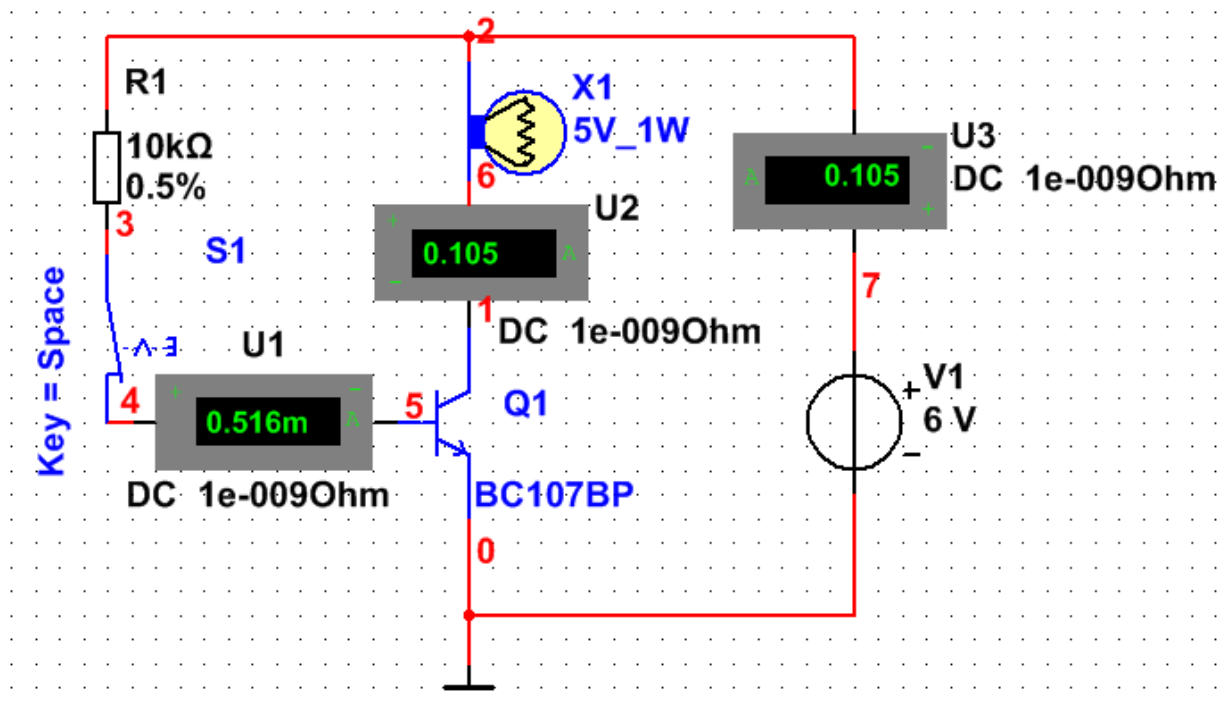


Рис. 4.4. Экспериментальная цепь с лампой. Даже очень небольшой ток базы приводит к свечению лампы

Подсчитаем коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{0,105}{0,516 \cdot 10^{-3}} \approx 200.$$

## 4.2. Принцип действия транзистора

Биполярный транзистор – это полупроводниковый элемент с двумя выпрямляющими электрическими  $p$ - $n$ -переходами и тремя выводами, которые называют *базой* (В), *эмиттером* (Е) и *коллектором* (С). Различают дискретные транзисторы, предназначенные для монтажа на платах и заключенные в собственный корпус, и интегральные транзисторы, которые изготавливаются совместно с другими полупроводниковыми элементами на общей полупроводниковой подложке. Интегральные транзисторы снабжаются четвертым выводом. Он называется *подложкой* (S) и играет второстепенную роль в функционировании транзистора.

В биполярном транзисторе одновременно используются два типа носителей зарядов – электроны и дырки (отсюда и название – биполярный). Выпрямляющие переходы образованы тремя областями с чередующимися типами проводимости. В зависимости от чередования этих областей различают транзисторы  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$  типа. В микроэлектронике предпочтение отдано транзисторам  $n$ - $p$ - $n$  типа.

Принцип работы БТ рассмотрим на примере транзистора  $n$ - $p$ - $n$  -типа, работающего в активном режиме, для которого концентрация основных носителей в  $n$ -области существенно выше, чем в  $p$ -области, т.е. справедливо неравенство  $nn \gg pp$ . Для данной структуры (рис. 4.5) левую  $n$ -область называют эмиттером. Эта область инжектирует электроны в соседнюю  $p$ -область. Процесс внесения неосновных носителей в соседние области называют *инжекцией*.

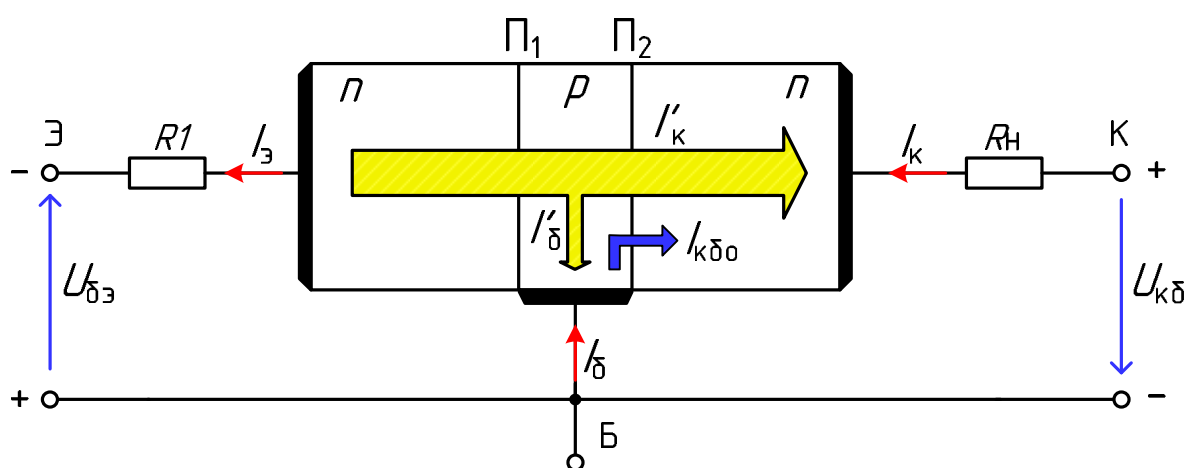


Рис. 4.5. Принцип действия биполярного транзистора

Правую на рисунке  $n$ -область называют коллектором. Эта область должна экстрактировать находящиеся в соседней  $p$ -области электроны. Процесс вытягивания неосновных носителей из соседних областей назы-

вают *экстракцией*. Средняя область называется *базой*. Примыкающий к эмиттеру *p-n*-переход ( $\Pi_1$ ) называют эмиттерным, а примыкающий к коллектору ( $\Pi_2$ ) – коллекторным. Металлические выводы, привариваемые или припаиваемые к полупроводниковым областям, называют соответственно эмиттерным, коллекторным и базовым выводами.

Приложим к переходу  $\Pi_1$  прямое напряжение  $U_{БЭ}$ , а к переходу  $\Pi_2$  – обратное напряжение  $U_{КБ}$ . В результате через эмиттерный переход  $\Pi_1$  в область базы будут инжектировать электроны, образуя эмиттерный ток транзистора  $I_{Э}$ . Инжекцией дырок из базы в эмиттер можно пренебречь, так как база является очень тонкой: толщина слоя базы меньше длины свободного пробега носителей заряда этой области. Поток электронов, создающий ток  $I_{Э}$ , показан на рисунке широкой заштрихованной стрелкой.

Небольшая часть инжектированных в область базы электронов рекомбинирует с основными для этой области носителями заряда – дырками, образуя ток базы  $I_{Б}$ . Остальные инжектированные электроны достигают коллекторного перехода  $\Pi_2$  и экстрактируются в коллектор благодаря наличию напряжения  $U_{КБ}$  (соответствующей полярности в нормальном режиме работы), образуя коллекторный ток  $I_{К} = \alpha I_{Э}$ . Коэффициент передачи тока эмиттера составляет  $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ .

Благодаря указанной полярности напряжения  $U_{КБ}$  переход  $\Pi_2$  заперт, но через него из *n*-области (коллектор) в *p*-область (база) может проходить обратный ток  $I_{КБ0}$ , образованный потоком неосновных для коллекторной области носителей зарядов (дырок). Обратный ток совместно с током  $I_{К}$  образует выходной ток транзистора

$$I_{К} = I_{К}' + I_{КБ0} = \alpha I_{Э} + I_{КБ0}$$

и ток в базовом выводе

$$I_{Б} = I_{Б}' - I_{КБ0}.$$

Учитывая, что  $I_{Э} \gg I_{КБ0}$ , можно на практике использовать соотношение

$$I_{К} \approx \alpha I_{Э}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа ток базы представляет собой разность эмиттерного и коллекторного токов:

$$I_{Б} = I_{Э} - I_{К} = \frac{I_{К}}{\alpha} - I_{К} = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) I_{К} = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) I_{К}.$$

Отсюда получает выражение для тока коллектора через ток базы:

$$I_{К} = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_{Б} = \beta I_{Б}.$$

В этом выражении величина  $\beta$  – это *динамический коэффициент передачи тока базы*:

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Учитывая приведенные выше значения  $\alpha$ , можно заключить, что  $\beta$  лежит в пределах  $\beta \approx 20 \dots 100$ , то-есть  $\beta \gg 1$ .

Из полученных выше выражений

$$I_K \approx \alpha I_{\mathcal{E}} \quad \text{и} \quad I_K = \beta I_B$$

следует, что транзистор представляет собой управляемый элемент, так как значение его коллекторного тока  $I_K$  зависит от значений токов эмиттера  $I_{\mathcal{E}}$  и базы  $I_B$ . Таким образом, *биполярный транзистор является электронным прибором, управляемым током*.

Сопротивление обратно смещенного коллекторного перехода  $\Pi_2$  (при подаче на него обратного напряжения) очень велико (несколько мегаом). Поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузочные резисторы с весьма большими сопротивлениями, не изменяя значения коллекторного тока. Соответственно в цепи нагрузки будет выделяться значительная мощность. Сопротивление прямосмещенного эмиттерного перехода  $\Pi_1$ , напротив, весьма мало (десятки ом). Поэтому при почти одинаковых значениях эмиттерного и коллекторного токов мощность, потребляемая в цепи эмиттера, оказывается существенно меньше мощности, выделяемой в цепи нагрузки. Это указывает на то, что транзистор является полупроводниковым прибором, усиливающим мощность.

С другой стороны, малые значения входного напряжения (прямое смещение эмиттерного перехода, составляющие десятые доли вольта) и большие значения выходного напряжения (обратное смещение коллекторного перехода, составляющее десятки вольт) указывают на то, что этот управляемый элемент может применяться для усиления напряжения.

**Режимы работы.** Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают следующие четыре режима работы транзистора.

*Нормальный* или *активный режим* – на эмиттерный переход подано прямое напряжение, на коллекторный – обратное. В активном режиме управление транзистором осуществляется наиболее эффективно, причём транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы. Именно этот режим работы транзистора соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальные искажения усиленного сигнала при работе транзистора в схеме усилителя.

*Инверсный режим* – к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному – обратное. Так как коэффициент передачи тока эмиттера незначителен по сравнению с нормальным режимом, инверсный режим на практике применяется крайне редко.

*Двойной инжекции* или *насыщения* – оба перехода (эмиттерный и коллекторный) находятся под прямым напряжением, т.е. открыты. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения между выводами коллектора и эмиттера режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала.

*Режим отсечки* – к обоим переходам подведены обратные напряжения, т.е. оба *p-n*-перехода закрыты. Так выходной ток в режиме отсечки практически равен нулю, этот режим используется для размыкания цепей передачи сигнала.

**Основным режимом работы биполярного транзистора в аналоговых электронных устройствах является нормальный режим.**

### **4.3. Схемы включения и основные параметры**

Биполярный транзистор как усилительный элемент может быть представлен в виде четырехполюсника, вернее, проходного четырехполюсника. Один из выводов транзистора может принадлежать как входу, так и выходу. В зависимости от того, какой из трех выводов транзистора является общим для входа и выхода транзистора, различают три схемы включения транзистора: 1) с общей базой (ОБ); 2) с общим эмиттером (ОЭ); 3) с общим коллектором (ОК).

Полярность подключения внешнего источника зависит от типа транзистора, рис. 4.7, а-б для *p-n-p* и в-г для *n-p-n*.

В схеме с ОБ входным током является ток эмиттера, а выходным – ток коллектора. В схеме с ОЭ входным током является ток базы, а выходным – ток коллектора.

### **4.4. Статические вольтамперные характеристики транзисторов**

Транзистор как четырехполюсник может быть представлен входной и выходной статическими ВАХ. Их называют статическими, так снимают при относительно медленных изменениях тока и напряжения.

*Входная* характеристика показывает зависимость входного тока от входного напряжения (при постоянном значении выходного напряжения). *Выходная* характеристика показывает зависимость выходного тока от выходного напряжения (при постоянном входном токе транзистора).

Вид характеристик зависит от способа включения транзистора. В работе исследуются ВАХ транзисторов, включенных по схеме с ОЭ.



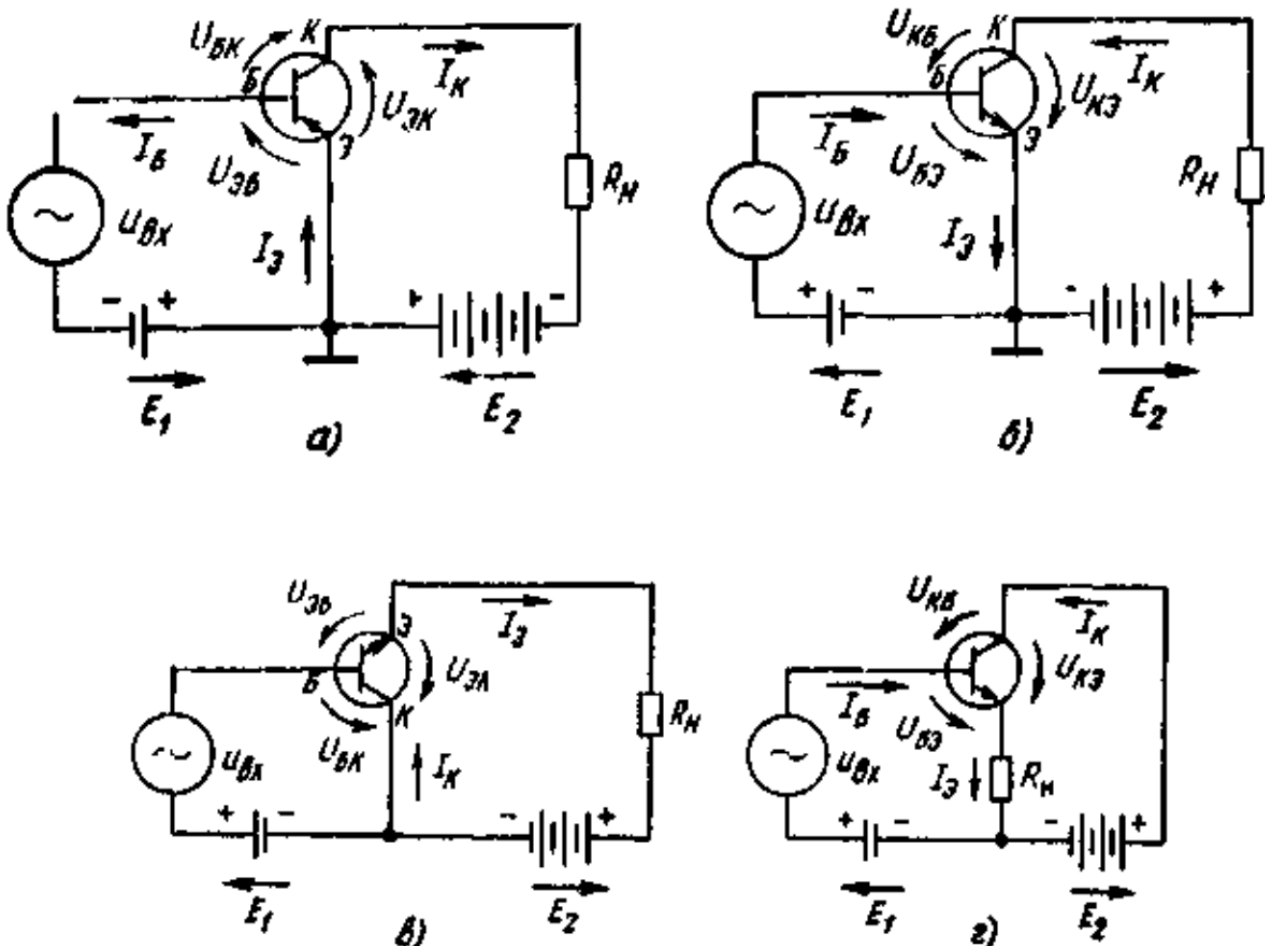


Рис. 4.6. Включение биполярного транзистора в схемах с ОБ, ОЭ и ОК.

Статические входные и выходные характеристики биполярного транзистора  $n-p-n$  типа для схемы включения с ОЭ приведены на рис. 4.7.

Характеристики имеют явно нелинейный характер. При этом входные ВАХ подобны прямой ветви ВАХ диода, а выходные характеризуются вначале резким возрастанием выходного тока  $I_K$  при возрастании выходного напряжения  $U_{КЭ}$ , а затем, по мере дальнейшего роста напряжения, незначительным его увеличением. Переход значений выходного тока на пологий участок характеристики соответствует области границы насыщения транзистора, когда оба перехода открыты ( $U_{БЭ} > 0$  и  $U_{КБ} > 0$ ).

На выходной характеристике можно выделить три области, отвечающим различным режимам работы транзистора: *насыщения* (заштрихованная область левее линии  $OA$  – режим двойной инжекции); *отсечки* (заштрихованная область ниже линии  $OB$  – режим двойной инжекции, соответствующая закрытому состоянию транзистора, когда  $U_{БЭ} < 0$  и  $U_{КБ} < 0$ ); *активной* (незаштрихованная область между линиями  $OA$  и  $OB$ ), соответствующая активному состоянию транзистора, когда  $U_{БЭ} > 0$  и  $U_{КБ} < 0$  – нормальный режим работы транзистора. Следует отметить, что самая нижняя выходная характеристика, для которой  $I_K = I_{КБ0}$ , соответствует току базы  $I_B = -I_{КБ0}$ , а не  $I_B = 0$ . Однако практически область отсечки можно

считать уже область, расположенную ниже выходной характеристики, соответствующей  $I_B = 0$ .

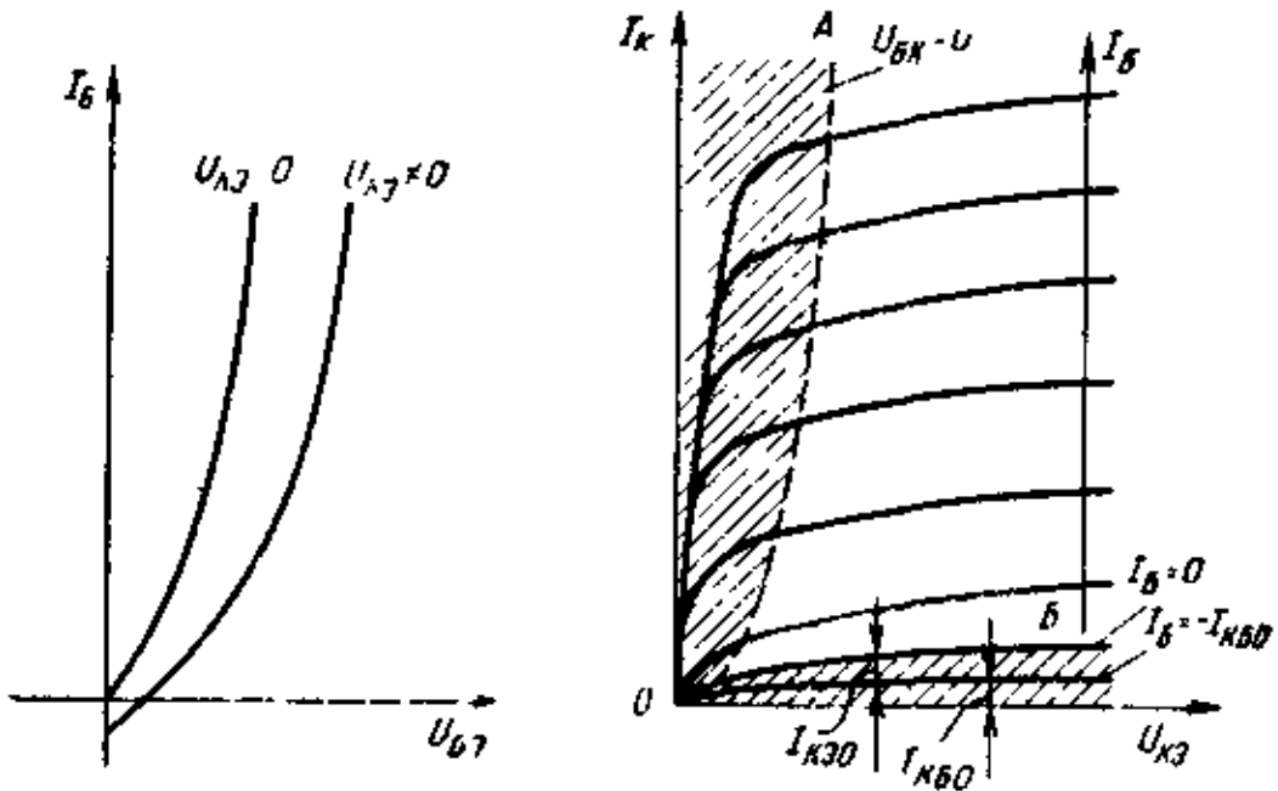


Рис. 4.7. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ

Семейства характеристик, которые связывают напряжения и токи на выходе с токами и напряжениями на входе, называют *характеристиками передачи* или *управляющими характеристиками*. В качестве примера на рис. 4.8 приведена управляющая характеристика по току транзистора (коэффициент передачи тока) при постоянном напряжении на коллекторе  $U_K = \text{const}$ , то есть

$$I_K = f(I_B) \Big|_{U_K = \text{const}}.$$

Входные и выходные характеристики транзистора обычно приводятся в справочниках (каталогах), которые используют для анализа работы транзисторов и расчета схем при больших сигналах.

В режиме усиления малых сигналов транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника с уравнениями в  $h$ -форме, записанные для приращений входных и выходных электрических величин.

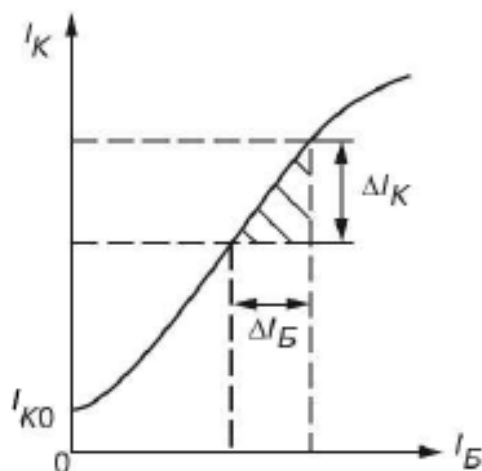


Рис. 4.8. Управляющая характеристика по току транзистора

В качестве независимых переменных принимают приращения входного тока и выходного напряжения, а в качестве зависимых – приращения входного напряжения и выходного тока:

$$\begin{cases} \Delta U_{БЭ} = h_{11} \cdot \Delta I_B + h_{12} \cdot \Delta U_{КЭ}; \\ \Delta I_K = h_{21} \cdot \Delta I_B + h_{22} \cdot \Delta U_{КЭ}. \end{cases}$$

Определим физический смысл  $h$ -параметров. При этом учтем, что приращение постоянной величины равно нулю: если  $U = \text{const}$ , то  $\Delta U = 0$ .

*Входное сопротивление* транзистора при неизменном выходном напряжении ( $\Delta U_{КЭ} = 0$ ):

$$R_{\text{вх}} = h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ}=\text{const.}}$$

Для большинства транзисторов  $h_{11} = 100 - 1000 \text{ Ом}$ .

*Коэффициент внутренней обратной связи по напряжению* при неизменном входном токе ( $\Delta I_B = 0$ ):

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B=\text{const.}}$$

При расчетах этим безразмерным коэффициентом часто пренебрегают, так как его значения лежат в пределах:  $h_{12} = 0,002 - 0,0002$ .

*Коэффициент передачи (усиления) тока* при неизменном выходном напряжении ( $\Delta U_{КЭ} = 0$ ):

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ}=\text{const.}}$$

Этот коэффициент также обозначают  $K_I$  или  $\beta$ . Обычно  $h_{12} = 10\text{--}200$ .  
*Выходная проводимость* транзистора при неизменном входном токе базы ( $\Delta I_B = 0$ ):

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = \text{const.}}$$

Обычно  $h_{22} = 10^{-4}\text{--}10^{-6}$  См.

Все  $h$ -параметры определяются по входным и выходным ВАХ транзистора.

#### 4.5. Построение ВАХ транзисторов с помощью характеристикографа

С помощью прибора IV analyzer можно строить как входные, так и выходные характеристики транзисторов.

*Входная характеристика* – это характеристика  $p$ - $n$ -перехода эмиттер-база, т.е. ВАХ диода. Ниже приведены две входные характеристики при двух значениях напряжения между коллектором и эмиттером:  $U_{КЭ} = 0$  (рис. 4.9) и  $U_{КЭ} = 2,258$  (рис. 4.10). Сравнение значений входного напряжения при одном и том же входном токе показывает, что входная характеристика при  $U_{КЭ} > 0$  сдвинута вправо.

Для снятия первой характеристики нужно закоротить эмиттер и коллектор.

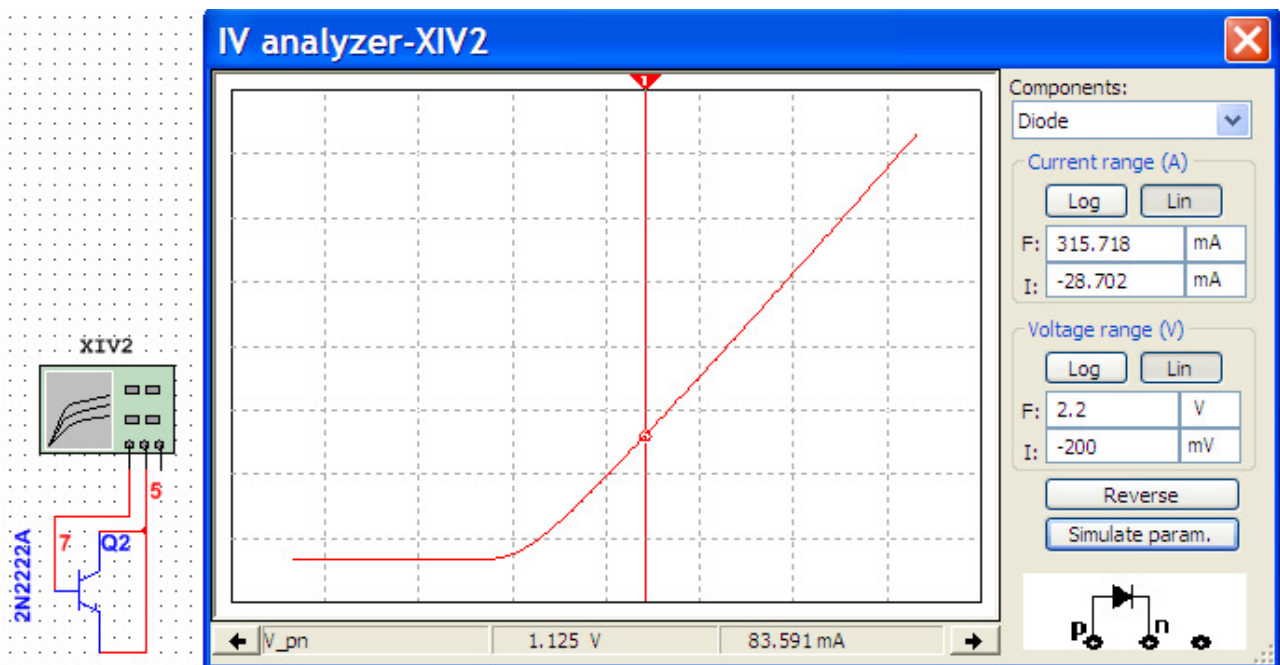


Рис. 4.9. Входная характеристика при напряжении  $U_{КЭ} = 0$  В

Для снятия второй характеристики нужно между эмиттером и коллектором подключить источник ЭДС с дополнительным резистором.

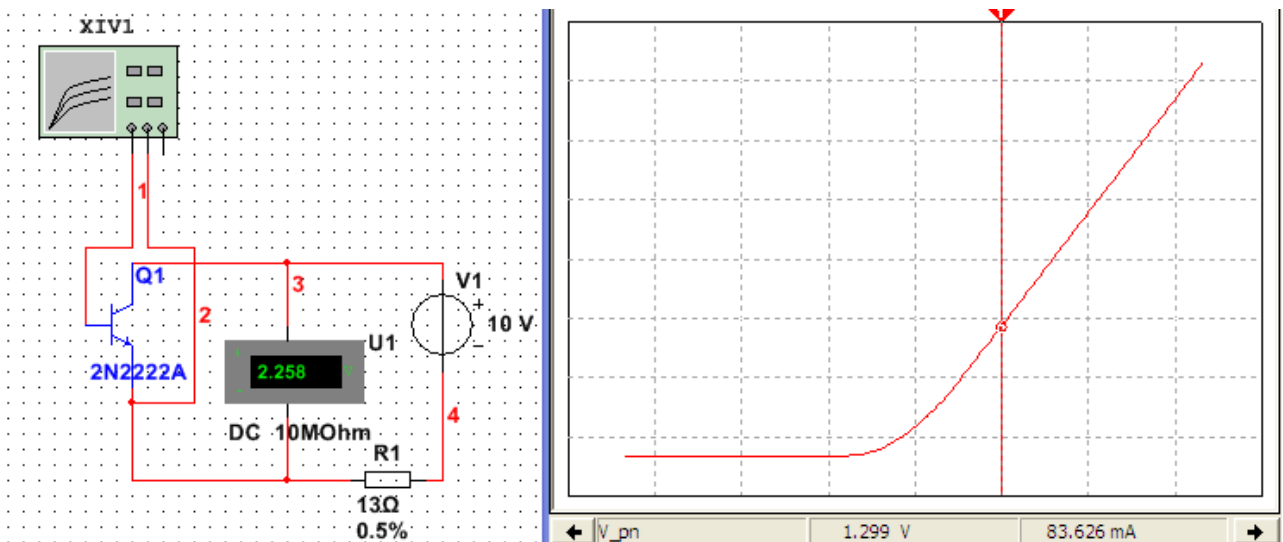


Рис. 4.10. Входная характеристика при напряжении  $U_{КЭ} = 2,258 \text{ В}$

Перейдем к построению выходных характеристик, учитывая информацию для диодов, приведенную в работе №2.

Выходная характеристика показывает зависимость тока  $I_K$  от напряжения  $U_{КЭ}$  при постоянном токе базы:  $I_B = \text{const}$ . При этом ток базы является тем *параметром*, меняя который можно получить семейство выходных характеристик (рис. 4.11). ВАХ, приведенные на рисунке, сняты с помощью характериографа IV Analyzer. Соответствующие выводы транзистора подключены к входам прибора в соответствии со схемой, приведенной на панели прибора, после выбора из окна **Components** транзистора **BJT NPN**.

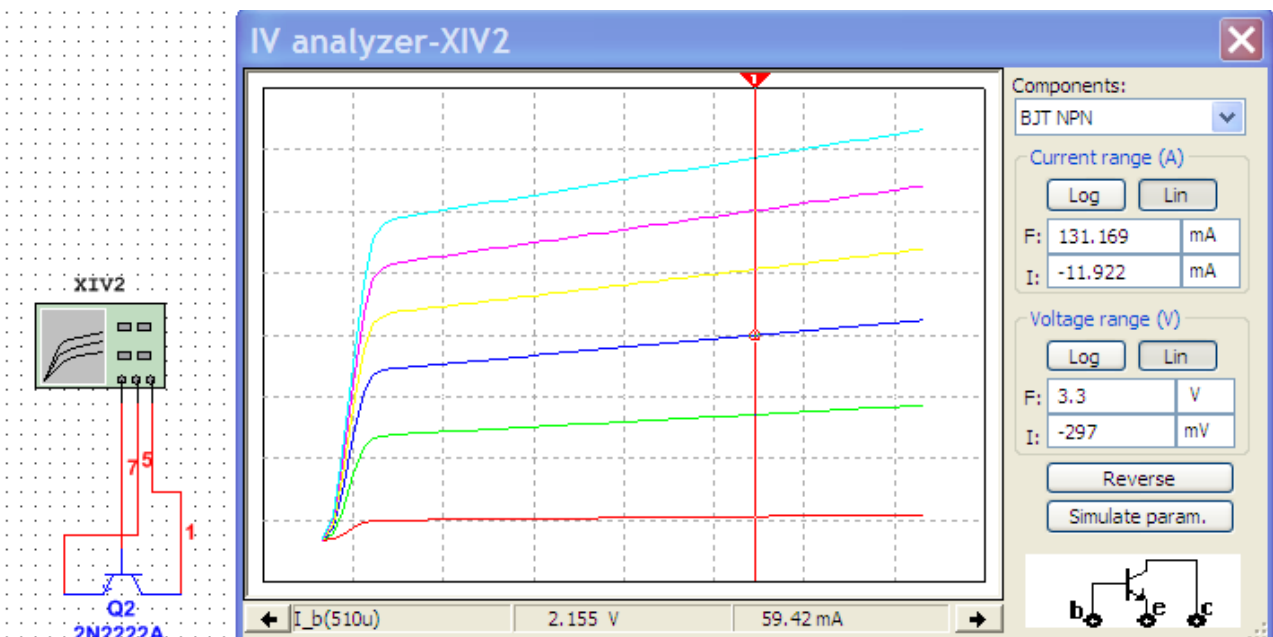


Рис. 4.11. Семейство выходных ВАХ транзистора 2N2222A

Границы изменения напряжения на коллекторе  $V_{ce}$ , тока базы  $I_b$  и числа фиксированных уровней тока базы (**Num steps**) можно установить в диалоговом окне **Simulate Parameters** (рис. 4.12), открываемом после щелчка мышью на заставке **Simulate Param**.

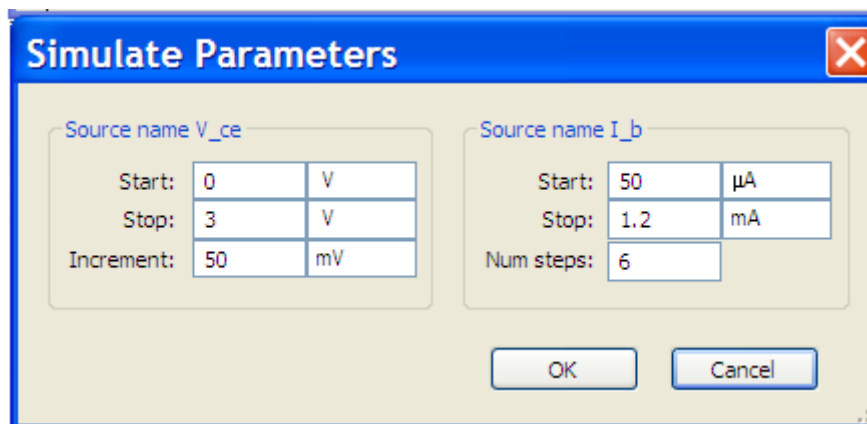


Рис. 4.12. Настройка параметров моделирования

Если щелкнуть правой кнопкой мыши в любом месте поля с характеристиками, то в этом месте откроется окно с надписями **Show select marks on trace** (выделение ВАХ маркерами) и **Select a trace** (выбор ВАХ из семейства по заданному току базы), рис. 4.13.

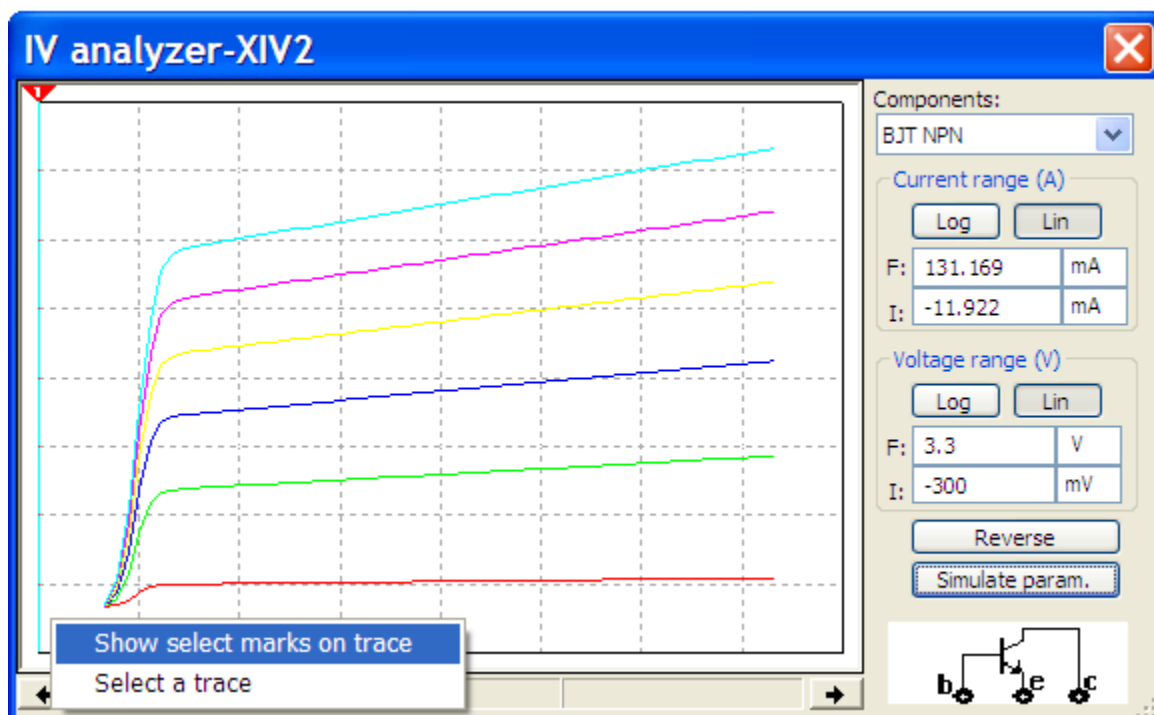


Рис. 4.13. Выбор ВАХ из семейства по заданному току базы  
Выбираем нужный ток базы из списка его значений (рис. 4.14)

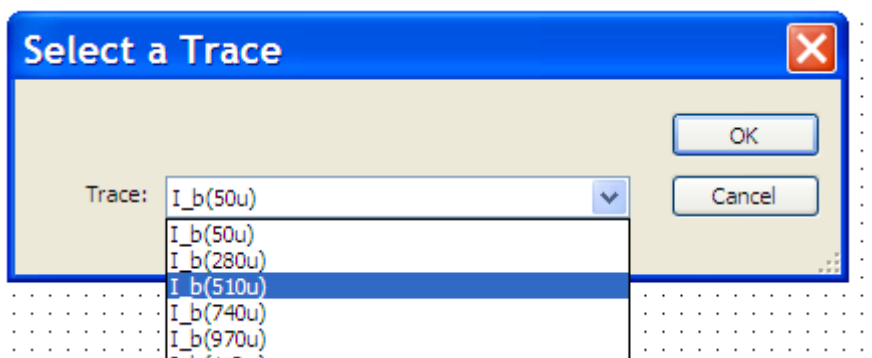


Рис. 4.14. Окно выбора кривой тока

После нажатия мышью на кнопку **ОК** выбранная ВАХ будет выделена треугольными маркерами (рис. 4.15). Перемещая визирную линию, конец которой находится слева с цифрой 1 в красном треугольнике, можно увидеть внизу рисунка значения тока базы **I<sub>b</sub>** (в левом нижнем углу рисунка) и координаты точки (значения  $U_{КЭ}$  и  $I_{к}$ ) выделенной ВАХ, в которой ее пересекает визирная линия.

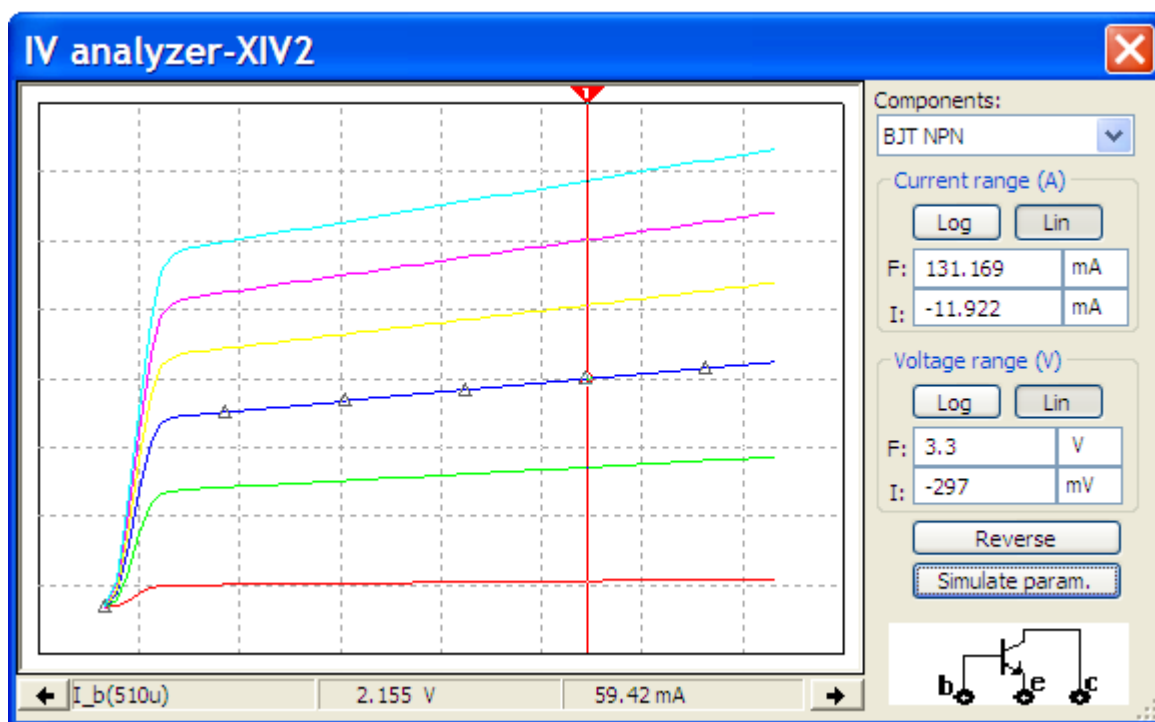


Рис. 4.15. Пример использования визирной линии

При щелчке мышью на любой характеристике маркеры перемещаются на нее, а в нижней строке выводятся значения тока базы и координаты точки пересечения визира с выделенной кривой ВАХ.

Найдем с помощью выходных характеристик два  $h$ -коэффициента.. Для этого запишем координаты двух точек при двух фиксированных положениях визира на линейном участке характеристики при при токе базы  $I_B = 510$  мкА:

$$U_{KЭ1} = 1,0 \text{ В}; \quad I_{K1} = 53,4 \text{ мА};$$

$$U_{KЭ2} = 2,155 \text{ В}; \quad I_{K2} = 59,4 \text{ мА}.$$

Выходные проводимость и сопротивление:

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{I_{K2} - I_{K1}}{U_{KЭ2} - U_{KЭ1}} = \frac{(59,4 - 53,4) \cdot 10^{-3}}{2,155 - 1,0} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$R_{вых} = \frac{1}{h_{22}} = \frac{1}{5,2 \cdot 10^{-3}} = 192,5 \text{ Ом}.$$

Теперь запишем два значения тока коллектора и два значения тока базы при фиксированном напряжении на коллекторе и вычислим коэффициент передачи тока транзистора:

$$U_{KЭ1} = 1,0 \text{ В};$$

$$I_{K1} = 53,4 \text{ мА}; \quad I_{B1} = 510 \text{ мкА};$$

$$I_{K2} = 85,9 \text{ мА}; \quad I_{B2} = 970 \text{ мкА}.$$

Коэффициент передачи тока:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{I_{K2} - I_{K1}}{I_{B2} - I_{B1}} = \frac{85,9 - 53,4}{(970 - 510) \cdot 10^{-3}} = 70,7.$$

Входное сопротивление определяем с помощью входной характеристики в двух точках (рис. 4.16, рис. 4.17).

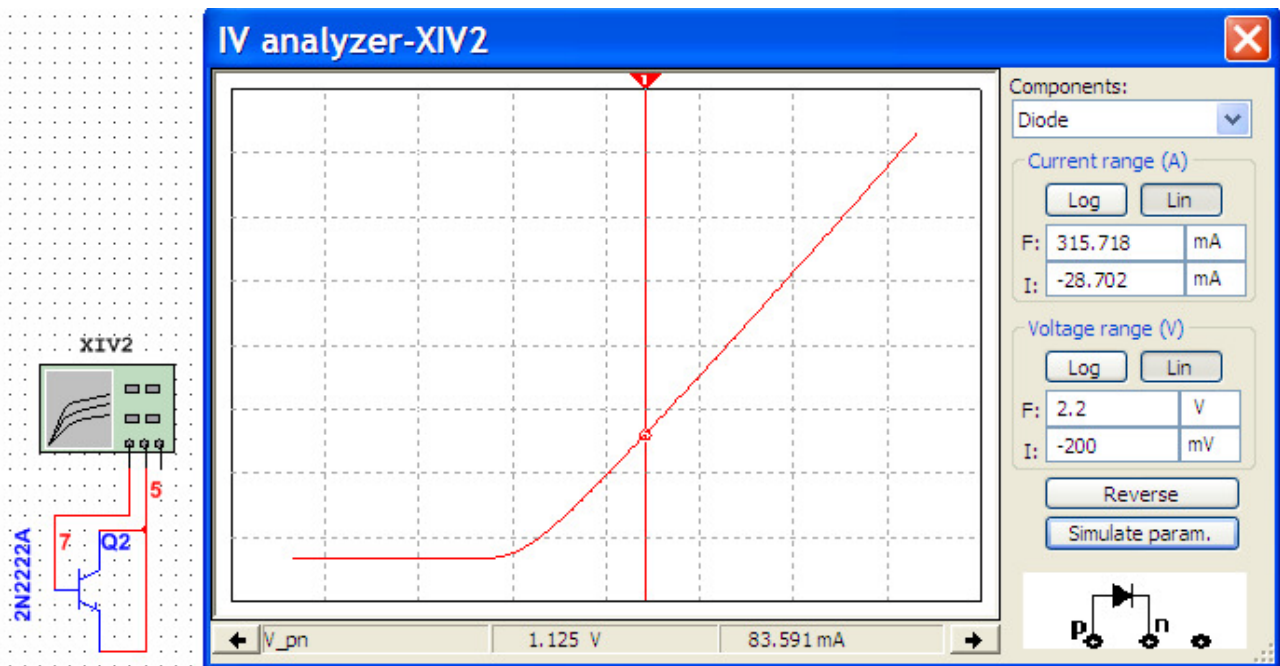


Рис. 4.16. Значения тока и напряжения в первой точке



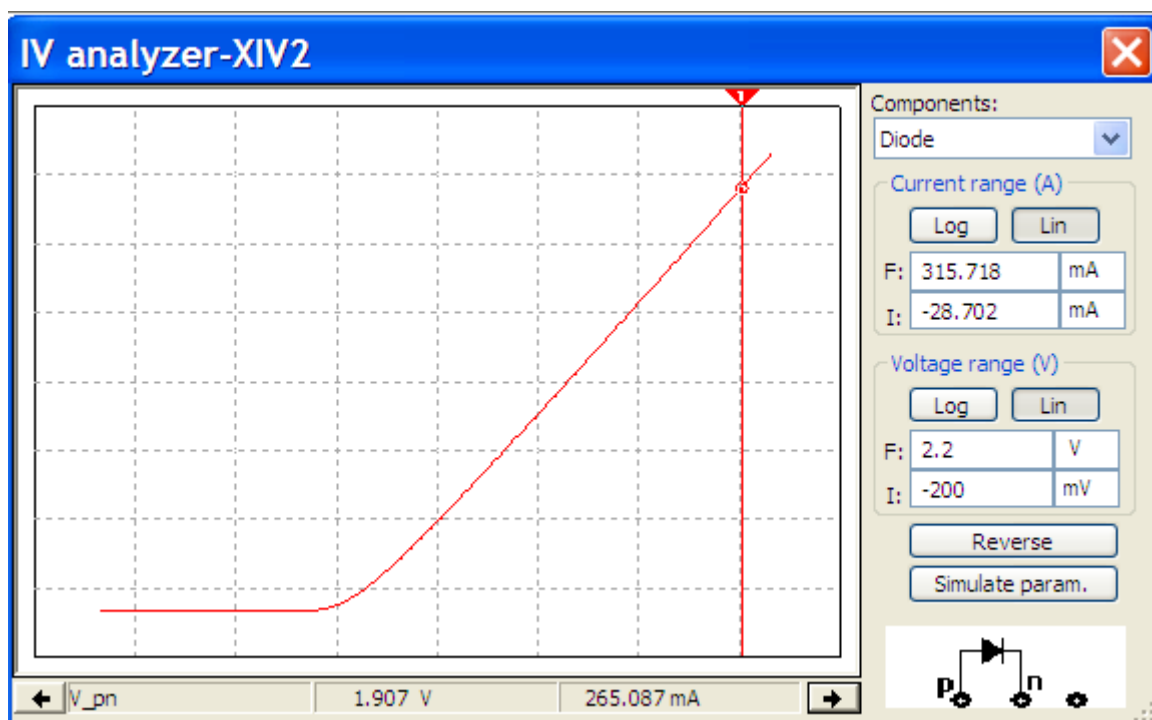


Рис. 4.17. Значение тока и напряжения во второй точке

Запишем координаты двух точек на входной характеристике:

$$U_{БЭ1} = 1,125 \text{ В}; \quad I_{Б1} = 83,59 \text{ mA};$$

$$U_{БЭ2} = 1,907 \text{ В}; \quad I_{Б2} = 265,09 \text{ mA}.$$

Входное сопротивление транзистора:

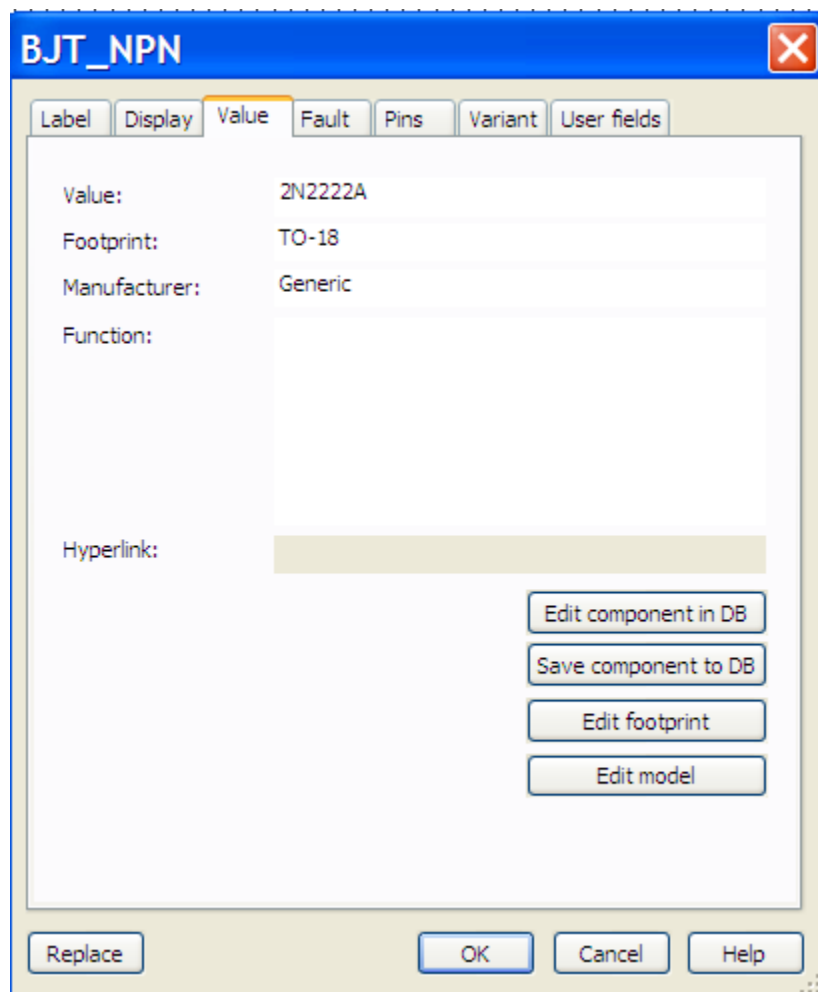
$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}} = \frac{1,907 - 1,125}{(265,09 - 83,59) \cdot 10^{-3}} = 4,3 \text{ Ом}.$$

Подробную информацию о параметрах выбранного транзистора можно найти в диалоговом окне, открываемом после двойного щелчка мышью и на изображении соответствующего прибора (рис. 4.18) и на закладке **Edit model**. Приведем некоторые параметры транзистора 2N2222A

Таблица 4.1.

Наименование параметра	Обозначение в Multisim и значение	Обозначение в работе и значение
Обратный ток коллекторного перехода	$IS = 2,046 \cdot 10^{-13} \text{ А}$	$I_{к0} = 0,2046 \text{ пА}$
Идеальный максимальный коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ	$BF = 296,5$	$h_{21} = \beta = 296,5$
Напряжение, близкое к максимальному на-	$VAF = 10 \text{ В}$	$U_{к.макс} = 10 \text{ В}$

Наименование параметра	Обозначение в Multisim и значение	Обозначение в работе и значение
пряжению коллектора		
Обратный ток эмиттерного перехода	$I_{SE} = 1,45 \cdot 10^{-13} \text{ A}$	$I_{\epsilon 0} = 0,145 \text{ пА}$
Максимальный ток коллектора	$I_{KF} = 0,07725 \text{ A}$	$I_{к.маx} = 77,25 \text{ мА}$



*Рис. 4.18. Диалоговое окно свойств транзистора*

Ниже приведен фрагмент окна, рис. 4.19.

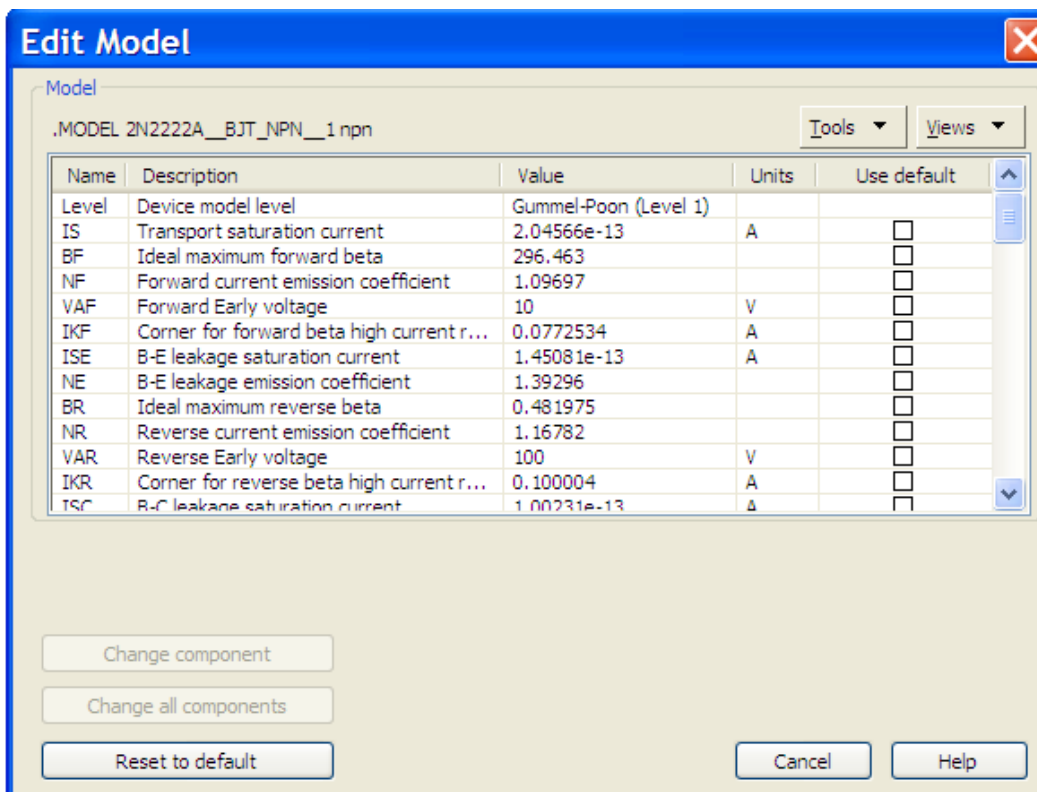


Рис. 4.19. Электрические свойства модели транзистора

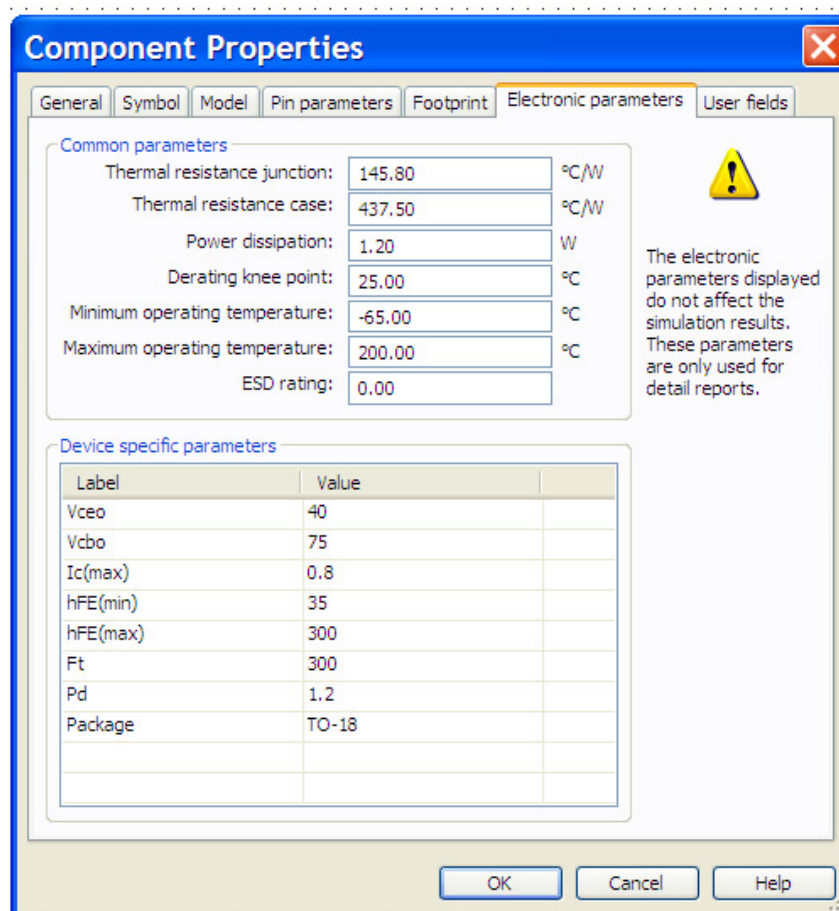


Рис. 4.20. Основные параметры модели транзистора

#### 4.6. Схема замещения транзистора в физических параметрах

Представление транзистора схемой замещения или эквивалентной схемой применяется для анализа цепей, содержащих транзисторы. Использование схемы, в которой все ее элементы связаны с внутренними (физическими) параметрами транзистора, создает удобство и наглядность при анализе влияния параметров прибора на показатели схем с транзисторами.

На рисунке 4.21 приведена схема замещения транзистора с ОЭ для переменных составляющих токов и напряжений применительно к расчету усилительных схем с транзисторами.

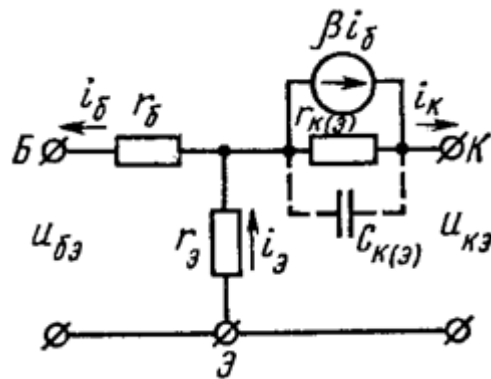


Рис. 4.21. Схема замещения транзистора в физических параметрах для схемы с ОЭ

Охарактеризуем элементы, входящие в схему замещения.

*Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода  $r_э$*  (включенного в прямом направлении). Позволяет учесть связь между напряжением на эмиттерном переходе  $u_э$  и проходящим через него током  $i_э$  и определяется выражением

$$r_э = \left. \frac{dU_э}{dI_э} \right|_{U_{кб} = \text{const.}}$$

Числовое значение  $r_э$  лежит в пределах от единиц до десятков ом.

*Объемное сопротивление базы  $r_б$* . Определяется в направлении базового тока и в пределах от 100 до 400 Ом.

*Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода*. Это сопротивление учитывает изменение коллекторного тока с изменением напряжения  $u_{кэ}$ .

*Источник тока, управляемый током*. Поскольку входным током в схеме с ОЭ является ток базы транзистора, в выходную цепь схемы замещения включен источник тока  $\beta i_б$ . Направления токов подчиняются условию  $i_э = i_к + i_б$ .

Емкость  $C_к$  обычно не учитывают.

**Классификация биполярных транзисторов.** Выпускаемые промышленностью дискретные транзисторы классифицируются обычно по двум параметрам: по мощности и по частотным свойствам.

По мощности они подразделяются на маломощные ( $P_{\text{вых}} \leq 0,3 \text{ Вт}$ ), средней мощности ( $0,3 \text{ Вт} < P_{\text{вых}} \leq 1,5 \text{ Вт}$ ) и мощные ( $P_{\text{вых}} > 1,5 \text{ Вт}$ ); по частотным свойствам – на низкочастотные ( $f \leq 0,3 \text{ МГц}$ ), средней частоты ( $0,3 \text{ МГц} < f \leq 3 \text{ МГц}$ ), высокой частоты ( $3 \text{ МГц} < f \leq 30 \text{ МГц}$ ) и сверхвысокой частоты ( $f > 30 \text{ МГц}$ ).

#### 4.7. Порядок выполнения работы

**Биполярный транзистор и его применение для целей усиления электрических сигналов.**

1). Снять семейство входных ВАХ (5 характеристик) транзистора BC107BP с помощью прибора **IV analyzer**, рис. 4.22 и рис. 4.23. Ток базы является параметром для этих ВАХ, т.е. каждому току базы  $I_b$  (в левом нижнем углу экрана) соответствует своя ВАХ. Нужно число точек и их расположение на каждой ВАХ выбирается автоматически с помощью команды **Show select marks on trace**, которая появляется после щелчка правой кнопкой мыши в любом месте поля с характеристиками. Построить входные ВАХ, указав над каждой из них значение тока базы.

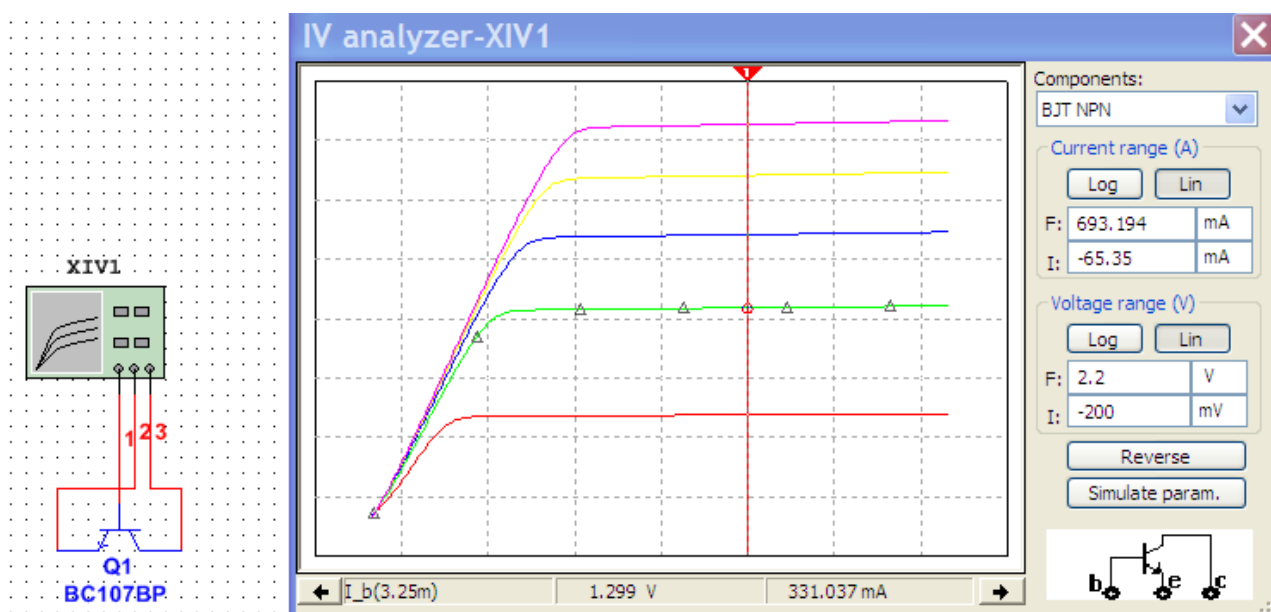


Рис. 4.22. Схема опыта для снятия ВАХ

2). Собрать электрическую схему усилителя на исследуемом транзисторе, рис. 4.24. Подключить вольтметры для измерения действующих значений выходного и входного сигналов. Получить и скопировать временные диаграмма входного и выходного сигналов. Цвет синусоиды соответствует цвету провода, которым подключен канал осциллографа.

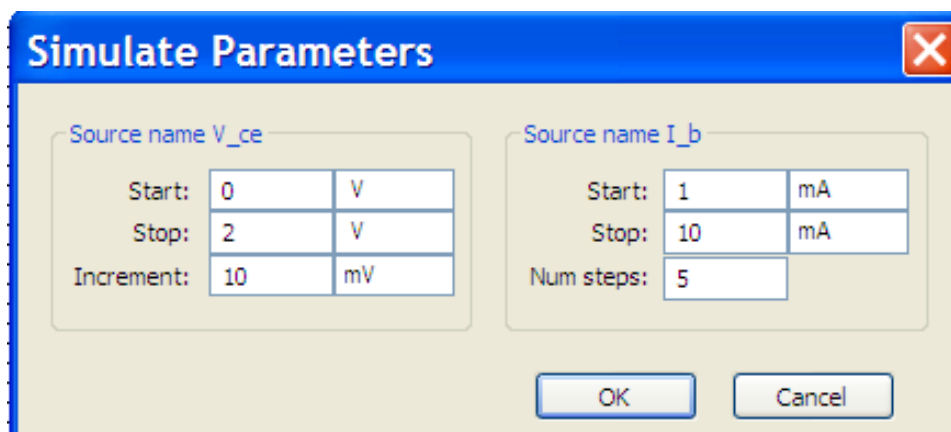


Рис. 4.23. Окно настройки параметров моделирования

Определить коэффициент передачи по напряжению как отношение амплитуд выходного и входного сигналов:  $K_u = U_{\text{мввых}}/U_{\text{мввх}}$ . Амплитуды синусоид определяются с помощью масштабов (**Scale**), которые указываются под каждым каналом, рис. 4.25. Выходной сигнал практически синусоидальный, поэтому  $K_u$  можно находить как отношение показаний вольтметров.

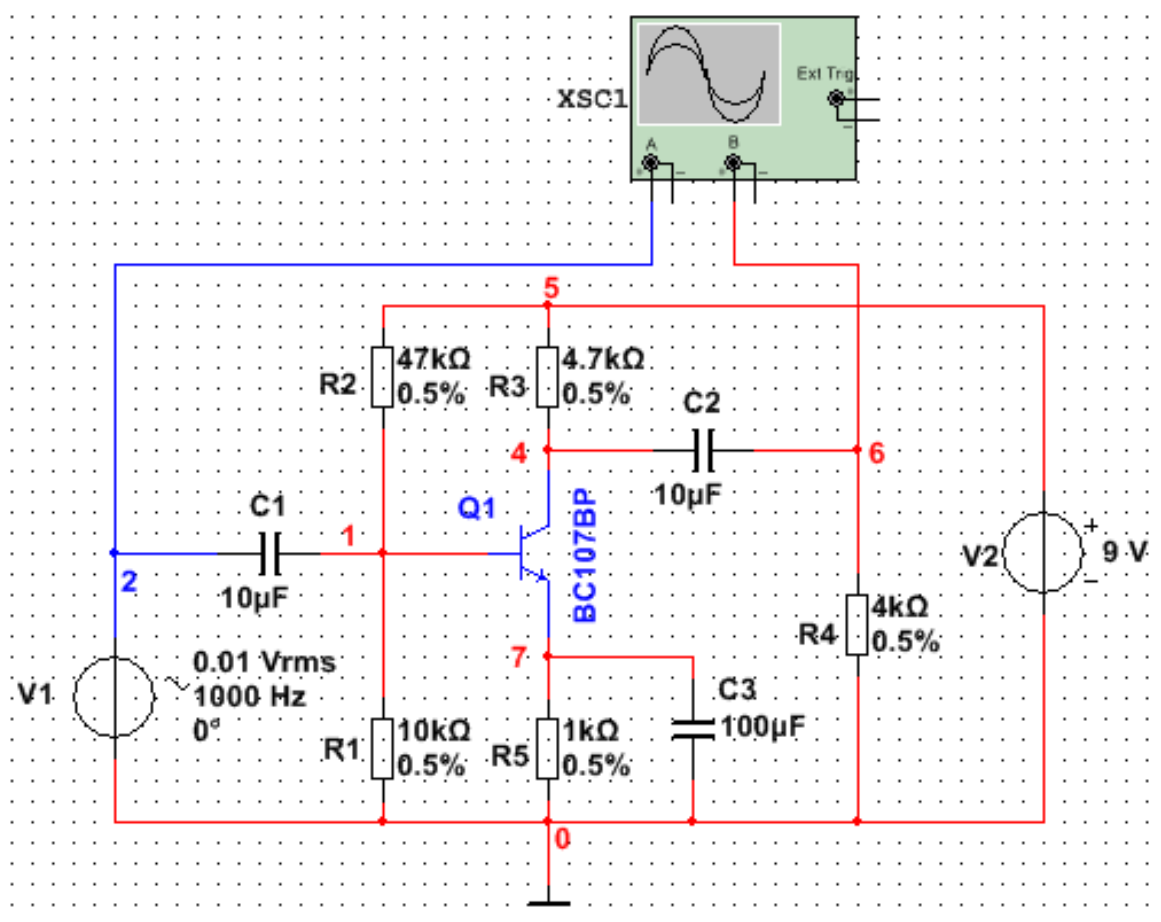


Рис. 4.24. Схема усилителя на биполярном транзисторе

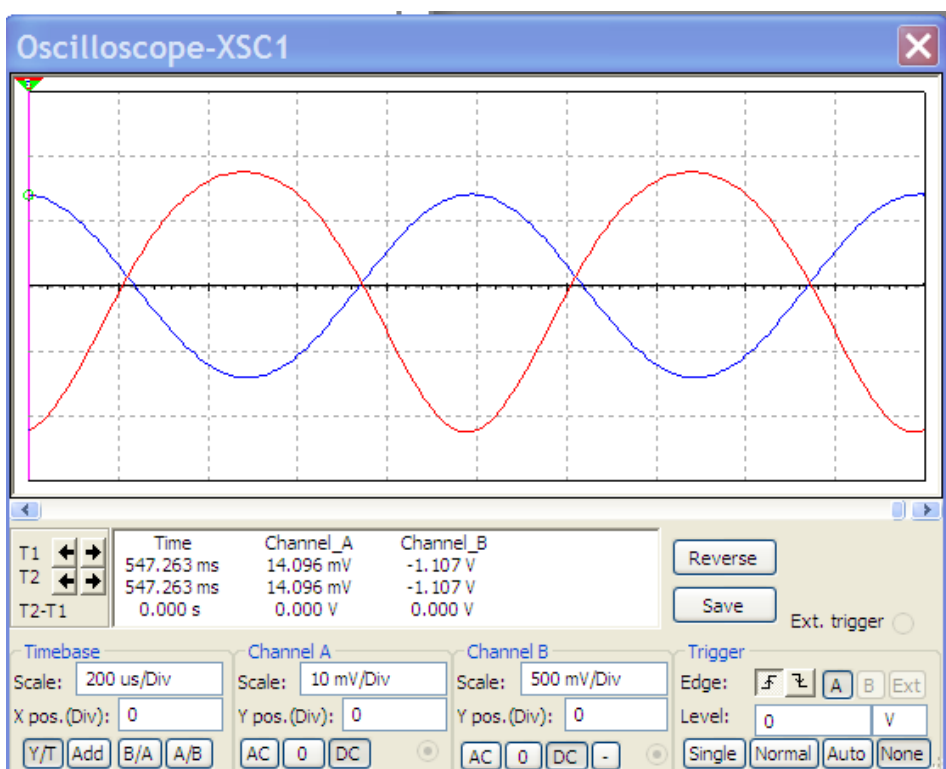


Рис. 4.25. Осциллограммы входного и выходного сигналов

При защите работы объяснить назначение каждого элемента схемы усилителя.

#### 4.1. Контрольные вопросы

1. Биполярный транзистор имеет два  $p-n$ -перехода, каждый из которых можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. Это позволяет получить четыре режима работы транзистора. Перечислите эти режимы и объясните особенности каждого из них.

2. Биполярный транзистор имеет три зажима, поэтому он является управляемым элементом. Название и вид ВАХ зависит от того, какая величина (ток или напряжение) является параметром, т.е. управляющей величиной? Приведите семейства входных и выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

3. Как с помощью программы Multisim снять входные и выходные ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

4. Основное назначение биполярного транзистора – усиление электрических сигналов. Имеются различные схемы усилителей, и каждая из них содержит много элементов. Рассмотрите схему, приведенную в лабораторной работе, и объясните назначение каждого из элементов этой схемы. Почему схема называется усилителем и что она усиливает?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электротехника и электроника: иллюстрированное учебное пособие / Под ред. Бутырина П.А.. - М.: Academia, 2018. - 892 с.
2. Барыбин, А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы / А.А. Барыбин. - М.: Физматлит, 2008. - 424 с.
3. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус. - М.: Техносфера, 2013. - 228 с.
4. Воронков, Э.Н. Твердотельная электроника. Практикум / Э.Н. Воронков. - М.: Academia, 2017. - 40 с.
5. Воронков, Э.Н. Твердотельная электроника: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Э.Н. Воронков, А.М. Гуляев, И.Н. Мирошникова. - М.: ИЦ Академия, 2009. - 320 с.
6. Герман-Галкин, С.Г. Силовая электроника. Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона Принт, 2010. - 304 с.
7. Гуртов, В.А. Твердотельная электроника: Учебное пособие / В.А. Гуртов. - М.: Техносфера, 2008. - 512 с.
8. Джонс, М. Электроника - практический курс / М. Джонс. - М.: Техносфера, 2013. - 512 с.
9. Ермуратский, П. Электротехника и электроника / П. Ермуратский, Г. Лычкина. - М.: ДМК, 2015. - 416 с.
10. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: Учебное пособие для бакалавров / Г.С. Зиновьев. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 667 с.
11. Кардашев, Г.А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств (МРБ1251) / Г.А. Кардашев. - М.: ГЛТ, 2012. - 260 с.
12. Колистратов, М.В. Электротехника и электроника: электротехника на оборудовании National Instruments: Лабораторный практикум / М.В. Колистратов, Л.А. Шапошникова; Под ред. Л.А. Шамаро. - М.: ИД МИ-СиС, 2012. - 79 с.
13. Кравченко, В.Б. Электроника и схемотехника: Учебное пособие / В.Б. Кравченко, Е.А. Бородкин. - М.: Academia, 2017. - 640 с.
14. Усенко В.И, Карпова Т.В, Русинов В.Л. Основы теории цепей: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2003.



Владислав Леонидович Русинов,  
*ст. преподаватель кафедры АПП и Э АмГУ;*

Валентин Иванович Усенко,  
*доцент кафедры АПП и Э АмГУ.*

**Электроника. Часть 1. Элементная база электроники. Диоды и биполярные транзисторы:** учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2022. – 105 с.

---