

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 29.12.2021 13:46:06  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb73e945df4a4851fda56d089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и средств связи



**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по учебной работе

О.Г.Локтионова

2017 г.

**РАСЧЕТЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ С  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДИОДАМИ ГРАФИЧЕСКИМ  
СПОСОБОМ**

Методические указания по проведению практических занятий  
для студентов специальностей 10.05.02, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03

УДК 621.38

Составитель В.Н. Усенков

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор *В.А. Шлыков*

**Расчеты нелинейных цепей с полупроводниковыми диодами графическим способом:** методические указания по проведению практических занятий / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Н. Усенков. - Курск, 2017. - 17 с.: ил. 9, табл. 2, прилож. 1. - Библиогр.: с. 16.

Рассматриваются теоретические сведения по применению графического метода расчета нелинейных цепей и варианты заданий для построения вольт-амперных характеристик и прохождения сигнала для таких цепей. Приводятся рекомендации по оформлению отчетов и контрольные вопросы.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальностям автоматике и электроники (УМО АЭ).

Предназначены для студентов специальностей 10.05.02, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03 дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл.печ.л. 0,99 . Уч.изд.л. 0,89 . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Содержание

Введение	4
1 Графический метод расчета цепей, содержащих нелинейный элемент	4
2 Построение ВАХ цепи, содержащей полу- проводниковый диод	12
3 Построение графика прохождения сигнала через нелинейную цепь	14
4 Список литературы	16
Приложение – Бланк для построения графиков	17

## Введение

Целью работ является освоение метода анализа простых нелинейных цепей с применением графического метода и приобретение навыков таких расчетов.

В качестве нелинейного элемента во всех работах рассматривается полупроводниковый диод.

Рассматриваемые задачи часто встречаются при проектировании выпрямителей для блоков питания, детекторов радиосигналов, цепей опорного напряжения и во многих других случаях.

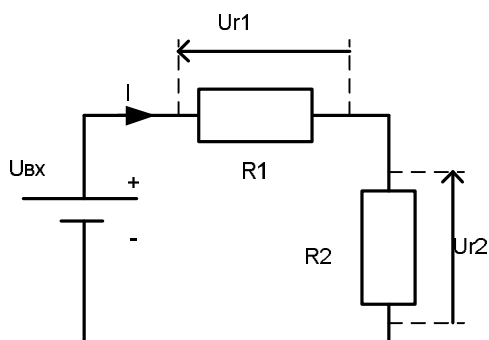
В связи с тем, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) полупроводниковых приборов зависят от материала, использованного при их производстве, технологического процесса производства и множества других факторов, при выполнении расчетных работ следует использовать справочные материалы, которые можно найти, например, в [1], [2], [3].

Также полупроводниковые диоды имеют существенную температурную зависимость, что необходимо учитывать при расчетах.

### 1 Графический метод расчета цепей, содержащих нелинейный элемент

Графический метод расчета прост для понимания и позволяет простым образом оценить зависимость между током и напряжением в цепи, содержащей нелинейные элементы. Однако применение этого метода возможно лишь тогда, когда известны индивидуальные зависимости каждого элемента.

Рассмотрим методику построения ВАХ последовательно соединенных элементов для цепи, приведенной на рис. 1.



## Рисунок 1 - Схема последовательного соединения элементов

В рассматриваемой схеме источник ЭДС считаем идеальным, а величину ЭДС предполагается изменять в некотором диапазоне, в том числе меняя полярность. Для простоты изначально предположим, что каждый из элементов - это резистор.

В этом случае, для каждого элемента индивидуально можно построить зависимость тока от входного напряжения при общей системе координат (Рисунок 3). Эту зависимость часто называют *вольт-амперной характеристикой (ВАХ)*.

ВАХ резистивного элемента проста и представляет собой прямую, проходящую через начало координат (рис.2). Наклон этой кривой напрямую связан с величиной сопротивления резистора.

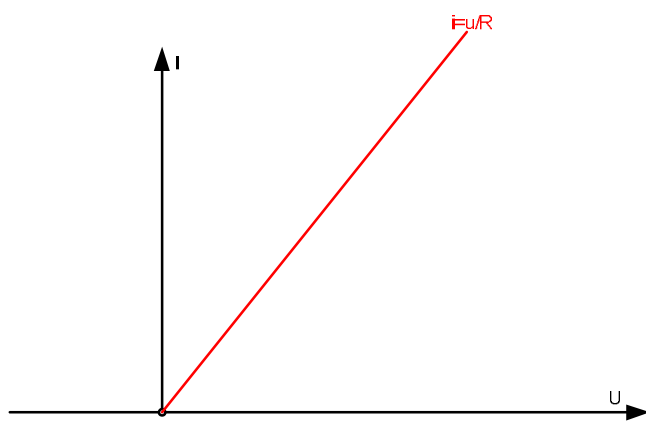


Рисунок 2 - ВАХ резистора

На рисунке 3  $i_1$  - это ВАХ для  $R_1$ ,  $i_2$  - ВАХ для  $R_2$ .

При последовательном соединении ток, протекающий в цепи, одинаков для каждого элемента, а напряжения на них суммируются, поэтому, для построения результирующей ВАХ всей цепи достаточно для выбранных значений тока на оси  $U$  отложить сумму падений напряжений на  $R_1$  и  $R_2$ . Например, для тока, обозначенного как  $I$ , падение напряжения на резисторе  $R_1$  соответствует отрезку  $U_1$ , падение напряжения на резисторе  $R_2$  соответствует отрезку  $U_2$ . Сумма  $U_1$  и  $U_2$  в таком случае даст значение для результирующей ВАХ.

Для случая линейных ВАХ, очевидно, достаточно выполнить построение для любого тока, отличного от нуля и провести линию через начало координат и полученную точку.

В общем случае, если один или оба элемента имеют нелинейную ВАХ, точек для построения результирующей ВАХ следует взять больше, ориентируясь на конкретный случай.

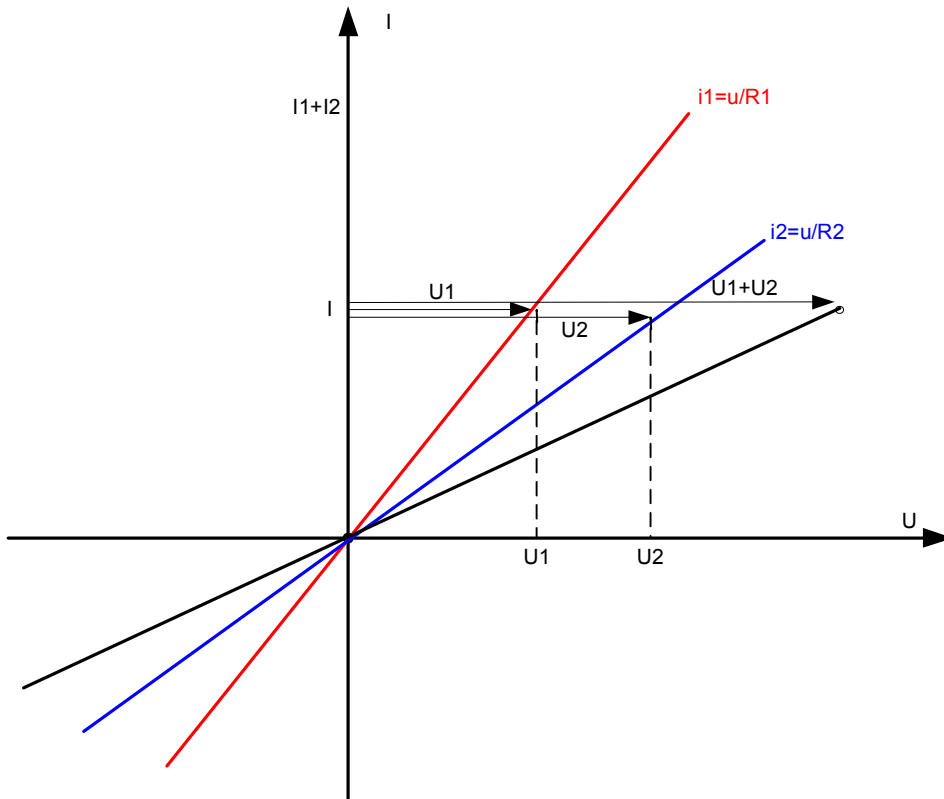


Рисунок 3 - ВАХ при последовательном соединении элементов

Рассмотрим методику построения ВАХ параллельно соединенных элементов для цепи, приведенной на рис.4.

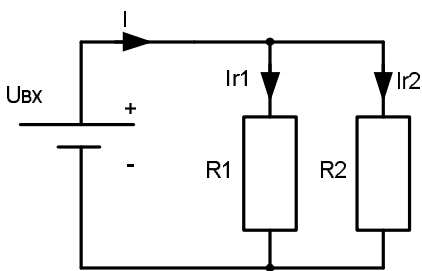


Рисунок 4 - Параллельное соединение элементов

В рассматриваемой схеме источник ЭДС считаем идеальным, а величину ЭДС предполагаем изменять в некотором диапазоне, в том числе меняя полярность. Для простоты предположим, что каждый из элементов - это резистор.

Как и в случае последовательного соединения, для каждого элемента индивидуально можно построить зависимость тока от

входного напряжения при общей системе координат (Рисунок 5). На этом рисунке  $i_1$  - это ВАХ для  $R_1$ ,  $i_2$  - ВАХ для  $R_2$ .

При параллельном соединении напряжение одинаково для каждого элемента, а токи через них суммируются, поэтому, для построения результирующей ВАХ всей цепи достаточно для выбранных значений напряжения на оси  $I$  отложить сумму токов через  $R_1$  и  $R_2$ .

Например, для напряжения, обозначенного как  $U$ , ток через резистор  $R_1$  соответствует отрезку  $I_1$ , ток через резистор  $R_2$  соответствует отрезку  $I_2$ . Сумма  $I_1$  и  $I_2$  в таком случае даст значение для результирующей ВАХ.

Для случая линейных ВАХ, очевидно, достаточно выполнить построение для любого напряжения, отличного от нуля и провести линию через начало координат и полученную точку.

Если один или оба элемента имеют нелинейную ВАХ, точек для построения результирующей ВАХ следует взять больше, ориентируясь на конкретный случай.

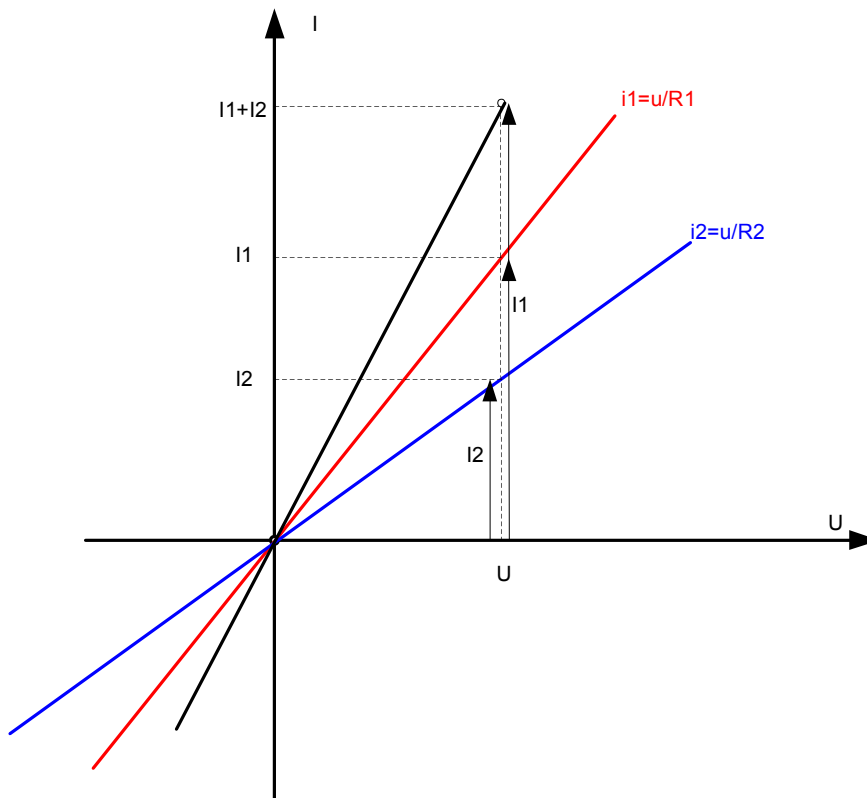


Рисунок 5 - ВАХ при параллельном соединении элементов

Важной разновидностью нелинейного элемента является полупроводниковый диод. Одна из возможных схем его включения приведена на рисунке ниже. Изменяя величину и полярность входного напряжения  $U_{вх}$ , можно построить ВАХ диода. Типичная форма ВАХ приведена на рисунке 7.

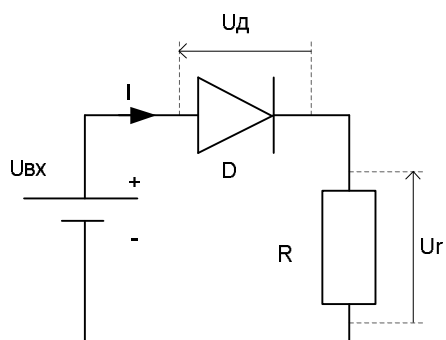


Рисунок 6 - Цепь, содержащая нелинейный элемент

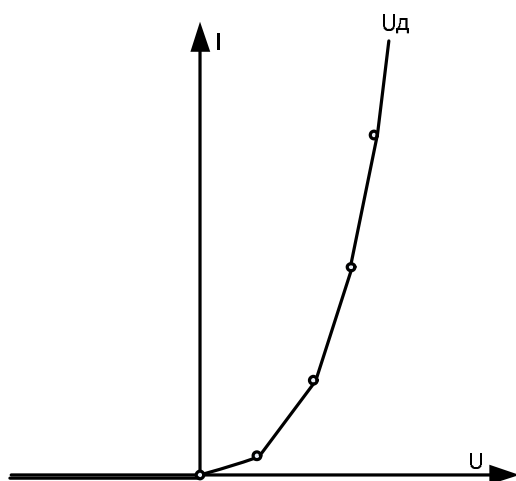


Рисунок 7 - ВАХ диода

При известной ВАХ диода оказывается возможным применение графического метода построения графика выходного сигнала при заданном виде входного.

На рассмотренной нами схеме диод  $D$  включен последовательно с нагрузкой  $R$ .

При последовательном соединении ток, протекающий в цепи, одинаков для каждого элемента, а поскольку зависимость напряжения от тока на этих элементах известна по их ВАХ, можно



построить результирующую ВАХ, определяющую зависимость тока в цепи от входного напряжения, которое распределяется между элементами пропорционально их персональным ВАХ. Принцип построения такой характеристики проиллюстрирован нижеприведенным рисунком. Обозначение  $U_d$  означает падение напряжения на диоде,  $U_r$  - падение напряжения на резисторе. При любом значении тока:

- можно определить падение напряжения на каждом элементе по их персональным ВАХ;
- сумма этих падений напряжений равна величине входного напряжения.

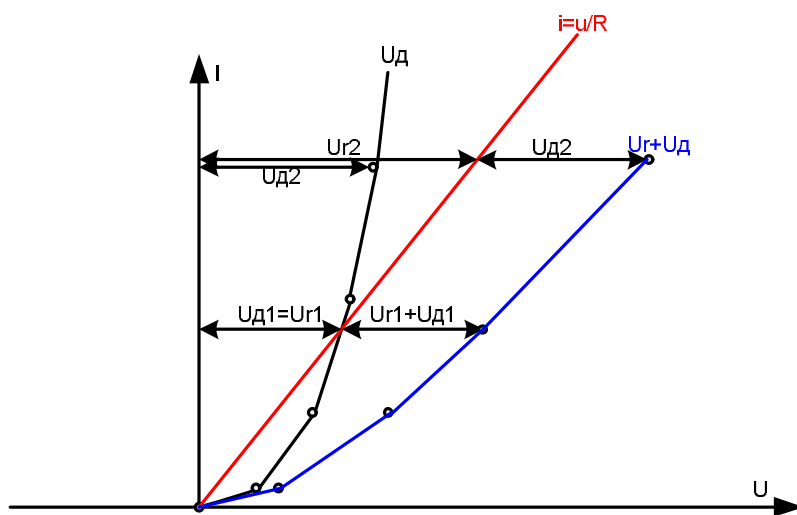


Рисунок 8 - ВАХ последовательно соединенных диода и резистора

Выбрав подходящее количество точек (например, для рисунка 8 выбрано 5 точек), соединяем их отрезками прямой. Лучшие способы аппроксимации (например, сплайны) позволяют получить более качественное представление результирующей ВАХ.

Построение ВАХ выполнено для прямой ветви ВАХ диода. Обратная ветвь в упрощенном варианте представляет собой прямую линию, параллельную оси напряжений, захватывающую область малых значений обратных токов (обратные токи на графике соответствуют отрицательным значениям на оси тока). Влияние резистора будем считать несущественным в предположении его последовательного соединения с запертым диодом (фактический разрыв цепи). В случае необходимости, при больших обратных токах диода и значительных величинах нагрузочного

сопротивления, более точный график обратной ветви строится по уже рассмотренной методике.

Полученную характеристику можно использовать для выполнения более сложных задач. Рассмотрим задачу анализа прохождения сигнала через полупроводниковый диод, что требуется при расчете выпрямительных устройств. Для рисунка 6 будем считать, что диод служит выпрямителем, а сопротивление  $R$  - это нагрузка.

Напряжение на нагрузке, которая представлена резистивным элементом, прямо пропорционально току в цепи. В то же время график тока в цепи легко можно построить, воспользовавшись методикой, продемонстрированной на рисунке ниже.

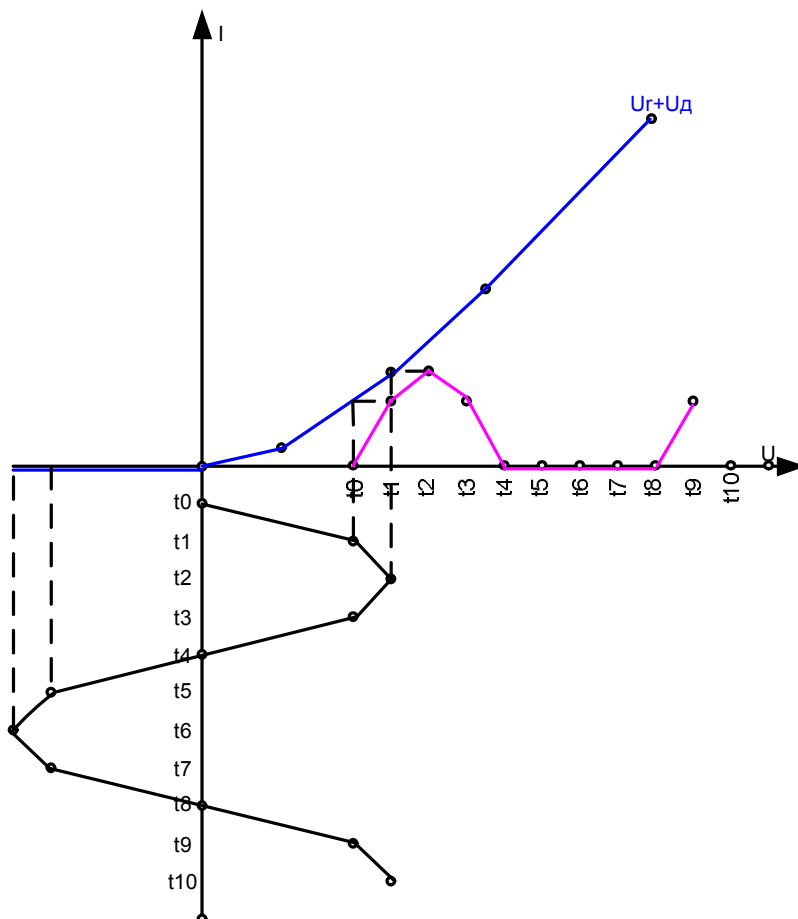


Рисунок 9 - Построение графика тока в цепи для сигнала на временном интервале  $t_0 \dots t_{10}$ .

График входного сигнала расположен таким образом, что напряжение сигнала отложено по оси напряжений суммарной ВАХ диода и резистора, а ось времени наложена на ось тока.

График выходного сигнала (ток в цепи) расположен таким образом, что ток отложен по оси токов суммарной ВАХ, а ось времени наложена на ось напряжений. Отметки времени  $t_0 \dots t_{10}$  входного сигнала соответствуют отметкам  $t_0 \dots t_{10}$  выходного сигнала.

Для каждой временной отметки на вертикальной оси находим значение тока выходного сигнала. Поскольку масштаб оси напряжений одинаков для результирующей ВАХ и входного сигнала, для найденного значения входного сигнала на графике ВАХ считываем значение тока. Это и есть ток в цепи в выбранный момент времени.

Например, для момента времени  $t_0$  входное напряжение равно 0, чему соответствует нулевой ток. Для моментов времени  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_9 \dots$  значение тока через нагрузку уже ненулевое и находится на пересечении ВАХ и вертикальной линии, проходящей через отмеченную нами точку на оси напряжений. Именно эти значения тока и будут отложены для соответствующих временных отметок выходного сигнала.

Очевидно, форма выходного напряжения на активной нагрузке будет соответствовать форме тока. Величина напряжения в каждый момент времени может быть вычислена путем умножения величины соответствующего тока на значение сопротивления нагрузки.

## 2 Построение ВАХ цепи, содержащей полупроводниковый диод

При расчетах нелинейных цепей, содержащих полупроводниковый диод, необходимо знать ВАХ диода. Такая информация приводится в справочных пособиях [1] или документации изготовителя.

ВАХ полупроводниковых диодов существенно зависит от температуры, что необходимо учитывать при расчетах.

При подготовке к работе необходимо изучить материал, содержащийся в разделе 1 данных методических указаний.

### Задание

В соответствии с полученным вариантом задания построить ВАХ последовательно соединенных элементов. Примерные варианты заданий приведены в таблице 1.

Задание формируется преподавателем индивидуально и может содержать несколько вариантов, а также потребовать использования справочной литературы.

Построения необходимо выполнить как для прямой, так и для обратной ветви ВАХ диодов.

Таблица 1. Варианты заданий для расчета последовательного соединения резистора и диода

№	Диод	Резистор, Ohm	Температура
1	Д223	1000	25 °С
2	Д2	100	25 °С
3	Д226	510	25 °С
4	КД102	200	25 °С
5	ГД107	10	25 °С
6	Д223	1500	213 К
7	Д2	200	213 К
8	Д226	300	213 К
9	КД102	100	213 К
10	ГД107	51	213 К
11	Д223	1000	330 К
12	Д2	100	330 К
13	Д226	510	330 К

14	КД102	200	330 К
15	ГД107	10	330 К
16	Д223	1500	-25 °С
17	Д2	200	-25 °С
18	Д226	300	-25 °С
19	КД102	100	-25 °С
20	ГД107	51	-25 °С

### **Требования к оформлению отчета**

Графические построения следует выполнить на бланке, приведенном в приложении, или использовать миллиметровую бумагу. Допускается построение графиков на листах клетчатой бумаги школьных тетрадей.

Каждый график должен сопровождаться пояснениями, указывающими тип диода, температуру и прочие необходимые сведения.

### **Контрольные вопросы**

1. Для какой температуры указывается нормированная ВАХ полупроводникового диода?
2. Как изменяется прямая ветвь ВАХ диода при увеличении температуры?
3. Как изменяется прямая ветвь ВАХ диода при уменьшении температуры?
4. Как изменяется обратная ветвь ВАХ диода при изменениях температуры?
5. Укажите основополагающий принцип построения ВАХ цепей с последовательным соединением элементов.
6. Укажите основополагающий принцип построения ВАХ цепей с параллельным соединением элементов.

### 3 Построение графика прохождения сигнала через нелинейную цепь

Последовательное соединение полупроводникового диода и резистора встречается при построении выпрямителей, детекторов и в ряде других случаев. При этом важно знать, как изменится сигнал на выходе применяемой цепи.

При подготовке к работе необходимо изучить материал, содержащийся в разделе 1 данных методических указаний.

#### Задание

1. В соответствии с полученным вариантом задания построить ВАХ последовательно соединенных диода и нагрузочного резистора.
2. Построить график прохождения сигнала через цепь.

Примерные варианты заданий приведены в таблице 2. Задание формируется преподавателем индивидуально и может содержать несколько вариантов, а также потребовать использования справочной литературы.

Параметры, которые в задании не указаны, но требуются для выполнения работы, выбираются самостоятельно или уточняются у преподавателя.

Таблица 2. Варианты заданий для расчета последовательного соединения резистора и диода

№	Диод	Резистор, Ohm	Напряжение источника сигнала
1	Д223	750	Синусоида, действующее значение 10V
2	Д2	120	Синусоида, амплитуда 1V
3	Д226	470	Синусоида, действующее значение 20V
4	КД102	270	Синусоида, амплитуда 5V
5	ГД107	51	Синусоида, действующее значение 0,5V
6	Д223	1000	Синусоида, амплитуда 10V

7	Д2	180	Синусоида, действующее значение 1V
8	Д226	330	Синусоида, амплитуда 20V
9	КД102	120	Синусоида, действующее значение 5V
10	ГД107	75	Синусоида, амплитуда 0,5V
11	Д223	1100	Треугольное, -10...+10V
12	Д2	160	Треугольное, -3...+3V
13	Д226	510	Треугольное, -50...+50V
14	КД102	200	Треугольное, -15...+15V
15	ГД107	10	Треугольное, -5...+5V
16	Д223	1500	Треугольное, -10...+10V
17	Д2	200	Треугольное, -3...+3V
18	Д226	300	Треугольное, -50...+50V
19	КД102	100	Треугольное, -15...+15V
20	ГД107	510	Треугольное, -5...+5V

### Требования к оформлению отчета

Графические построения следует выполнить на бланке, приведенном в приложении, или использовать миллиметровую бумагу. Допускается построение графиков на листах клетчатой бумаги школьных тетрадей.

Каждый график должен сопровождаться пояснениями, указывающими тип диода, температуру и прочие необходимые сведения.

### Контрольные вопросы

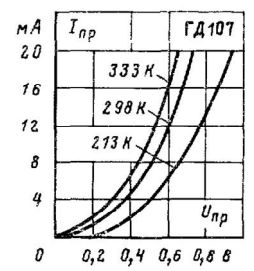
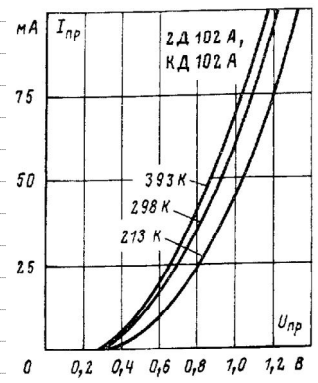
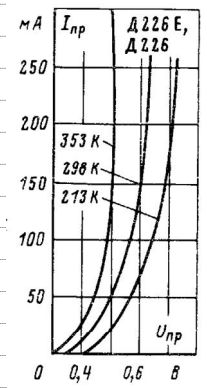
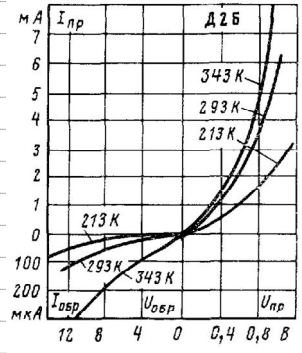
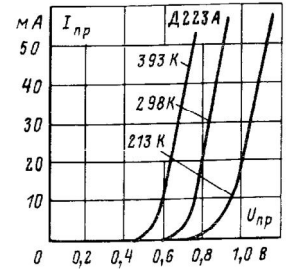
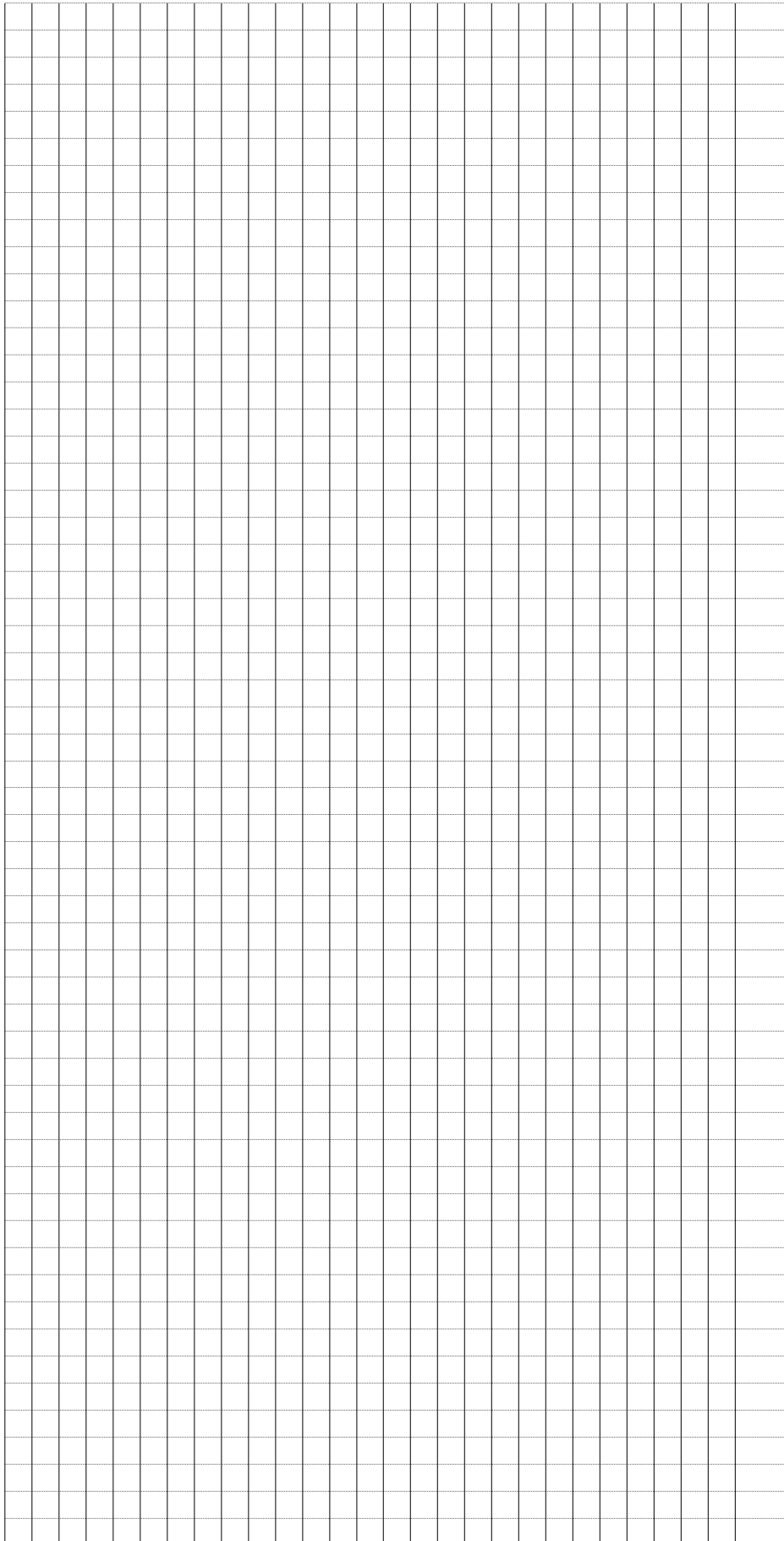
1. Какова разница между амплитудным и действующим значением синусоидального сигнала?
2. Будет ли форма входного сигнала соответствовать форме выходного сигнала для исследуемых цепей (обосновать ответ)?
3. Приведите примеры практических задач, где востребованы расчеты рассмотренных цепей.
4. Что такое выпрямитель?
5. Приведите примеры применения выпрямителей.

## Список литературы

1. Полупроводниковые приборы : Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы [Текст] : справочник / под общ. ред. Н. Н. Горюнова. - М. : Энергоатомиздат, 1987. - 744 с. : ил.
2. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы [Текст] : справочник. Выпрямительные, универсальные и импульсные диоды. Стабилизаторы и стабисторы. Тиристоры. Варикалы. Туннельные диоды / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, П. М. Лямин. - Минск : Беларусь, 1994. - 347 с.
3. Ермаков, О. Н. Полупроводниковые знаковосинтезирующие индикаторы [Текст] / О. Н. Ермаков, В. П. Сушков. - М. : Радио и связь, 1990. - 238 с. : ил.



ПРИЛОЖЕНИЕ



Зависимость прямого тока от напряжения.