

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения

**Ю. В. Новоселов**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Екатеринбург  
2010

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Электрические машины»

**Ю. В. Новоселов**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Сборник задач с методическими указаниями  
к их решению для студентов специальностей  
190402 – «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном  
транспорте» и 190401 – «Электроснабжение железных дорог»

Екатеринбург  
2010

УДК 621.38 (075.8)

Н76

**Новоселов, Ю. В.**

Н76 Физические основы электроники : сб. задач с метод. указаниями к их решению / Ю. В. Новоселов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 40 с.

Сборник задач предназначен для самостоятельной работы студентов по курсу «Физические основы электроники» специальностей 190402 – «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» и 190401– «Электроснабжение железных дорог» и могут быть использованы студентами всех форм обучения.

Даны рекомендации по порядку решения типовых задач по амплитудным ограничителям, усилителю на биполярном транзисторе, схеме коммутации на тринисторе и по анализу работы RC-цепей, содержатся варианты задач и исходные численные данные.

УДК 621.38 (075.8)

Сборник задач утвержден на заседании кафедры «Электроника», протокол № 10 от 24 июня 2010 г.

*Автор:* Ю. В. Новоселов, доцент кафедры «Электрические машины», канд. техн. наук, УрГУПС

*Рецензент:* Б.С. Сергеев, профессор кафедры «Электрические машины», д-р техн. наук, УрГУПС

## Оглавление

1. Амплитудные ограничители.....	4
1.1. Основные сведения об амплитудных ограничителях.....	4
1.2. Задания для самостоятельной работы.....	10
2. Усилитель на биполярном транзисторе.....	13
2.1 Графоаналитический метод расчета усилителя.....	13
2.2. Задания для самостоятельной работы.....	15
3. Схема коммутации с использованием триноста.....	25
3.1. Краткие теоретические сведения.....	25
3.2. Задания для самостоятельной работы.....	28
4. Прохождение прямоугольного импульса через $RC$ -цепь.....	36
4.1. Краткие теоретические сведения.....	36
4.2. Задания для самостоятельной работы.....	43
Библиографический список.....	46

# АМПЛИТУДНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ

## 1.1. Основные сведения об амплитудных ограничителях

Амплитудные ограничители используются для ограничения амплитуды импульсов, селекции импульсов по амплитуде, фиксации уровня сигналов и для решения других подобных задач.

### *Диодные амплитудные ограничители*

Основным элементом диодных ограничителей является полупроводниковый диод, который может находиться в открытом или закрытом состоянии в зависимости от уровней напряжений на его аноде и катоде. С целью упрощения анализа работы различных схем диодных ограничителей предположим, что прямое и обратное сопротивления диода постоянны по величине. При анализе работы схемы в связи с нелинейными свойствами диода необходимо учитывать интервалы открытого или закрытого состояния диода. Диод будет открыт, если напряжение на аноде больше, чем на катоде, и закрыт при напряжении на аноде меньше, чем на катоде. Переход диода из одного состояния в другое будет происходить в моменты времени, когда эти напряжения становятся равными. Для упрощения анализа допустим, что прямое сопротивление диода мало по сравнению с другими сопротивлениями схемы, его можно принять равным нулю, а обратное сопротивление диода велико, поэтому можно считать, что  $R_{обр} \rightarrow \infty$ . Прямое и обратное сопротивления диода можно не учитывать в расчетах. Допустим также, что внутреннее сопротивление источника сигнала мало, его можно приближенно считать равным нулю. Рассмотрим примеры анализа работы некоторых схем диодных ограничителей.

### Пример 1

Рассмотрим схему последовательного диодного ограничителя снизу с отрицательным порогом ограничения (рис. 1.1). Временные диаграммы входного и выходного напряжений ограничителя изображены на рис. 1.2.

Построение диаграммы выходного напряжения производится в следующей последовательности.

На диаграмме входного напряжения отметим точки, соответствующие границам интервалов открытого и закрытого состояния диода. Очевидно, что на интервале 1–2 диод будет открыт, так как напряжение на аноде будет выше, чем на катоде. Поэтому на интервале 1–2 выходное напряжение повторяет форму входного напряжения, а напряжение смещения не будет влиять на выходное, ввиду нулевого внутреннего сопротивления источника сигнала. На интервале 2–3 диод закрыт, так как напряжение на аноде будет ниже, чем на катоде, поэтому входное напряжение не может пройти на выход и выходное напряжение будет равно напряжению смещения  $E$ .

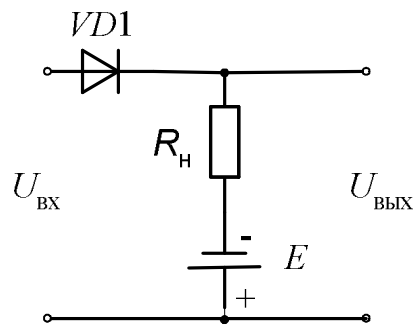


Рис. 1.1. Последовательный диодный ограничитель снизу с отрицательным порогом ограничения

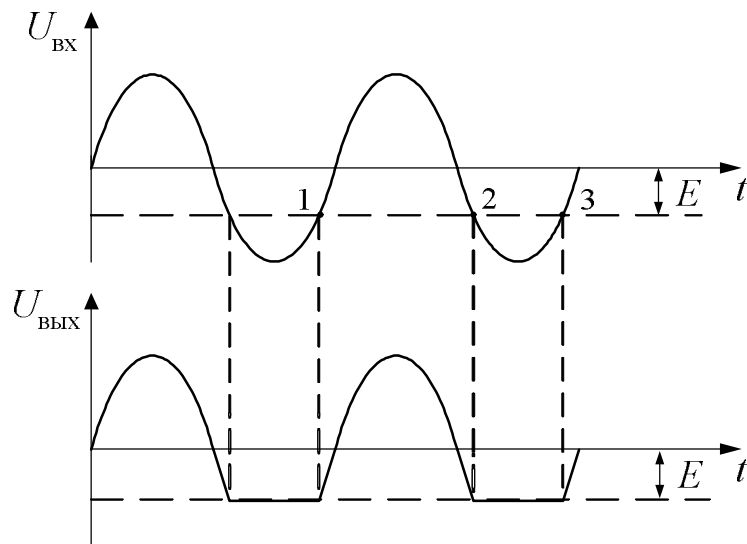


Рис. 1.2. Временные диаграммы работы последовательного ограничителя снизу с отрицательным порогом ограничения

## Пример 2

Схема параллельного диодного ограничителя с положительным порогом ограничения сверху изображена на рис. 1.3. Временные диаграммы работы ограничителя показаны на рис. 1.4.

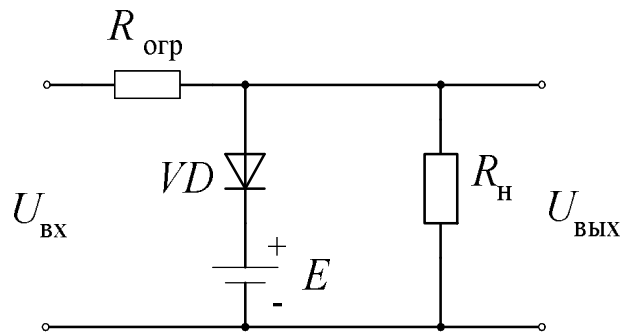


Рис. 1.3. Параллельный диодный ограничитель с положительным порогом ограничения сверху

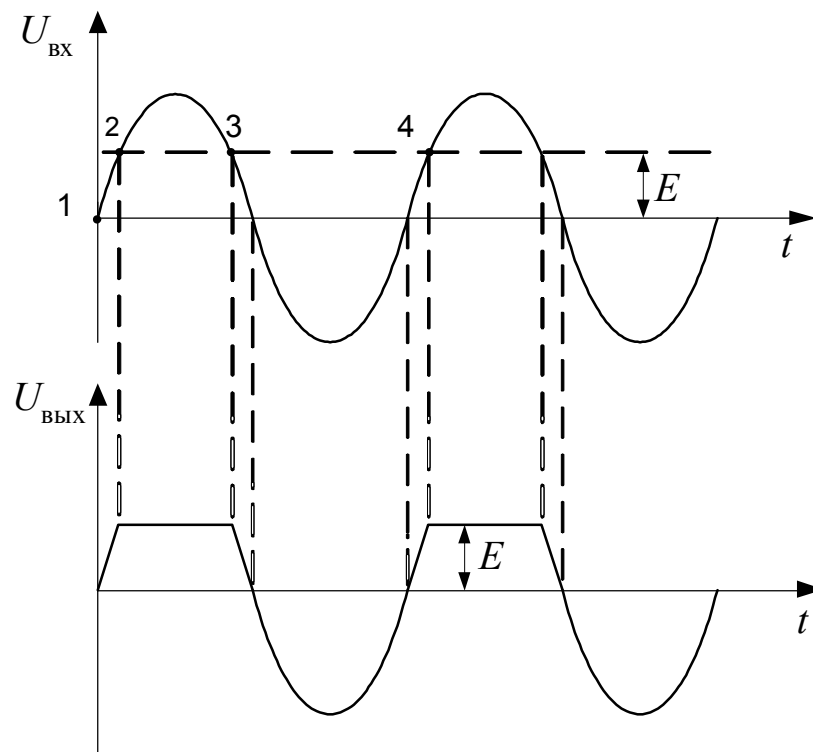


Рис. 1.4. Временная диаграмма процессов в параллельном диодном ограничителе с положительным порогом ограничения сверху

На интервале 1–2 величина входного напряжения меньше, чем напряжение смещения  $E$ , диод закрыт, и на выход поступает входное напряжение. На интервале 2–3 величина напряжения на аноде диода становится больше напряжения смещения, диод открывается, и выходное напряжение поддерживается на уровне напряжения смещения. Входное напряжения при этом на выход не проходит, так как сопротивление  $R_{огр}$  выбирается значительно больше, чем прямое сопротивление диода и внутреннее сопротивление источника смещения. На интервале 3–4 диод снова переходит в закрытое состояние, так как на этом интервале входное напряжение меньше, чем напряжение смещения, а выходное напряжение повторяет форму входного напряжения. Далее процесс повторяется.

Аналогично вышерассмотренным примерам следует проводить анализ работы и других схем диодных ограничителей. В рассмотренных случаях было принято допущение об идеальных выпрямительных свойствах полупроводниковых диодов. Если учитывать реальные прямое и обратное сопротивления диодов, то анализ значительно усложняется, но исходные принципы те же самые.

### *Амплитудные ограничители на кремниевых стабилитронах*

Во многих случаях удобно использовать в схемах амплитудных ограничителей стабилитроны. Вольтамперная характеристика стабилитрона изображена на рис. 1.5. Для ограничения используется участок А–В на обратной ветви ВАХ стабилитрона, соответствующий явлению лавинного (электрического) пробоя. На этом участке напряжение на стабилитроне практически остается постоянным и равным напряжению стабилизации  $U_{ст}$ . Величина  $U_{ст}$  задается в паспортных данных для конкретного типа стабилитрона. При схемной реализации амплитудных ограничителей на стабилитронах следует учитывать также и напряжение на стабилитроне при его прямом включении, которое можно принимать равным 1 В.

Преимущество амплитудных ограничителей на кремниевых стабилитронах заключается в том, что не требуется использование в схемах источников смещения, а недостаток – в том, что уровни ограничения фиксированы по величине и определяются типом стабилитрона.

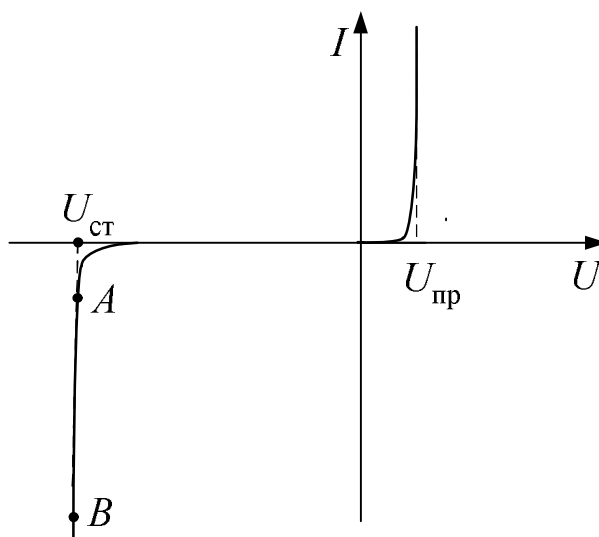


Рис. 1.5. Вольтамперная характеристика кремниевого стабилитрона



Рассмотрим работу некоторых схем ограничителей на стабилитронах. На рис. 1.6 приведена схема параллельного ограничителя сверху с положительным порогом ограничения, а на рис. 1.7 временная диаграмма его работы.

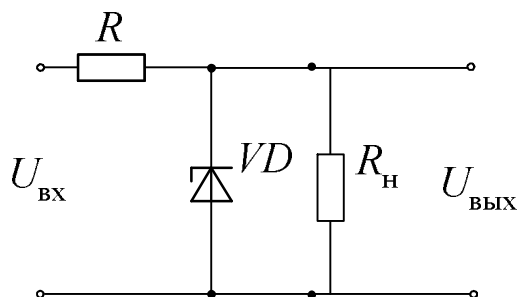


Рис. 1.6. Параллельный ограничитель сверху с положительным порогом на стабилитроне

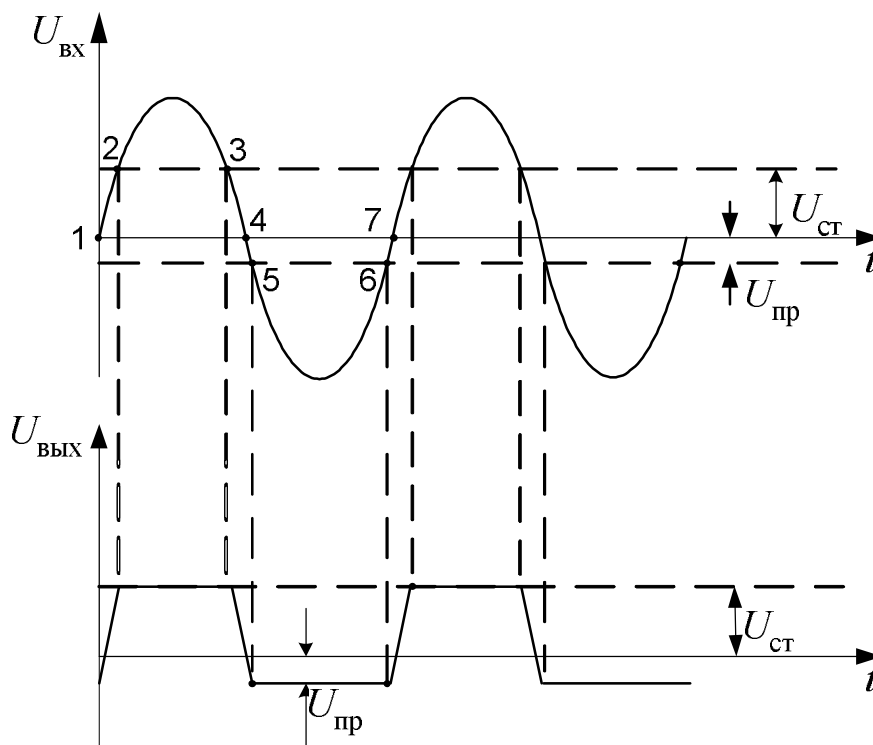


Рис. 1.7. Временная диаграмма входного и выходного напряжения амплитудного ограничителя, выполненного по схеме, приведенной на рис. 1.6

При поступлении положительной полуволны входного напряжения (интервал 1–4) стабилитрон включается в обратном направлении и находится в закрытом состоянии на участке 1–2. В точке 2 входное напряжение достигает напряжения стабилизации, рабочая точка стабилитрона выходит на участок пробоя, и выходное напряжение на интервале времени 2–3 будет равно напряжению стабилизации  $U_{ст}$ . В точке 3 стабилитрон выходит из режима пробоя, поэтому выходное напряжение будет повторять форму входного. При поступ-

лении отрицательной полуволны входного напряжения (интервал 4–7) стабилитрон включается в прямом направлении.

В промежуток времени 4–5 стабилитрон закрыт, так как входное напряжение меньше порогового, равного прямому напряжению  $U_{пр}$ , поэтому выходное напряжение повторяет форму входного напряжения. На участке 5–6 входное напряжение превысит пороговый уровень, рабочая точка выходит на крутой участок прямой ветви вольтамперной характеристики, следовательно, выходное напряжение практически будет равно величине  $U_{пр}$ , т. е. около 1 В. Наконец, на интервале 6–7 стабилитрон снова закрыт, и выходное напряжение повторяет форму входного напряжения. Уровни напряжений на рис. 1.9 примерно соответствуют стабилитрону КС133, для которого напряжение стабилизации составляет около 3,3 В.

На рис. 1.8 приведена схема ограничителя, в которой стабилитрон включен последовательно по отношению к источнику сигнала. Временная диаграмма работы такого ограничителя изображена на рис. 1.9.

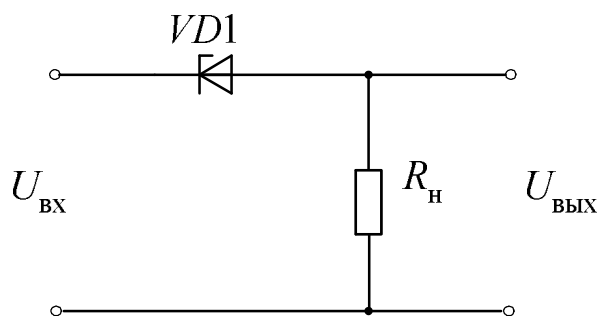


Рис. 1.8. Последовательный ограничитель на стабилитроне

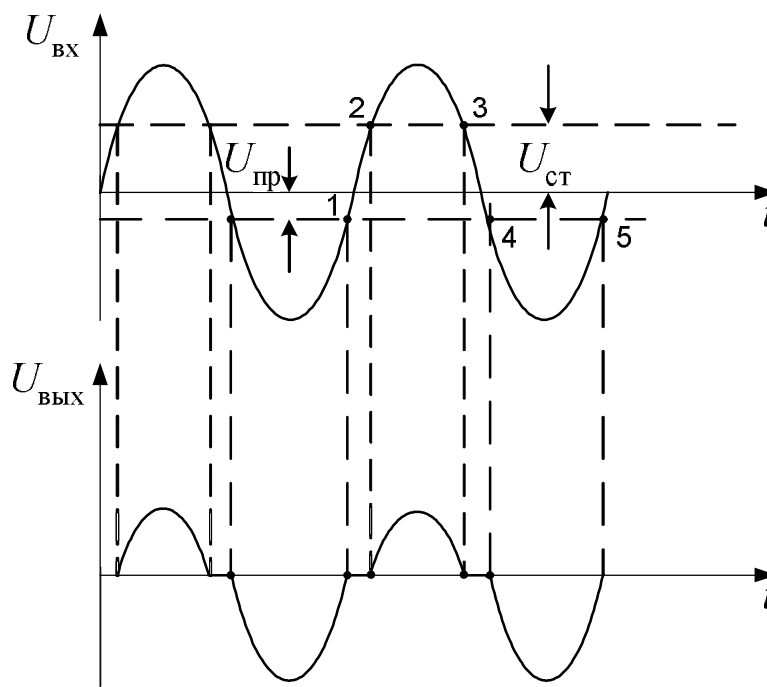


Рис. 1.9. Временная диаграмма работы ограничителя, изображенного на рис. 1.8

Ограничитель работает следующим образом. При поступлении положительной полуволны входного напряжения стабилитрон закрыт до тех пор, пока напряжение на входе не достигнет величины напряжения стабилизации (интервал 1–2). При дальнейшем нарастании входного напряжения стабилитрон пробивается, и на выход поступает вершина положительной полуволны (интервал 2–3). На интервале времени 3–4 стабилитрон закрыт. Когда поступает отрицательная полуволна входного напряжения, диод откроется при величине напряжения, равной  $U_{пр}$ , так как для отрицательной полуволны стабилитрон включен в прямом направлении. Амплитуда отрицательного напряжения на интервале 4–5 будет равна разности амплитуды входного напряжения и прямого напряжения стабилитрона.

Часто на практике применяют последовательное согласное или встречное соединение нескольких стабилитронов. В таких случаях анализ работы схем ограничителей должен учитывать суммарное напряжение, при котором цепочка из стабилитронов будет переходить из закрытого состояния в открытое или наоборот, а в остальном анализ не отличается от методики, рассмотренной выше.

## 1.2. Задания для самостоятельной работы

В самостоятельной работе требуется построить график выходного напряжения для заданной схемы ограничителя и численных исходных данных при синусоидальной форме входного напряжения, частоту которого следует принять равной 50 Гц. Вариант задания состоит из двух частей: номер схемы ограничителя – номер варианта исходных данных (например, 4–5, 8–6). Последовательность выполнения работы для заданного варианта следующая.

### *Для диодных амплитудных ограничителей:*

- построить график входного напряжения и нанести на нем уровни, соответствующие заданным напряжениям смещения;
- определить интервалы закрытого и открытого состояния диодов;
- для каждого интервала построить кривую изменения выходного напряжения, совместив их по времени на отдельном графике.

### *Для амплитудных ограничителей на кремниевых стабилитронах:*

- построить график входного напряжения и нанести на нем уровни, соответствующие напряжениям стабилизации и прямым напряжениям, в случае последовательного соединения стабилитронов определить уровни, соответствующие суммам напряжений в соответствии с заданной схемой;
- определить интервалы закрытого и открытого состояний цепей со стабилитронами;

– для каждого интервала построить кривые изменения выходного напряжения, совместив по времени графики входного и выходного напряжений.

### Варианты схем и исходных численных данных

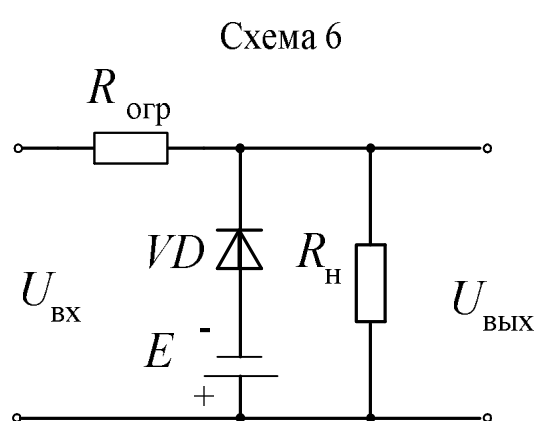
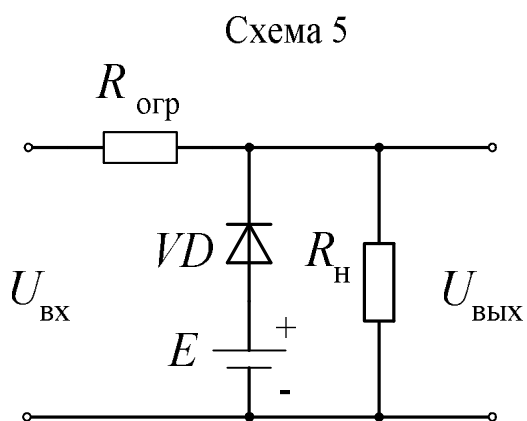
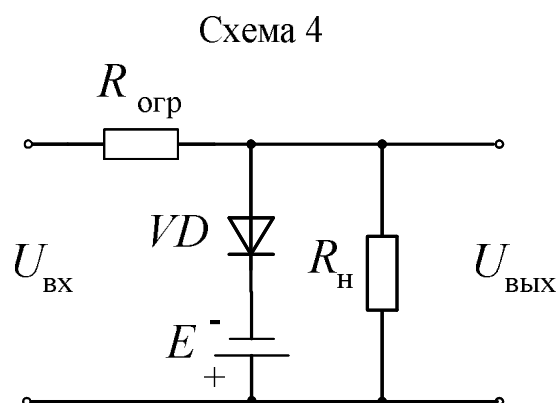
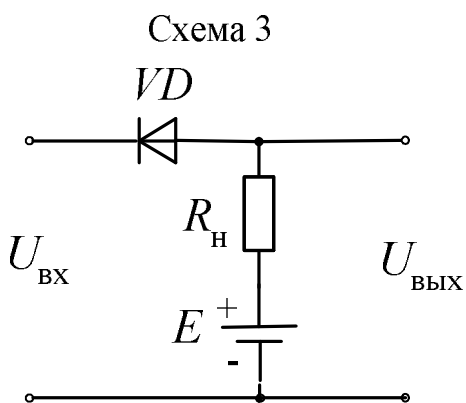
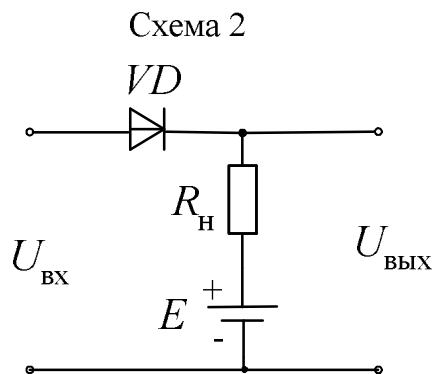
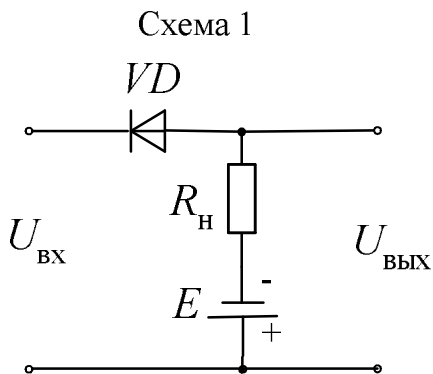


Схема 7

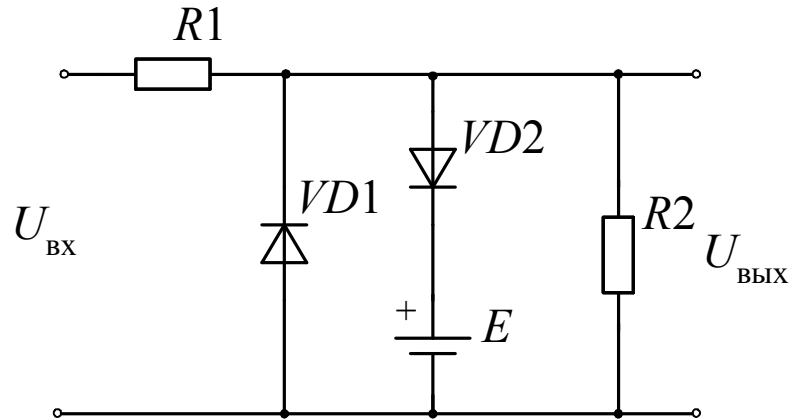
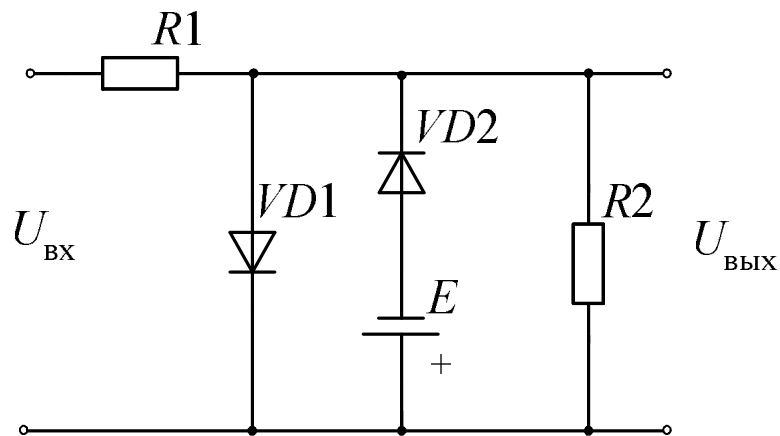


Схема 8



**Исходные данные для схем 1–8**

Вариант	1	2	3	4	5	6
Амплитуда входного напряжения, В	5	6	9	12	15	24
ЭДС источника смещения $E$ , В	2	4	5	9	10	15

Схема 9

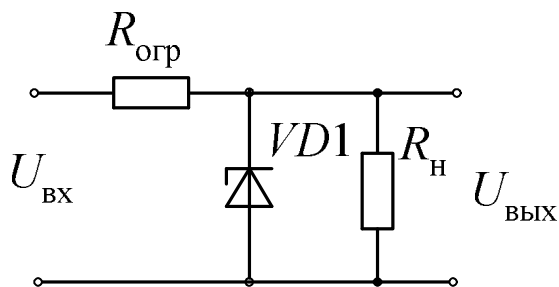
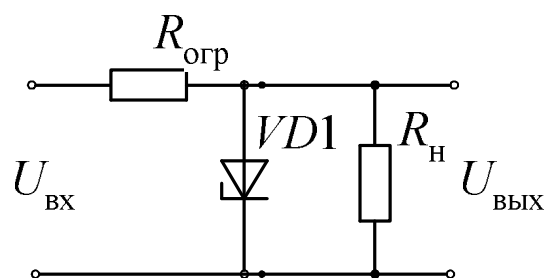
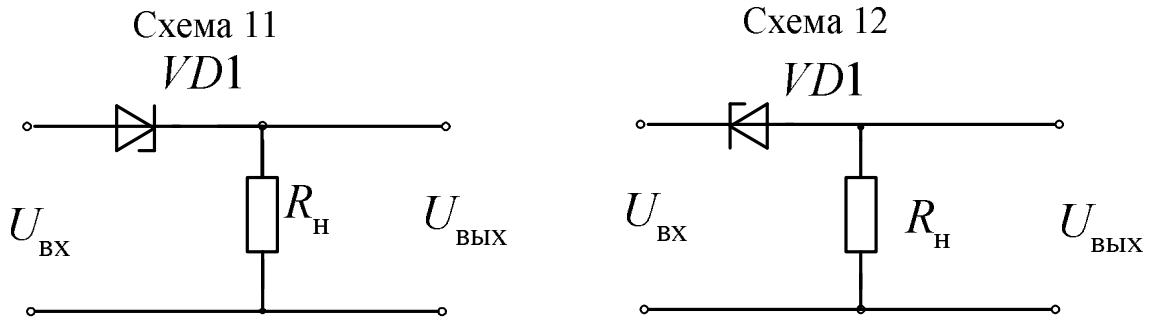


Схема 10





### Исходные данные для схем 9 –12

Вариант	1	2	3	4	5
Амплитуда входного напряжения, В	6	8	10	12	14
Типы стабилитронов	КС133	КС139	КС147	КС156	КС168
Напряжение стабилизации, В	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8

## 2. УСИЛИТЕЛЬ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

### 2.1. Описание графоаналитического метода расчета усилителя

Рассмотрим работу простейшего усилителя переменного напряжения, схема которого изображена на рис. 2.1.

Назначение элементов схемы:

$R_k$  – коллекторная нагрузка,

$R_б$  – резистор для задания исходного положения рабочей точки,

$C_p$  – разделительные конденсаторы для развязки усилителя от соседних каскадов по постоянному току.

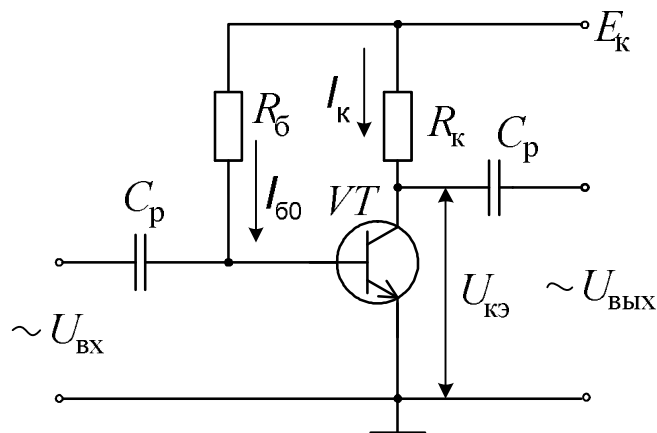


Рис. 2.1. Схема простейшего усилителя на биполярном транзисторе

Графический анализ работы усилителя производится с использованием входных и выходных статических характеристик транзистора и нагрузочной прямой (рис. 2.2).

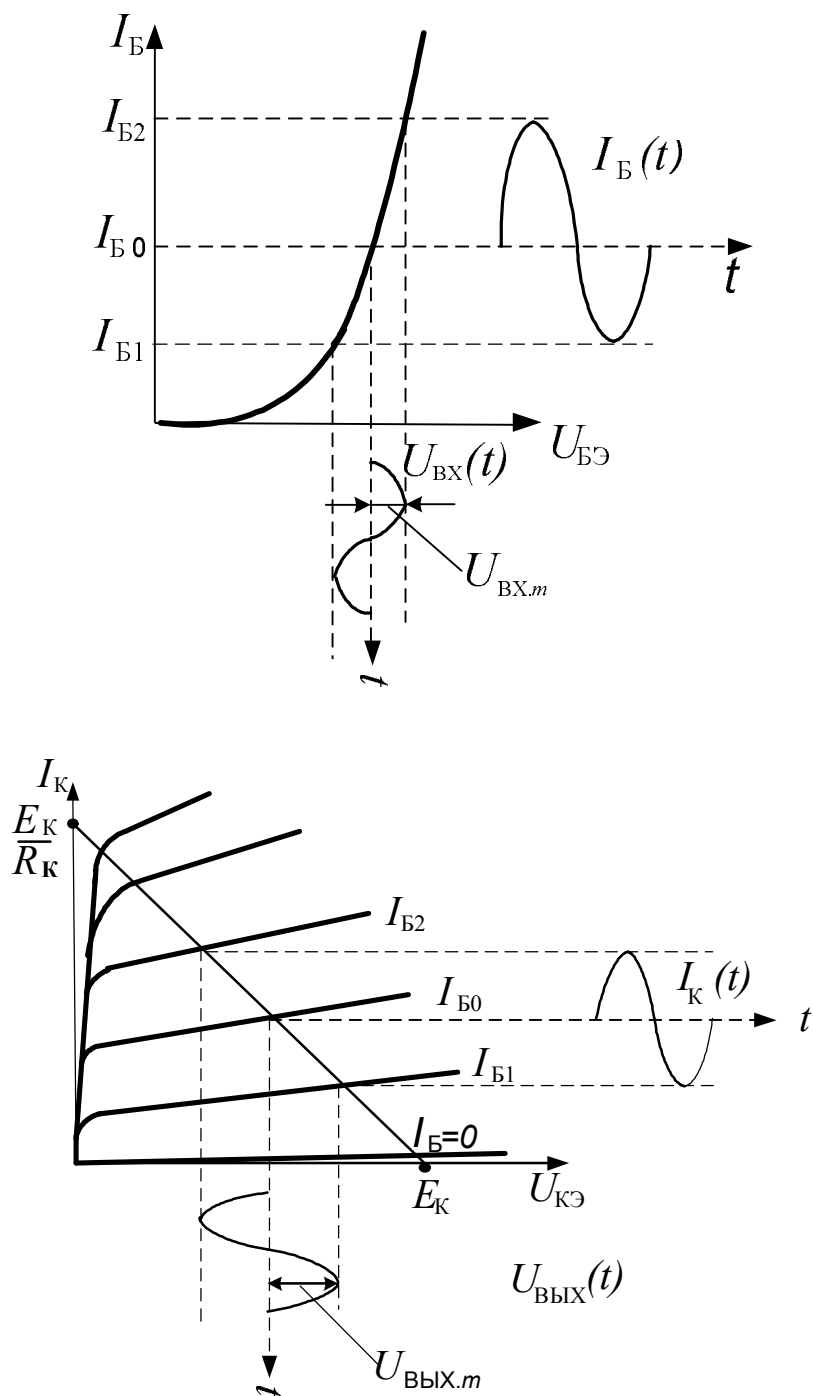


Рис. 2.2. Графический анализ работы усилителя

Для работы в режиме усиления исходное положение рабочей точки (при отсутствии входного сигнала) выбирается в середине семейства выходных ха-

рактических и по возможности на более линейном участке входной характеристики. При графическом анализе используются следующие основные соотношения.

Нагрузочная прямая описывается выражением  $U_{кэ} = E_{к} - I_{к} \cdot R_{к}$  и строится по двум точкам: при  $U_{кэ} = 0$  ток коллектора равен  $I_{к} = E_{к}/R_{к}$  и при  $I_{к} = 0$  напряжение на коллекторе равно  $U_{кэ} = E_{к}$ . Исходный ток базы, определяющий начальное положение рабочей точки по постоянному току, если пренебречь входным сопротивлением транзистора, равен  $I_{б0} = E_{к}/R_{б}$ . Предполагается, что входное напряжение имеет синусоидальную форму  $U_{вх} = U_{вх.м} \sin \omega t$ . При подаче на вход усилителя переменного напряжения рабочая точка перемещается по нагрузочной прямой в пределах, соответствующих амплитуде входного напряжения, это вызывает соответствующие изменения тока базы, тока коллектора и напряжения на коллекторе.

Отчет по самостоятельной работе должен содержать:

- входные и выходные характеристики транзистора,
- временные диаграммы всех токов и напряжений на входе и выходе усилителя, совмещенные с характеристиками аналогично рис. 2.2,
- все необходимые для решения задачи расчеты.

## 2.2. Задания для самостоятельной работы

Ниже описана последовательность решения задач для различных заданий. Необходимые для решения задач характеристики транзисторов представлены на рис. 2.3–2.7. При решении задачи по любому варианту следует изобразить схему усилителя с указанием типа транзистора и номиналов элементов, а также построить входные и выходные характеристики и диаграммы всех входных и выходных токов и напряжений аналогично рис. 2.2

### Задание 2.2.1

1. Заданы параметры  $E_{к}$ ,  $R_{к}$ ,  $R_{б}$ ,  $U_{вх.м}$ . Найти коэффициент усиления по напряжению.

#### *Этапы решения:*

- а) построить входные и выходные характеристики для заданного типа транзистора;
- б) построить нагрузочную прямую;
- в) определить значение тока  $I_{б0}$  и нанести исходное положение рабочей точки на нагрузочной прямой;
- г) построить кривую  $U_{вх}(t)$  на входной характеристике и определить пределы изменения тока базы  $I_{б1}$  и  $I_{б2}$  при наличии входного сигнала;



д) определить пределы перемещения рабочей точки на нагрузочной прямой и нанести на ней крайние положения рабочей точки;

е) определить по диаграмме амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых.м}}$  и коэффициент усиления  $K_U = U_{\text{вых.м}}/U_{\text{вх.м}}$ .

В случае необходимости следует построить промежуточные выходные характеристики с учетом полученных на этапах «в» и «г» значений токов базы.

Исходные данные для задания 2.2.1 приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип транзистора	КТ201А	201КТБ	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_k, \text{В}$	16	12	10	15	15	25	30	16	12	10
$R_k, \text{кОм}$	0,5	0,4	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
$R_b, \text{кОм}$	80	72	33	150	50	62	75	40	60	100
$U_{\text{вх.м}}, \text{В}$	0,05	0,03	0,03	0,025	0,025	0,025	0,025	0,1	0,05	0,03

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип транзистора	КТ312А	КТ312Б	КТ312В	П307	П307А	П307Б	П308	КТ201А	КТ361В	КТ312А
$E_k, \text{В}$	15	20	10	35	50	30	40	8	20	12
$R_k, \text{кОм}$	0,3	0,8	0,2	1	2	0,75	1	0,2	0,33	0,25
$R_b, \text{кОм}$	50	100	50	50	125	120	100	32	50	30
$U_{\text{вх.м}}, \text{В}$	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	0,03	0,1	0,05	0,05	0,08

### Задание 2.2.2

Заданы параметры:  $E_k$ ,  $R_b$ ,  $U_{\text{вх.м}}$ ,  $K_U$ . Найти величину  $R_k$ , при которой будет обеспечиваться заданный коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ .

#### Этапы решения:

а) построить входные и выходные характеристики для заданного типа транзистора;

б) определить значение тока базы  $I_{b0}$  и нанести соответствующую точку на входную характеристику;

в) построить график изменения входного напряжения  $U_{\text{вх}}(t)$  и определить пределы изменения тока базы  $I_{b1}$  и  $I_{b2}$ ;

г) определить амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых.м.}} = U_{\text{вх.м.}} K_U$ ;

д) проводя из точки  $E_k$  на оси  $U_{k3}$  нагрузочную прямую с разными углами наклона, добиться, чтобы амплитуда выходного напряжения соответствовала рассчитанному в п. «в» значению;

В случае необходимости следует построить промежуточные выходные характеристики для токов базы, определенных в п. «б» и «в».

Исходные данные для задания 2.2.2 приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип транзистора	КТ201А	КТ201Б	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_k, В$	16	12	10	15	15	15	25	15	18	10
$R_6, кОм$	85	60	100	60	75	100	200	50	100	200
$U_{\text{вх.м.}}, В$	0,03	0,05	0,03	0,02	0,05	0,02	0,03	0,1	0,05	0,02
$K_u$	10	50	40	30	40	60	50	45	40	40

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип транзистора	КТ312А	КТ312Б	КТ312В	П307	П307А	П307Б	П308	КТ201А	КТ361В	КТ312А
$E_k, В$	15	20	10	45	40	30	50	8	20	20
$R_6, кОм$	50	80	100	64	100	150	125	40	40	50
$U_{\text{вх.м.}}, В$	0,05	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,02	0,01	0,05
$K_u$	30	40	10	15	30	50	60	25	20	50

### Задание 2.2.3

Заданы параметры:  $E_k, R_k, U_{\text{вх.м.}}$ . Найти величину  $R_6$ , при которой усилитель будет работать в линейном режиме без существенных искажений синусоидальной формы сигналов, обеспечив работу транзистора в активной области, исключив его работу в режиме насыщения. Для обеспечения минимальных нелинейных искажений необходимо также выбрать рабочую точку таким образом, чтобы максимально использовать крутой участок входной характеристики, близкий к линейному.

#### Этапы решения:

- построить входные и выходные характеристики для заданного типа транзистора;
- построить нагрузочную прямую;

в) определить по выходным характеристикам транзистора максимальное значение тока базы  $I_{б.маx}$ , при котором транзистор еще не войдет в режим насыщения. Обозначить эту точку на входной характеристике. Определить величину входного напряжения  $U_{вх.1}$ , соответствующую этому току;

г) определить по входной характеристике величину напряжения  $U_{вх.2}$ , соответствующее отрицательной полуволне входного напряжения, и минимальное значение тока базы  $I_{б.мин}$ . Обозначить эту точку на входной характеристике;

д) определить величину напряжения, соответствующую переходу через нуль входного синусоидального напряжения  $U_{вх0} = \frac{U_{вх1} + U_{вх2}}{2}$ ;

е) определить по входной характеристике соответствующее этому напряжению значение тока  $I_{б0}$ ;

ж) определить  $R_б = E_к / I_{б0}$ ;

з) определить коэффициент усиления по напряжению.

Исходные данные для этого задания приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип транзистора	КТ312А	КТ312Б	КТ312В	П307	П307А	П307Б	П308	КТ201А	КТ361В	КТ312А
$E_к, В$	15	20	10	45	5011	30	50	8	20	20
$R_к, кОм$	0,3	0,8	0,25	2	2,5	1.0	1	0.25	0.5	0.8
$U_{вх.м}, В$	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,12	0,07	0,1	0,08

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип транзистора	КТ201А	КТ201Б	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_к, В$	16	12	1	15	15	20	25	15	18	20
$R_к, кОм$	0,8	0,4	0,3	0,5	0,75	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
$U_{вх.м}, В$	0,05	0,07	0,08	0,03	0,05	0,06	0,07	0,1	0,07	0,05

#### Задание 2.2.4

Заданы:  $E_к$ ,  $R_к$ ,  $R_б$ . Определить предельно-возможную амплитуду входного сигнала  $U_{вх.м.маx}$ , при которой транзистор будет работать в активном ре-

жиме, а рабочая точка будет перемещаться по нагрузочной прямой до границ, соответствующих переходу транзистора в режимы насыщения или отсечки.

**Этапы решения:**

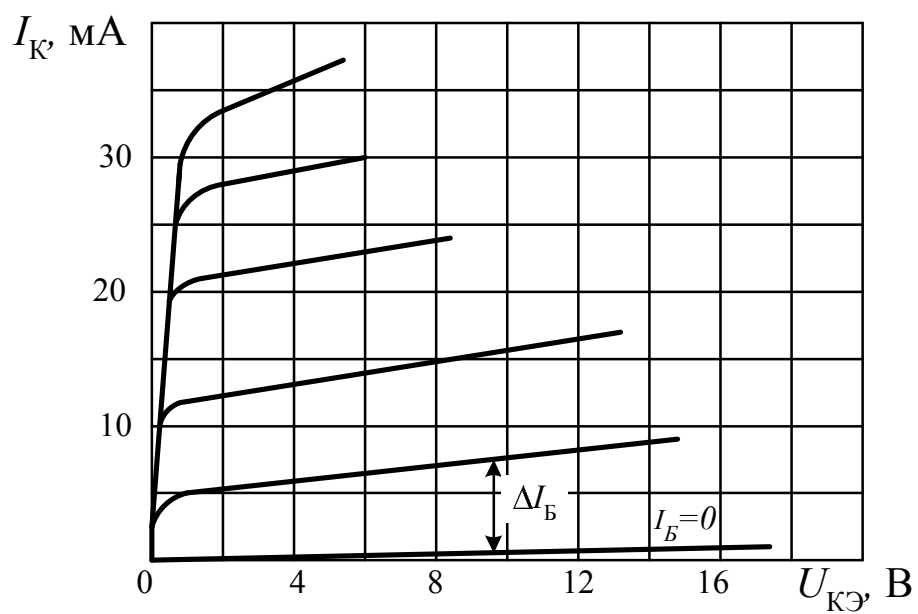
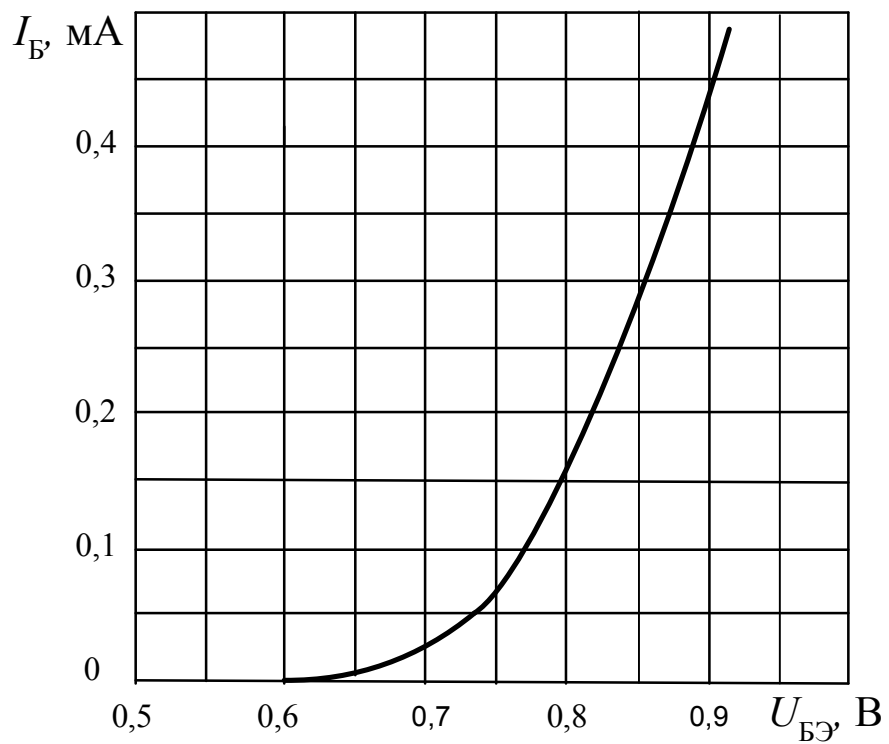
- а) построить входные и выходные характеристики для заданного типа транзистора;
- б) построить нагрузочную прямую;
- в) определить значение тока  $I_{\beta 0}$  и нанести исходное положение рабочей точки на нагрузочной прямой и на входной характеристике;
- г) определить по выходным характеристикам, при каком токе базы наступает насыщение транзистора. Отметить значение этого тока и соответствующую величину входного напряжения на входной характеристике;
- д) найти предельно-возможную амплитуду входного напряжения  $U_{вх.т.маx}$ , при которой транзистор будет работать на границе активного режима работы, не заходя в режим насыщения;
- е) построить кривые изменения входного и выходного напряжения и тока коллектора при найденном значении  $U_{вх.т.маx}$  и определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{вых.т.}/U_{вх.т.маx}$ .

Исходные данные для задания 2.4 приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

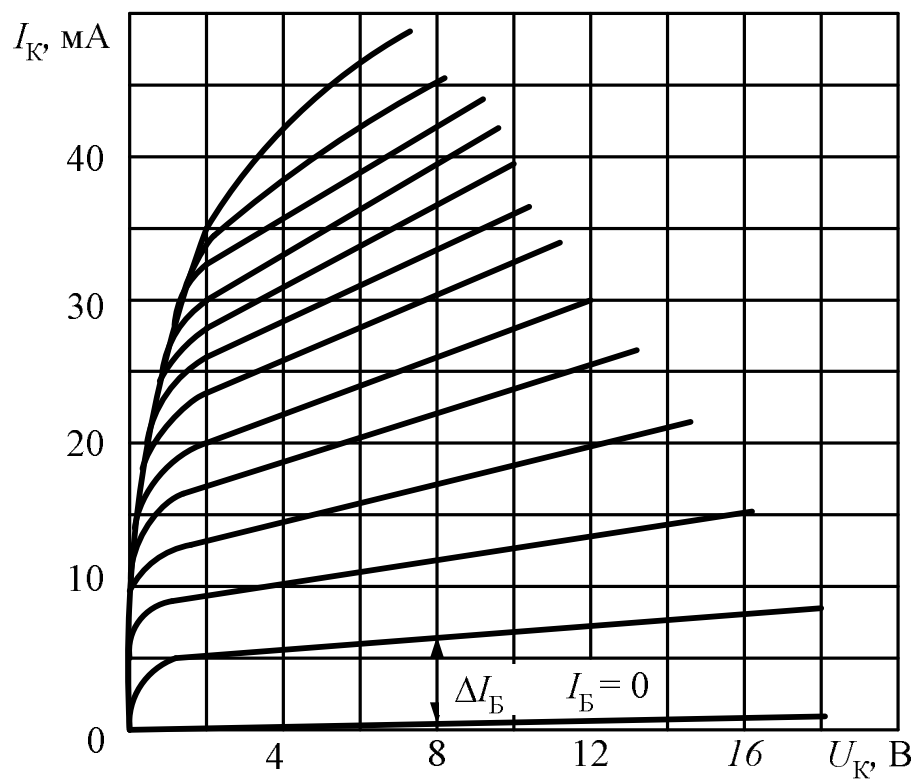
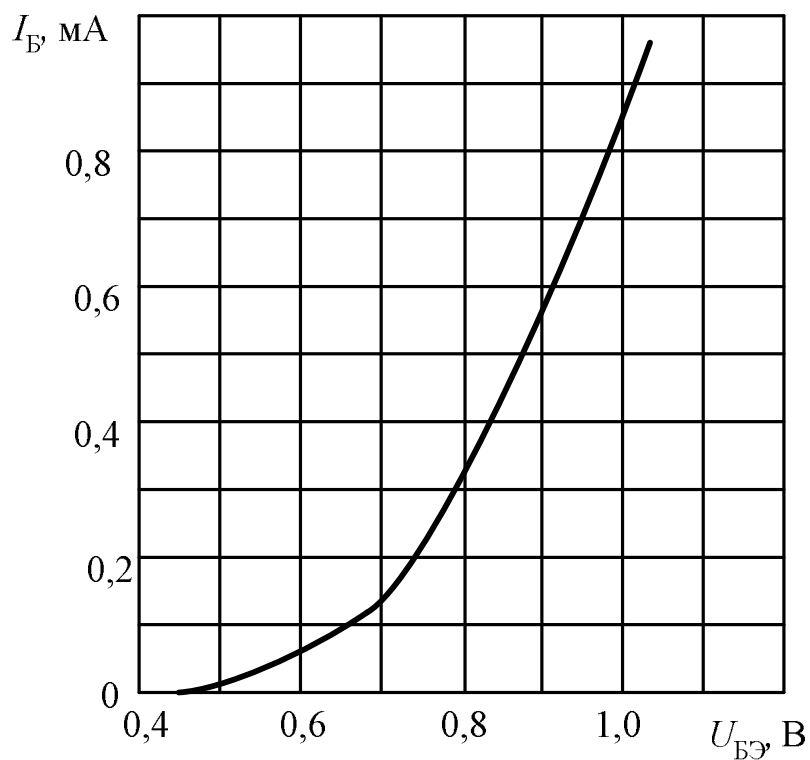
Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип транзистора	КТ201А	КТ201Б	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_k, В$	6	2	0	5	6	0	5	5	8	10
$R_k, кОм$	1	0,5	0,4	1	0,8	0,5	1	0,5	0,6	0,4
$R_{\beta}, кОм$	80	60	40	200	100	40	62	50	90	100

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип транзистора	КТ312А	КТ312Б	КТ312В	П307	П307А	П307Б	П308	КТ201А	КТ361В	КТ312А
$E_k, В$	15	20	10	40	50	30	50	8	20	20
$R_k, кОм$	0,5	0,5	0,25	2	1,2	1	2	1	0,4	0,8
$R_{\beta}, кОм$	50	40	50	57	125	100	100	80	40	50



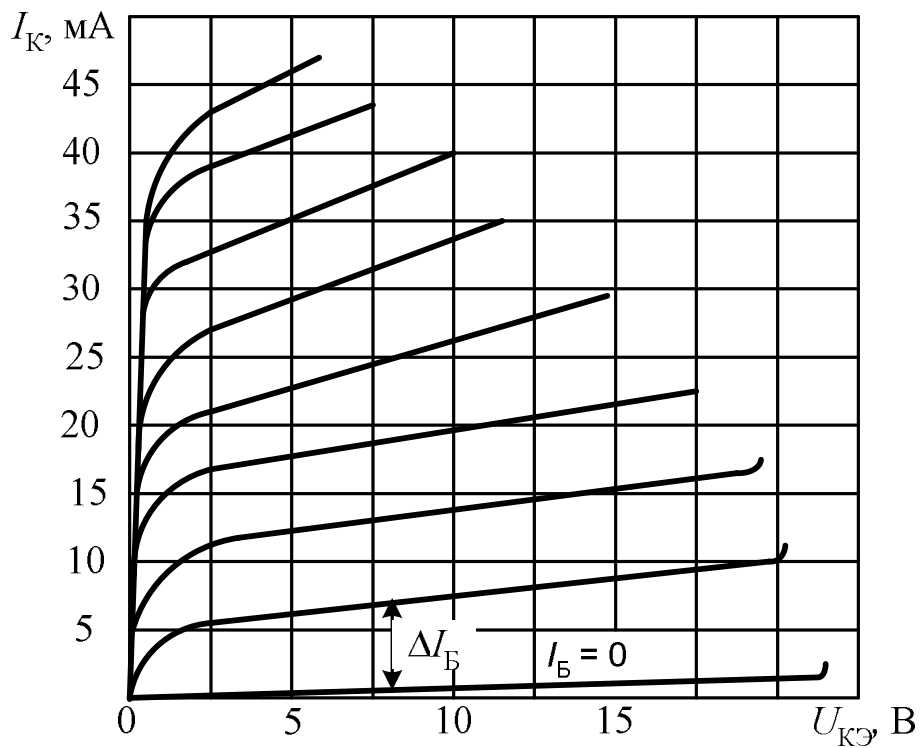
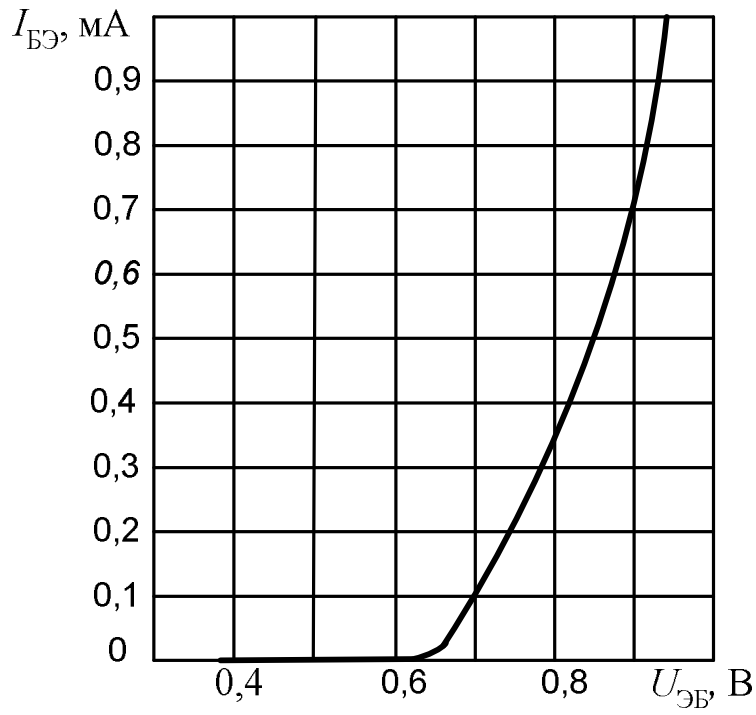
КТ201А, КТ201Б, КТ201В, КТ201Д -  $\Delta I_B = 0,1 \text{ мА}$   
 КТ201Г -  $\Delta I_B = 0,05 \text{ мА}$

Рис. 2.3. Характеристики кремниевого p-p-n-транзистора КТ201



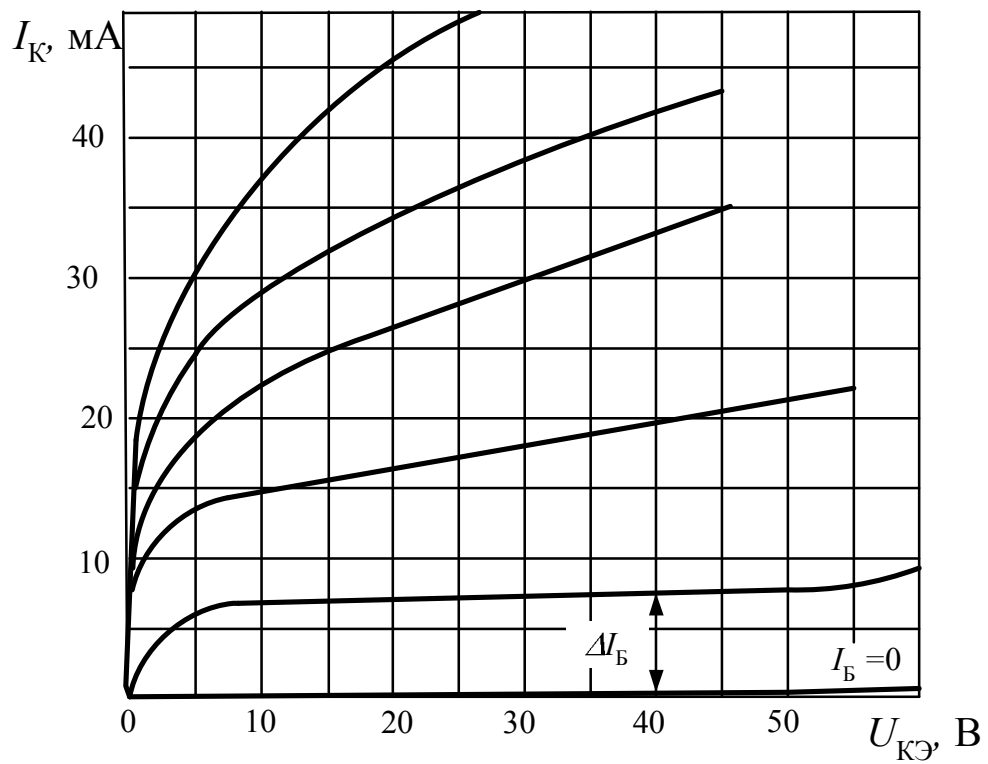
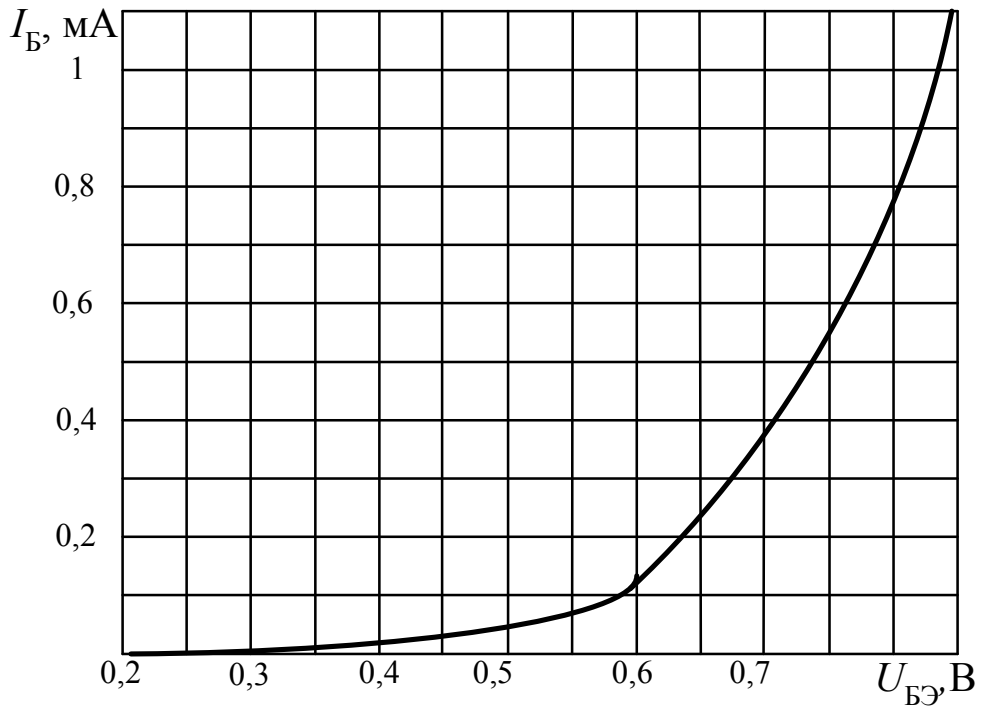
КТ349А -  $\Delta I_B = 0,1\text{мА}$ , КТ349Б -  $\Delta I_B = 0,05\text{мА}$ ,  
КТ349В -  $\Delta I_B = 0,02\text{мА}$

Рис. 2.4. Характеристики кремниевого p-n-p-транзистора КТ349



КТ312А, КТ312Б -  $\Delta I_{Б} = 0,1 \text{ mA}$ ; КТ312В -  $\Delta I_{Б} = 0,05 \text{ mA}$

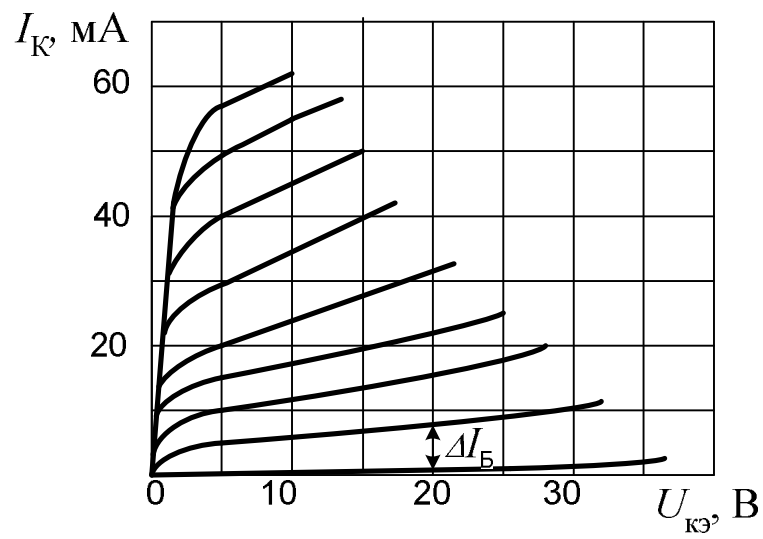
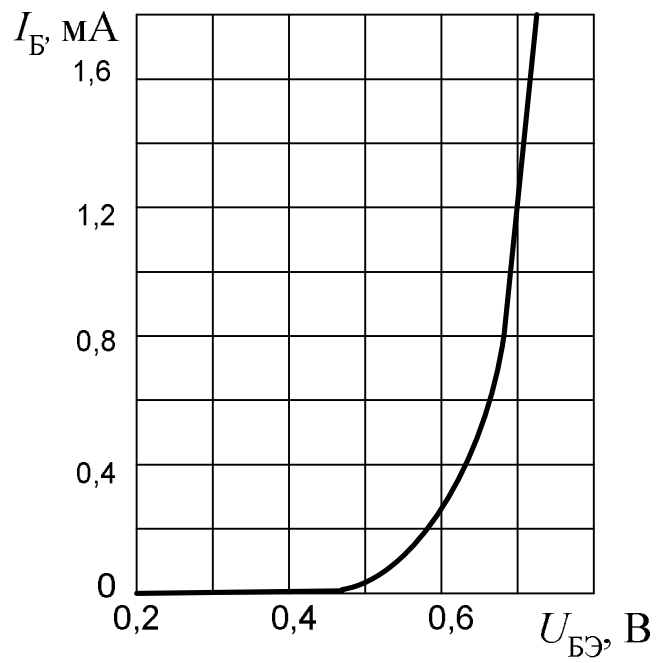
Рис. 2.5. Характеристики кремниевого n-p-n –транзистора КТ312



П307, П307Г, П309 –  $\Delta I_B = 350 \mu\text{A}$   
 П307А, П308 –  $\Delta I_B = 200 \mu\text{A}$ , П307Б, П307В –  $\Delta I_B = 100 \mu\text{A}$

Рис. 2.6. Характеристики кремниевых p-n-p –транзисторов П307, П308, П309





КТ361А, КТ361В, КТ361Д –  $\Delta I_B = 0,1 \text{ мА}$   
 КТ361Б, КТ361Г, КТ361Е –  $\Delta I_B = 0,05 \text{ мА}$

Рис. 2.7. Характеристики кремниевого р-п-р –транзистора КТ361

### 3. СХЕМА КОММУТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИНИСТОРА

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

Простейшая схема коммутации электрической цепи с использованием тринистора изображена на рис. 3.1. Проведем графоаналитический анализ её работы. Тринистор в этой схеме выполняет роль ключа.

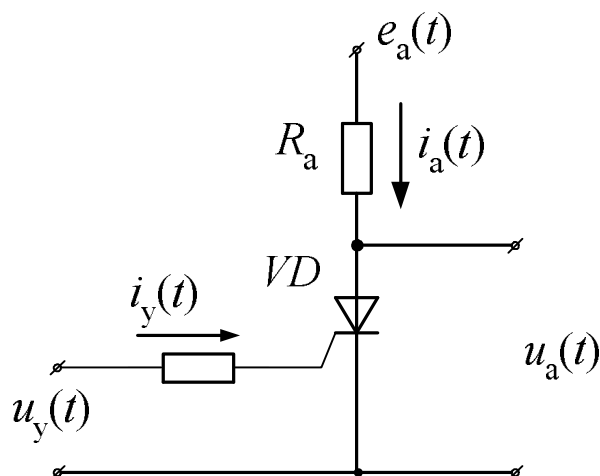


Рис. 3. 1. Схема коммутации с использованием тринистора

Анализ работы схемы производится с использованием вольтамперных характеристик тринистора, предполагая, что  $E_a$  и  $I_y$  переменные. Задача состоит в том, чтобы определить моменты включения и выключения тринистора и формы кривых изменений анодного тока  $i_a(t)$  и напряжения  $u_a(t)$ . Примерный вид вольтамперных характеристик тринистора для разных значений тока управления  $I_y$  показан на рис. 3.2. При анализе используется нагрузочная прямая, описываемая выражением  $u_a(t) = e_a(t) - R_a i_a(t)$ .

Если ЭДС анодного питания  $e_a$  изменяется во времени по некоторому закону, то нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе в соответствии с этим законом, причем при увеличении ЭДС она перемещается вправо, а при уменьшении – влево. Включение тринистора произойдет в момент, когда нагрузочная прямая при увеличении  $e_a$  пересечет точку, соответствующую напряжению включения при данном токе управления (например, на рис. 3.2 при  $I_y = I_{y1}$  точку 1).

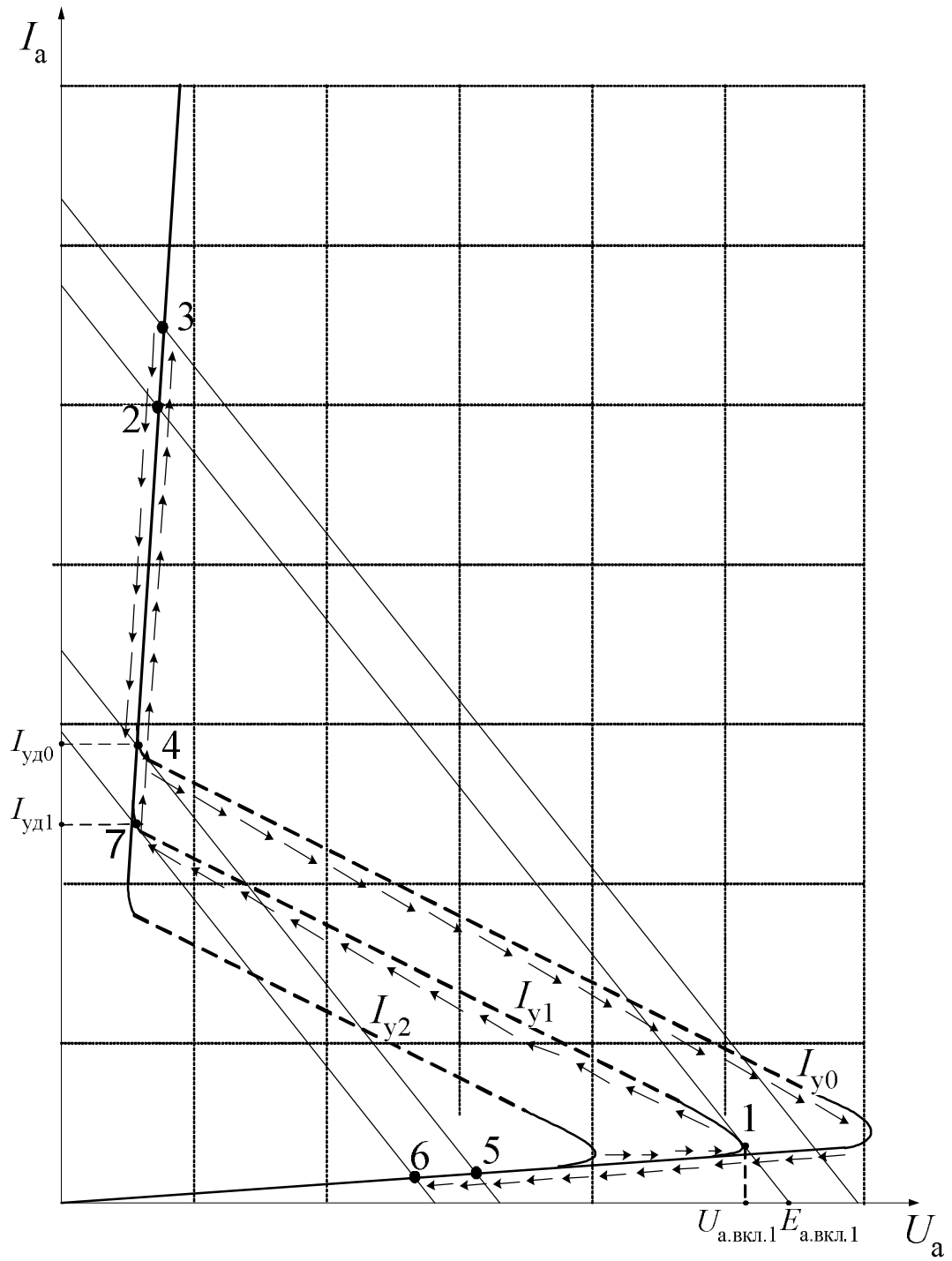


Рис. 3.2. Вольтамперные характеристики тристора с нагрузочными прямыми

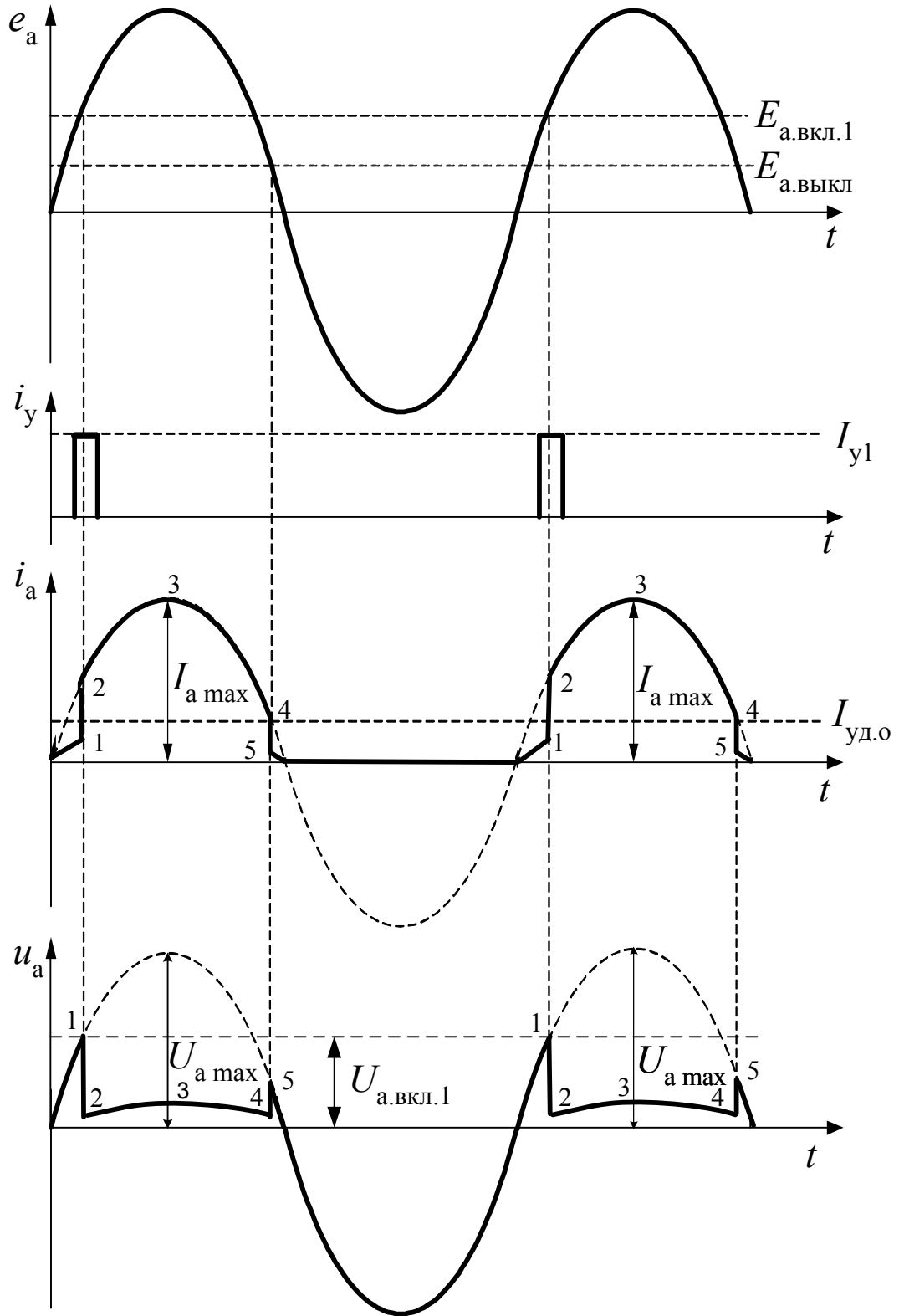


Рис. 3.3. Диаграмма работы схемы коммутации на тринисторе

В момент включения рабочая точка из положения 1 перейдет по неустойчивому участку в точку 2 и при дальнейшем росте ЭДС будет перемещаться вверх (например, до точки 3). При уменьшении  $e_a$  выключение тристора произойдет в момент времени, когда анодный ток упадет до величины тока удержания с учетом величины тока управления. Например, при  $I_y = 0$  выключение произойдет при уменьшении анодного тока до величины  $I_{уд.0}$  (точка 4 на рис. 3.2). Рабочая точка по неустойчивому участку ВАХ перейдет из положения 4 в положение 5, и при дальнейшем уменьшении  $e_a$  будет перемещаться влево по нижнему участку ВАХ (например, до точки 6).

Закон изменения  $e_a$  может быть любым. Из анализа работы схемы можно получить графики изменения анодного тока и анодного напряжения. Пусть, например,  $e_a$  изменяется по синусоидальному закону  $E_{a.m} \sin \omega t$ , и поданы импульсы тока управления с амплитудой  $I_{y1}$  (рис. 3.3). Тогда графики изменения  $i_a(t)$ ,  $u_a(t)$ , построенные в соответствии с видом ВАХ (рис. 3.2) будут выглядеть так, как показано на графиках (рис. 3.3).

Приближенно можно считать, что

$$I_{a.\max} \approx \frac{E_{a.\max}}{R_a}, \quad U_{a.\max} \approx E_{a.\max}.$$

Во включенном состоянии тристора напряжение на нем определяется положением рабочей точки на верхней части ВАХ. При выключенном состоянии тристора анодный ток мал по величине и его изменения соответствуют перемещению рабочей точке по нижней ветви ВАХ. Нумерация характерных точек на рис. 3.2 и 3.3 совпадает.

### 3.2. Задания для самостоятельной работы

Варианты заданий для самостоятельной работы состоят из двух частей-буквы и номера варианта исходных данных (номер строки в табл. 3.1). Буква обозначает форму внешней анодной ЭДС:

С – синусоидальная форма (рис. 3.4),

Т – треугольная форма (рис. 3.5).

Диаграммы изменения во времени токов управления изображены на рис. 3.6.

В задаче требуется построить кривые изменения анодного тока и анодного напряжения в соответствии с заданными исходными данными. Графики изменения анодной ЭДС, тока управления, анодного тока и анодного напряжения должны быть построены один под другим в одинаковом масштабе времени.

### Этапы решения:

а) изобразить вольтамперные характеристики заданного типа тиристора;

б) построить диаграммы изменения анодной ЭДС  $e_a$  и тока в цепи управления  $i_y$  в соответствии с заданными законами их изменения и ниже расположить две оси для построения графиков изменения анодного тока  $i_a$  и анодного напряжения  $u_a$  аналогично тому, как это сделано на рис. 3.3.

в) на ВАХ тиристора построить нагрузочную прямую в соответствии с выражением  $U_{a.\max} = E_{a.\max} - I_{a.\max}R_a$ ;

Если внешнее напряжение  $e_a$  изменяется во времени по некоторому закону, то нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе в соответствии с этим законом, т. к. сопротивление  $R_a$ , определяющее угол наклона этой прямой, постоянно. При увеличении  $e_a$  нагрузочная прямая перемещается вправо, а при уменьшении – влево;

г) определить момент включения тиристора, перемещая нагрузочную прямую вправо. Включение тиристора произойдет при увеличении  $e_a$ , когда нагрузочная прямая при ее перемещении вправо пересечет точку, соответствующую напряжению включения на ВАХ при данном токе управления (например, при  $I_y = I_{y1}$  точку 1 на рис. 3.3). В момент включения рабочая точка перейдет из положения 1 по неустойчивому участку в положение 2 и при дальнейшем росте  $e_a$  будет перемещаться вверх, например, до точки 3;

д) определить момент выключения тиристора, перемещая нагрузочную прямую влево (соответственно уменьшению анодной ЭДС). Выключение тиристора произойдет, когда анодный ток упадет до величины тока удержания с учетом величины тока управления. Например, при  $I_y = 0$  выключение произойдет при уменьшении анодного тока до величины  $I_{уд.0}$  (точка 4), а напряжение выключения соответствует точке 5 (рис. 3.3). Если в момент выключения ток в цепи управления не будет равен нулю, то выключение произойдет позже, при меньшем значении напряжения  $e_a$ . Например, при  $I_y = I_{y1}$  выключение произойдет при токе удержания  $I_{уд.1}$  (точка 7) и напряжении, соответствующем точке 6;

е) построить графики изменения анодного тока  $i_a(t)$  и анодного напряжения  $u_a(t)$ .

Варианты заданий для графоаналитического анализа схемы коммутации  
с использованием тиристора

Таблица 3.1

Вариант	Тип тиристора	Сопротивление в анодной цепи $R_a$ , Ом	Амплитуда анодной ЭДС, $E_{a.max}$ , В	Форма тока в цепи управления, (№ рисунка)	Амплитуда тока в цепи управления, $I_y$ , мА
1	2У104А	180	16	3.6-а	10
2	2У104А	160	16	3.6-б	18
3	2У104А	130	14	3.6-в	18
4	2У104А	180	16	3.6-г	25
5	2У104А	160	16	3.6-а	10
6	2У104А	130	14	3.6-б	25
7	2У104А	180	16	3.6-а	18
8	КУ102А	680	45	3.6-а	10
9	КУ102А	680	45	3.6-б	15
10	КУ102А	680	45	3.6-в	20
11	КУ102А	680	45	3.6-г	10
12	КУ102А	680	45	3.6-в	15
13	КУ102А	680	45	3.6-в	20
14	КУ102А	750	55	3.6-а	15
15	КУ202В	9,1	55	3.6-а	200
16	КУ202В	9,1	55	3.6-б	150
17	КУ202В	9,1	55	3.6-в	100
18	КУ202В	9,1	55	3.6-г	50
19	2У104Б	240	30	3.6-а	10
20	2У104Б	240	30	3.6-б	18
21	2У104Б	240	30	3.6-в	25
22	2У104Б	270	35	3.6-г	10
23	2У104Б	270	35	3.6-а	18
24	2У104Б	270	35	3.6-б	25
25	2У104А	200	15	3.6-в	10
26	2У104А	250	20	3.6-г	18
27	2У104А	200	15	3.6-а	25
28	КУ202В	10	60	3.6-б	100
29	КУ202В	12	50	3.6-в	200
30	2У104А	150	20	3.6-г	18

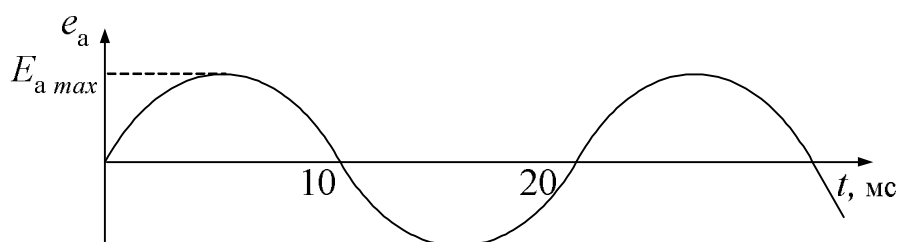


Рис. 3.4. Синусоидальная форма изменения анодной ЭДС

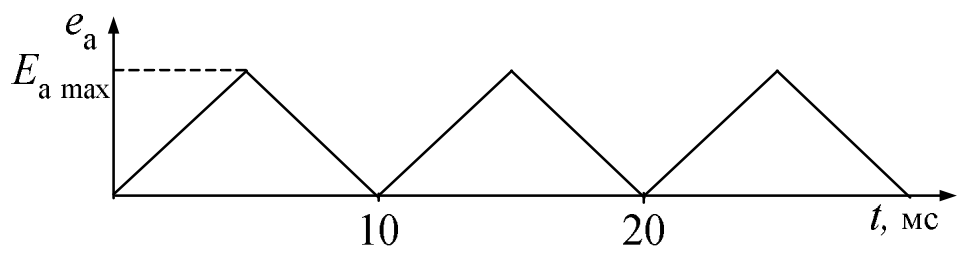


Рис. 3.5. Треугольная форма изменения анодной ЭДС

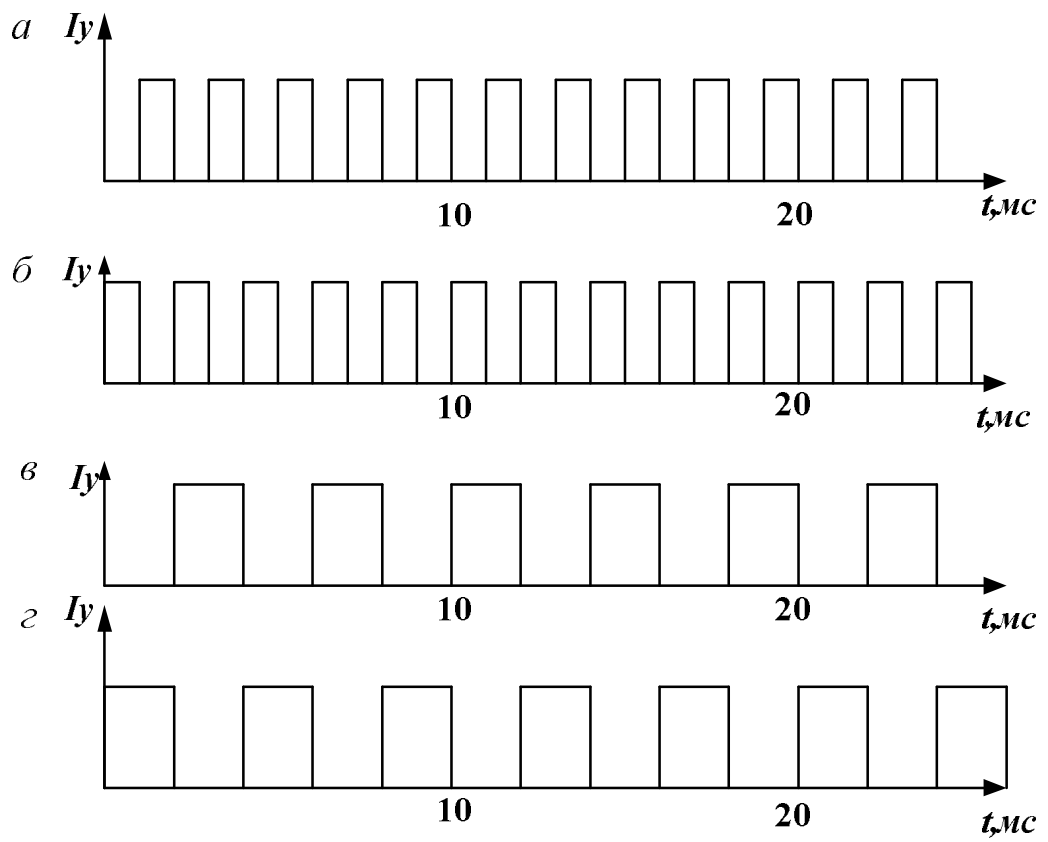


Рис. 3.6. Диаграммы изменения тока управления



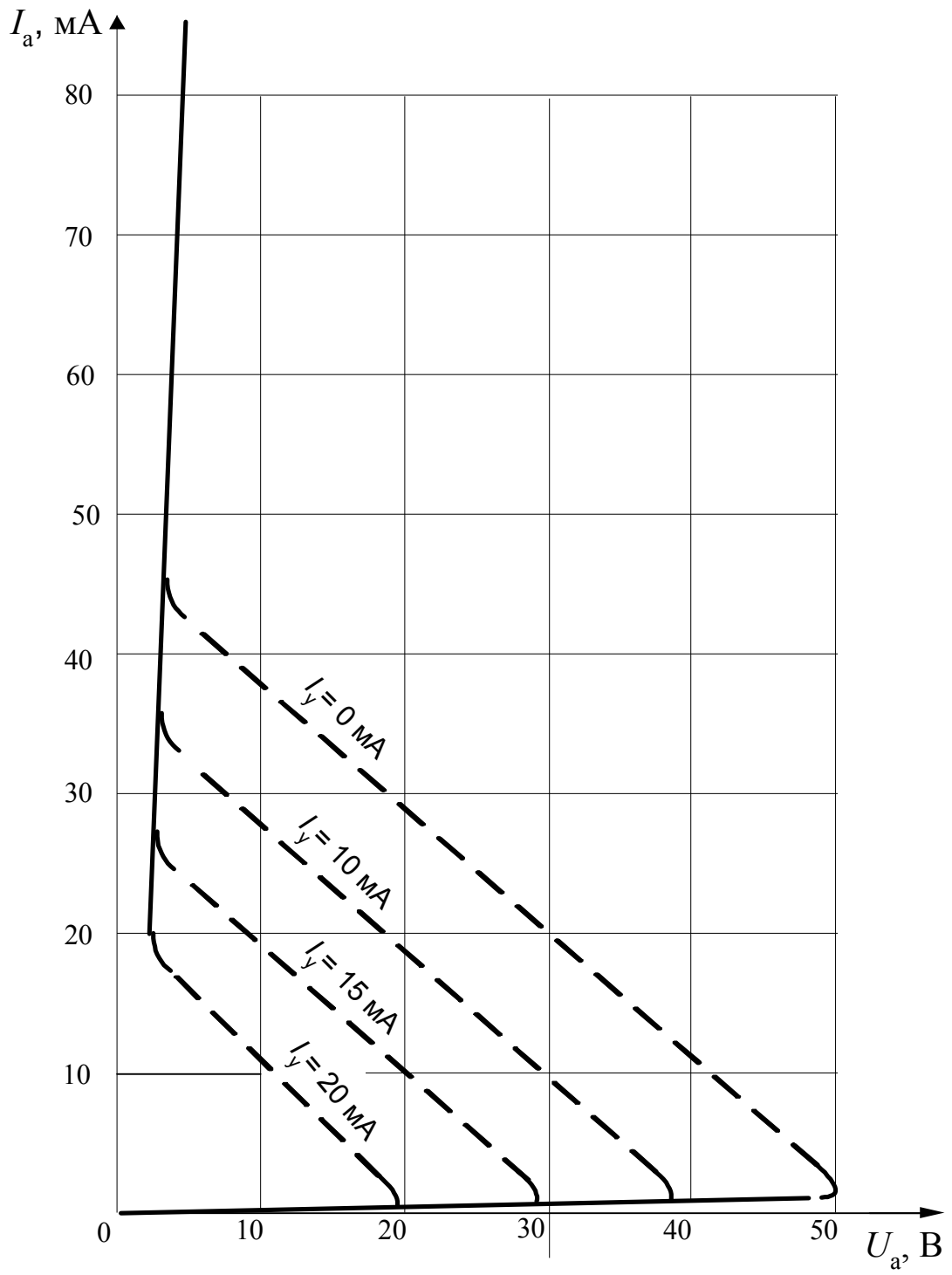


Рис. 3.7. Вольтамперные характеристики тиристора КУ102А

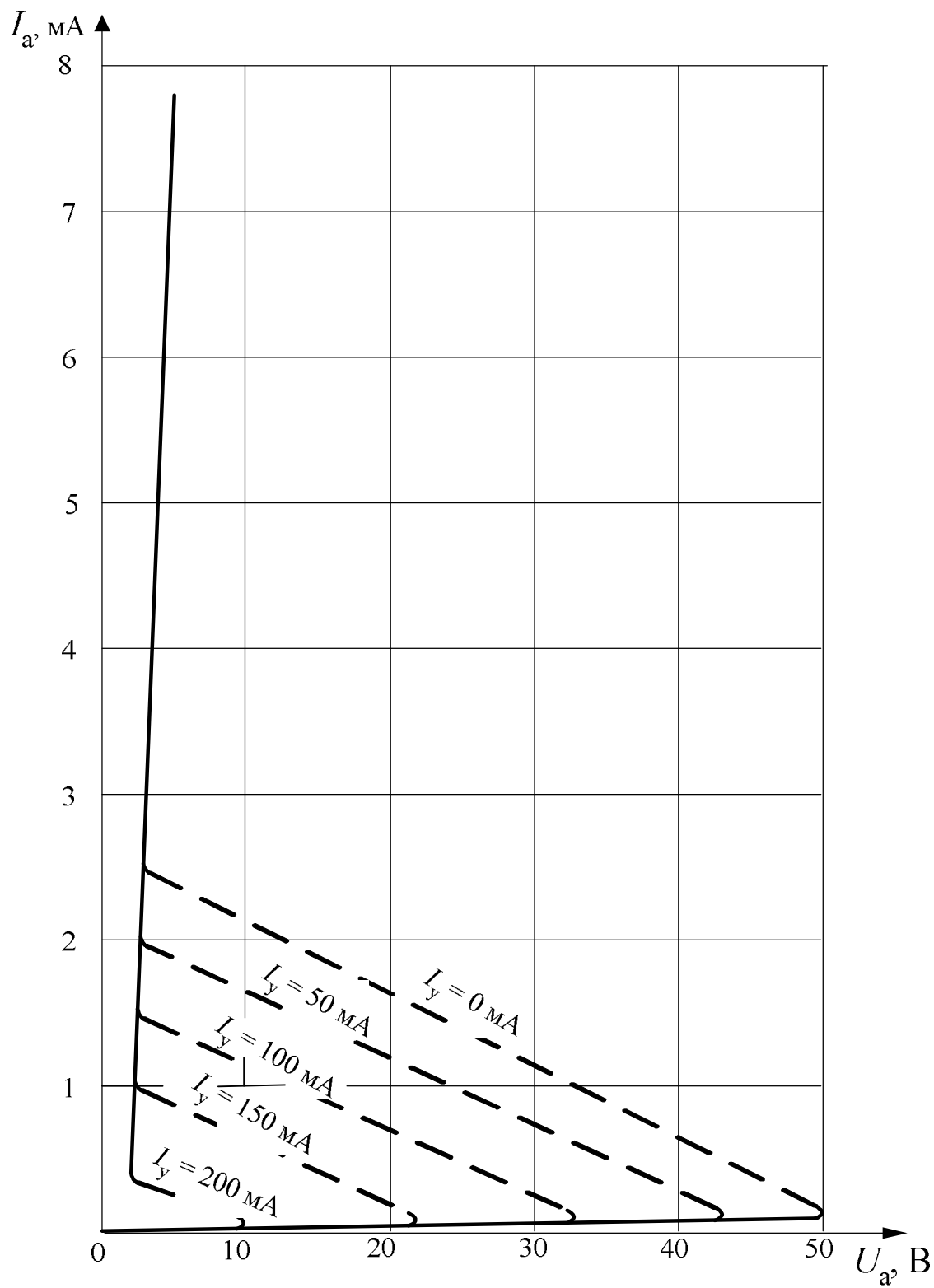


Рис. 3.8. Вольтамперные характеристики тиристора КУ202В

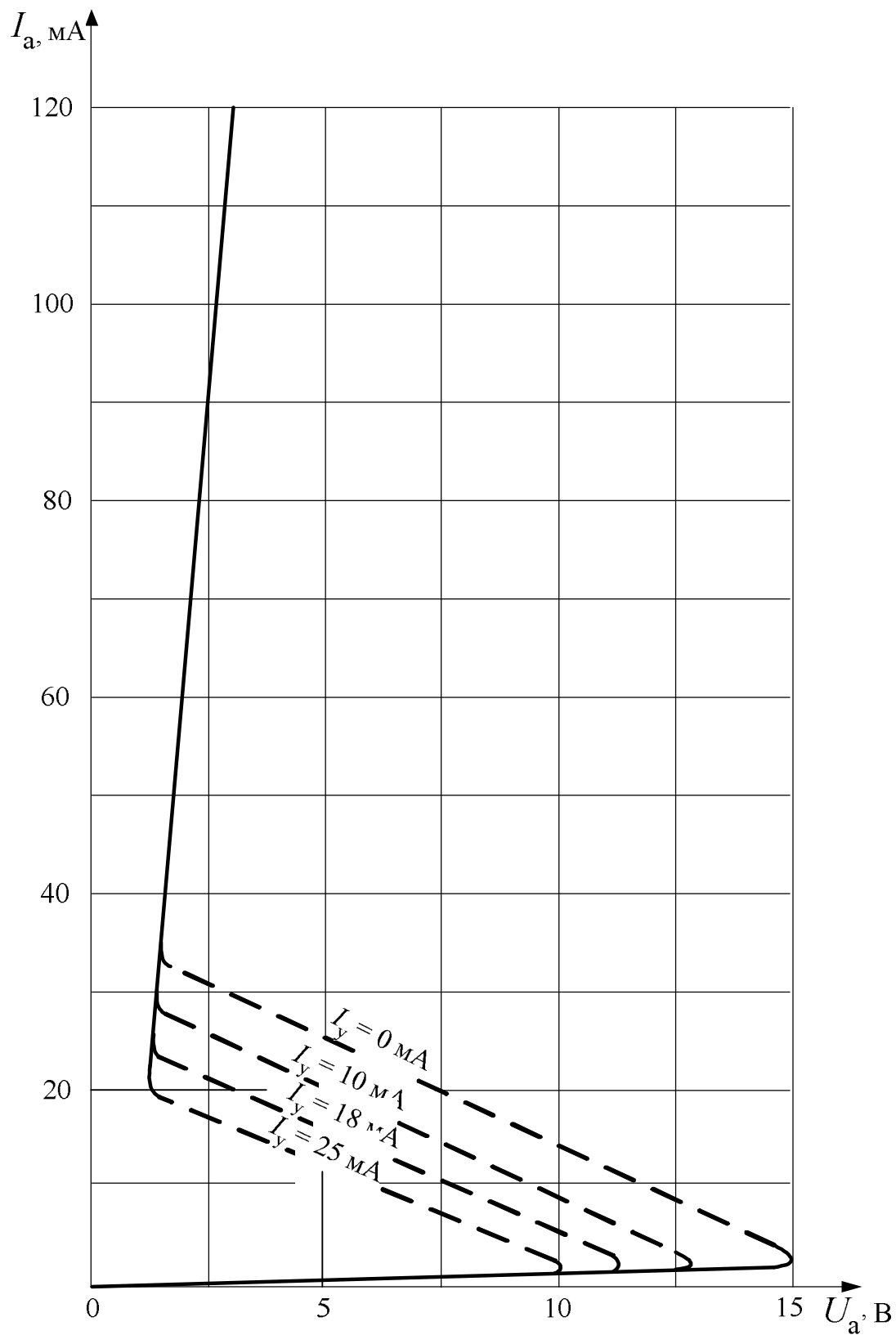


Рис. 3.9. Вольтамперные характеристики тиристора 2Y104A

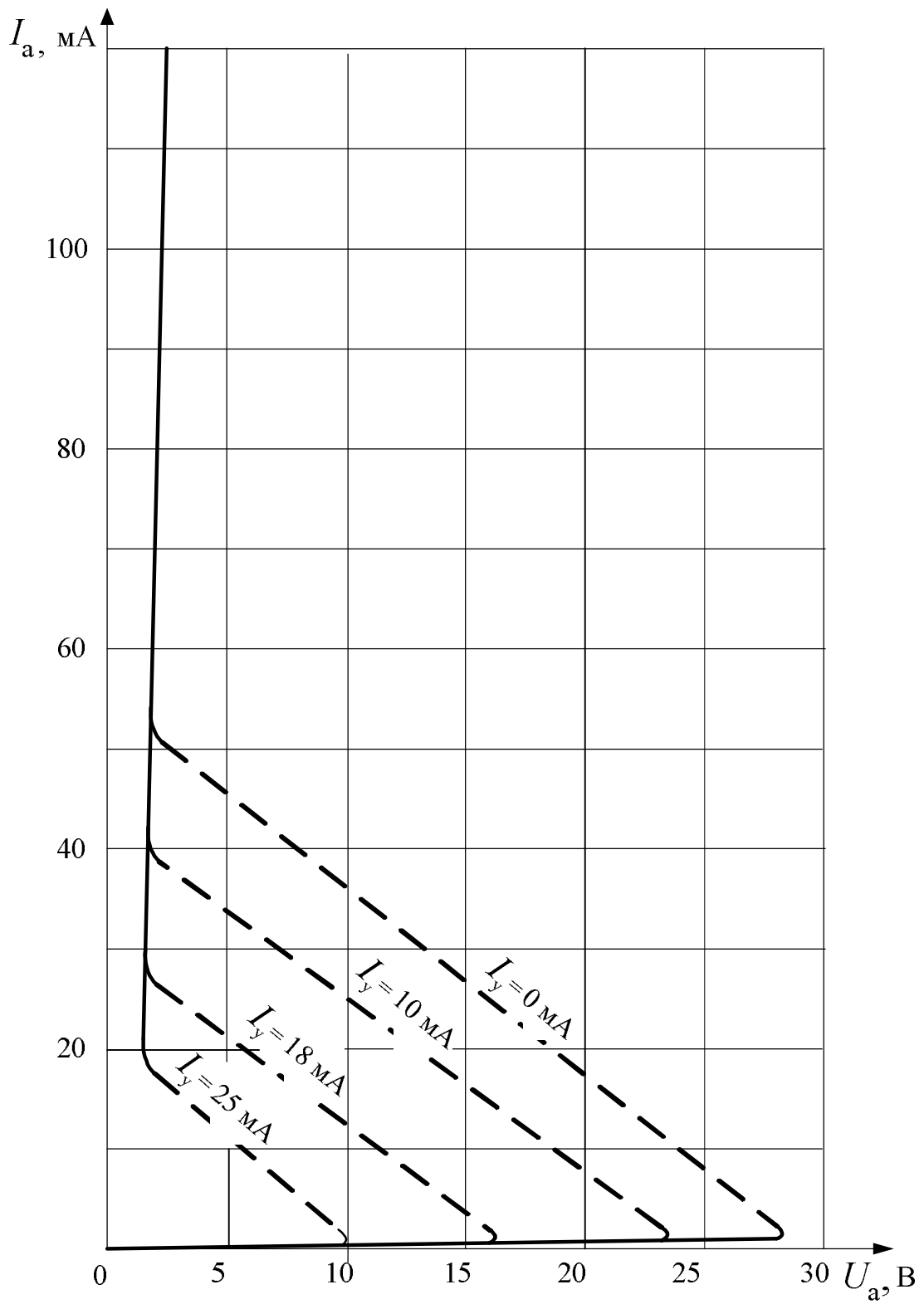


Рис. 3.10. Вольтамперные характеристики тиристора 2У104Б

## 4. Дифференцирующие и интегрирующие RC-цепи

### 4.1. Краткие теоретические сведения

Дифференцирующие и интегрирующие цепи получили широкое применение для формирования импульсов различной формы в импульсных схемах и для реализации требуемых режимов работы электронных схем.

В настоящем разделе рассматриваются задачи, связанные с прохождением прямоугольного импульса через простейшие RC-цепи, состоящие из резистора и конденсатора. С точки зрения функций, которые реализуются в этих цепях, их разделяют на дифференцирующие и интегрирующие.

Их разделяют в зависимости от того, с какого элемента снимается выходное напряжение и от параметров цепи. Если выходное напряжение снимается с резистора (рис. 4.1), то цепь называется дифференцирующей, а если выходное напряжение снимается с конденсатора (рис. 4.2), то цепь носит название интегрирующей.

Произведение RC имеет размерность времени, называется *постоянной времени* и характеризует длительность переходного процесса в цепи.

#### Дифференцирующие цепи

Рассмотрим физические процессы, происходящие в RC-цепи, изображенной на рис. 4.1, при подаче на ее вход импульса напряжения идеальной прямоугольной формы с длительностью  $t_{и}$ . Соответствующие временные диаграммы показаны на рис. 4.2. Для упрощения анализа полагаем, что внутреннее сопротивление  $R_i$  генератора входных прямоугольных импульсов равно нулю.

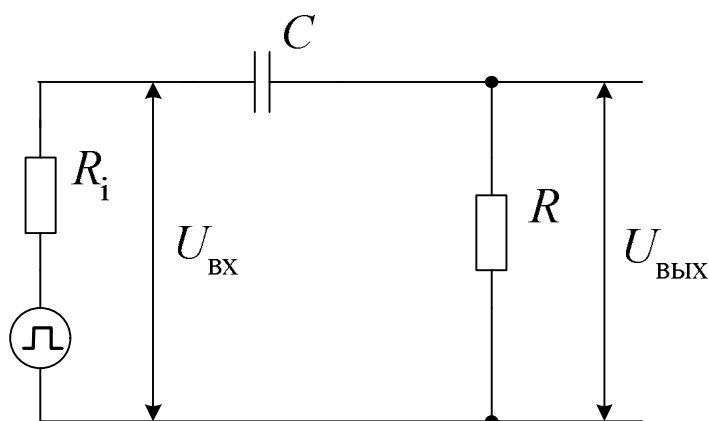


Рис. 4.1. Дифференцирующая RC-цепь

В исходном состоянии  $t < t_1$ , до воздействия входного импульса  $U_{вх} = 0$ , в цепи нет никаких запасов энергии, следовательно, напряжения на элементах цепи и ток в цепи равны нулю:

$$U_c = 0, I_c = 0, U_{\text{ВЫХ}} = 0$$

По второму закону Кирхгофа  $U_{\text{ВХ}} = U_c + U_{\text{ВЫХ}}$ .

В момент  $t = t_1$  на вход цепи скачком подается напряжение  $U_{\text{ВХ}} = E$ . Так как напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, а начальное напряжение на нем  $U_{c0}$  равно нулю, то все напряжение  $E$  в этот момент окажется приложенным к сопротивлению  $R$ , а начальный ток заряда конденсатора равен  $I_c = I_{c.\text{max}} = \frac{E}{R}$ .

Далее в течение времени  $t > t_1$  происходит заряд конденсатора убывающим током

$$I_c(t) = I_{c.\text{max}} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}},$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени цепи заряда конденсатора, характеризующая длительность переходного процесса.

По мере заряда конденсатора  $C$  напряжение  $U_c$  нарастает от нулевого значения по экспоненциальному закону  $U_{\text{ВЫХ}}(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ .

Напряжение на выходе при этом по форме соответствует закону изменения тока заряда конденсатора (убывающая экспонента)

$$U_c(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

В любой момент времени при этом выполняется равенство:

$$U_{\text{ВХ}} = U_c + U_{\text{ВЫХ}}.$$

В момент  $t_2$  окончания действия входного импульса напряжение на выходе оказывается равным по величине:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t_2) = E \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}}$$

В момент  $t_2$  напряжение на входе скачком уменьшается до нуля. Конденсатор  $C$  становится источником напряжения, выходное напряжение в этот момент времени меняет знак и становится равным по величине  $U_c(t_2)$ . Далее начинается разряд конденсатора с той же постоянной времени через резистор  $R$  и через нулевое внутреннее сопротивление источника сигнала. Выходное напряжение убывает по величине по экспоненте, стремясь к нулю

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -U_c(t_2) e^{-\frac{t}{RC}}$$

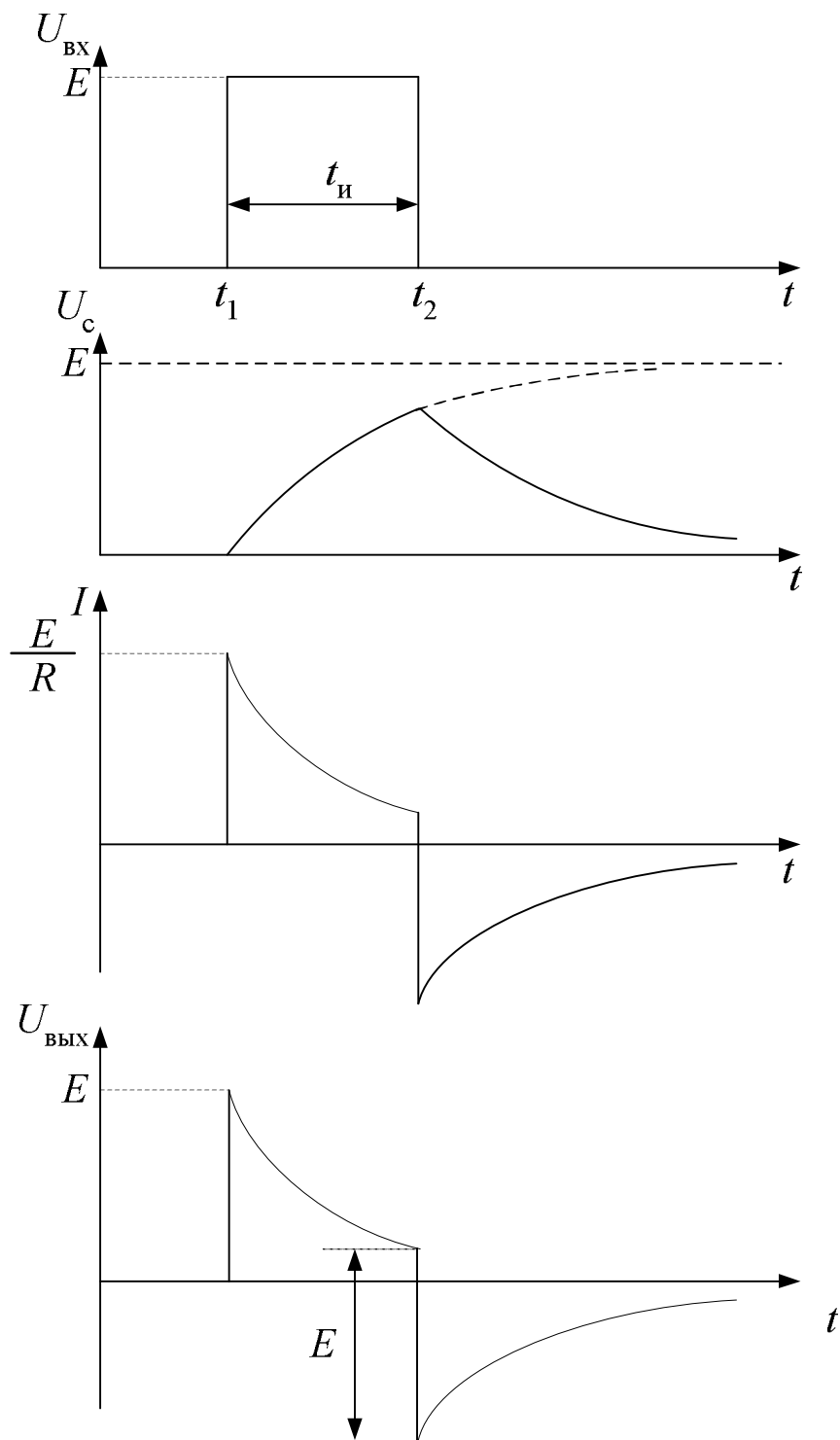


Рис. 4.2. Временные диаграммы сигналов в дифференцирующей цепи

Физические процессы, происходящие в данной цепи при различных значениях  $\tau = RC$ , аналогичны и различаются лишь количественными характеристиками. Изменение формы импульса на выходе в зависимости от соотношения между постоянной времени цепи и длительностью входного импульса  $t_n$  пока-

зано на рис. 4.3. При выполнении соотношения  $RC \ll t_{\text{и}}$  (рис. 4.3, б) на выходе цепи формируются короткие остроконечные импульсы, т. е. реализуется операция, приближенная к идеальному дифференцированию. Такие цепи предназначены для запуска импульсных устройств, например, ждущих мультивибраторов.

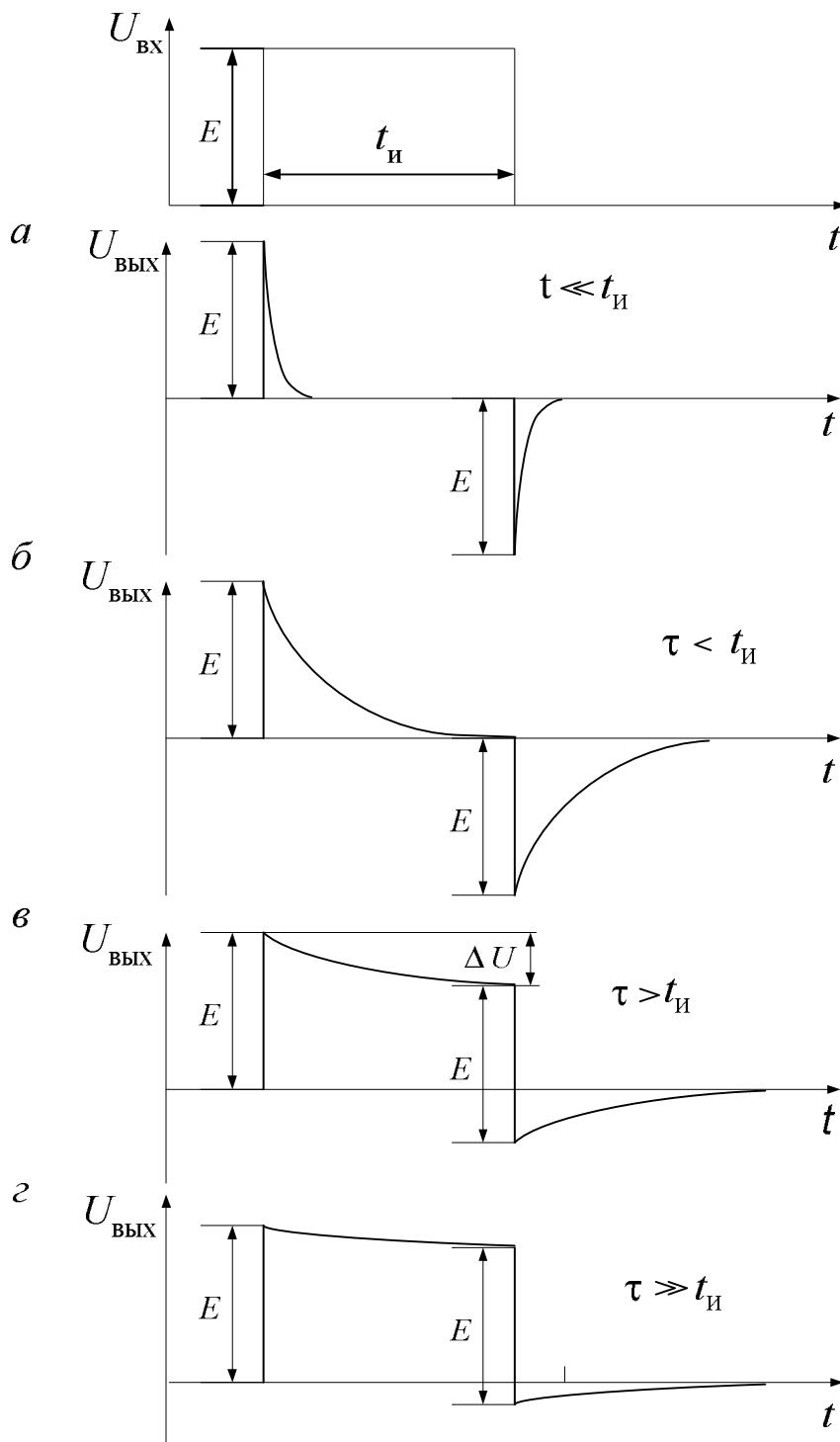


Рис. 4.3. Временные диаграммы сигналов в дифференцирующей цепи при различных соотношениях длительности импульса и постоянной времени



Временные диаграммы выходного сигнала при выполнении соотношения  $RC < t_{и}$  показаны на рис. 4.3, в. В этом случае длительность выходного импульса меньше, чем входного, и такая цепь называется укорачивающей. Ее назначение – получение укороченного по сравнению со входным импульса. Графики на рис. 4.3, з и 4.3, д иллюстрируют превращение цепи в переходную (разделительную). Такие цепи обычно включаются между смежными каскадами усилителей для того, чтобы исключить влияние их друг на друга по постоянному току. Если выполняется неравенство  $RC > t_{и}$ , то форма выходного импульса значительно отличается от прямоугольной, появляется так называемый скол вершины  $\Delta U$ , что не всегда допустимо. Если же  $RC \gg t_{и}$ , как показано на рис. 4.3, д, то входной импульс передается на выход почти без искажения, форма выходного импульса при этом близка к прямоугольной. Очевидно, чем больше постоянная времени, тем меньше искажение формы выходного импульса.

### Интегрирующие цепи

Рассмотрим работу интегрирующей цепи в случае поступления на ее вход прямоугольного импульса. Схема цепи показана на рис. 4.4, а временные диаграммы входного и выходного сигналов – на рис. 4.5. Полагаем при этом, что внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_i$  равно нулю.

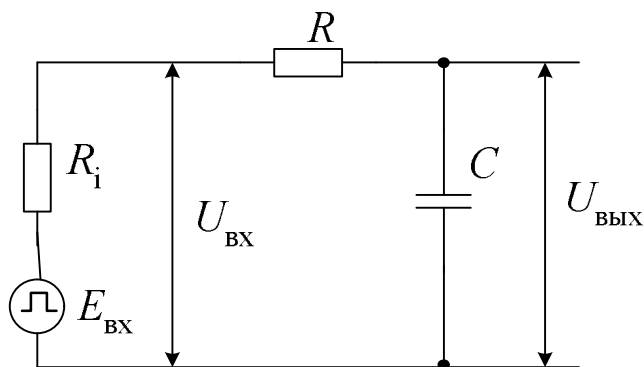


Рис. 4.4. Схема интегрирующей цепи

В момент  $t_1$  на вход цепи подается скачком напряжения  $U_{ВХ}$  с амплитудой  $E$ . Так как напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком, то в момент  $t_1$  все входное напряжение будет приложено к резистору  $R$ , выходное напряжение в этот момент времени будет равным нулю, а начальный ток в цепи равен  $I_{C0} = \frac{E}{R}$ . Далее происходит заряд конденсатора  $C$ . Напряжение на

конденсаторе нарастает по закону  $U_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ , стремясь к напряжению  $E$ , а ток заряда убывает по закону  $I_c(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$ . В момент  $t = t_2$  напряжение на входе уменьшается скачком до нуля и конденсатор  $C$ , заряженный до величины  $U_{c.m}$ , начинает разряжаться по экспоненциальному закону

$$U_c(t) = U_{c.m} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Так как выходное напряжение снимается с конденсатора, то его форма полностью соответствует изменению напряжения на конденсаторе.

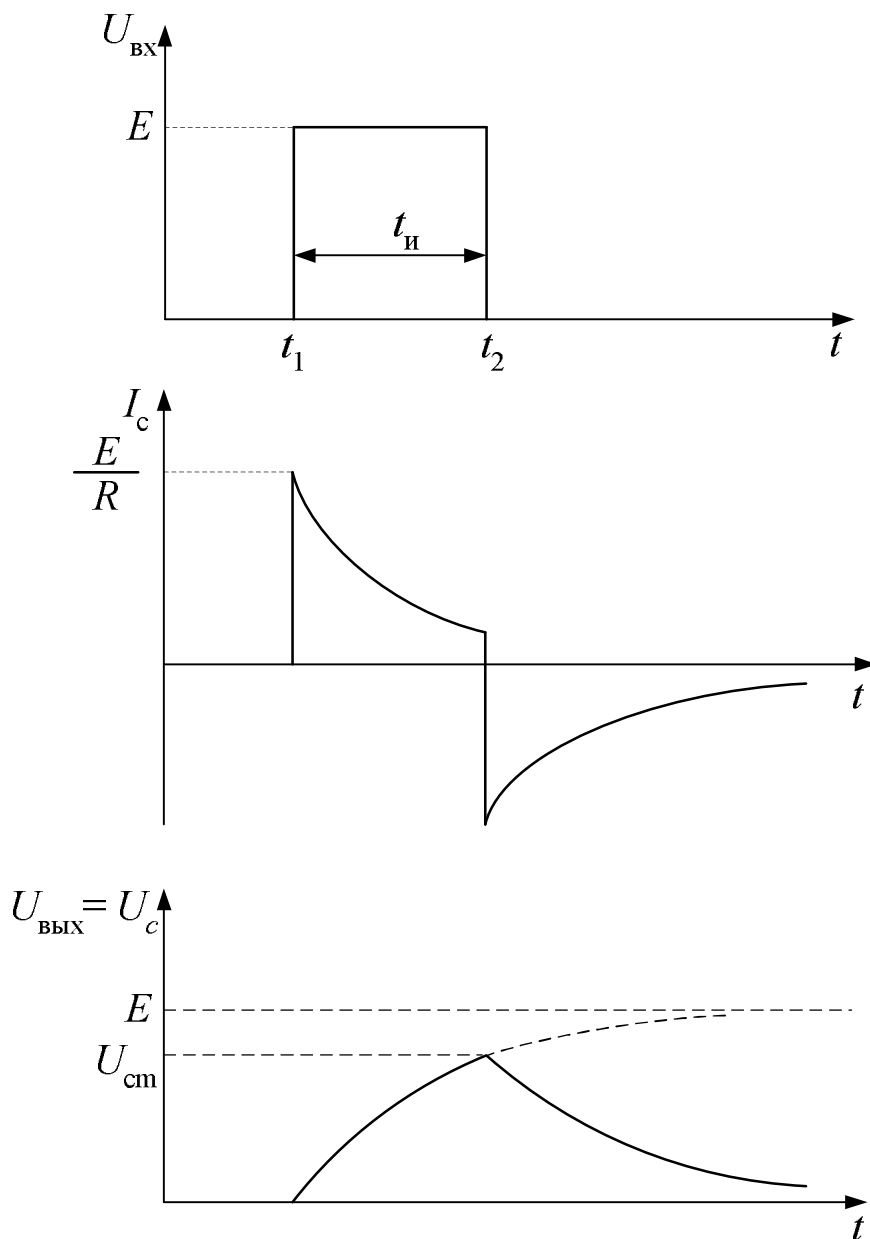


Рис. 4.5. Процессы в интегрирующей цепи

Временные диаграммы, показанные на рис. 4.5, соответствуют случаю, когда постоянная времени цепи сравнима с длительностью входного импульса. Если выполняются другие соотношения между постоянной времени и длительностью импульса, то форма выходного импульса может быть другой. На рис. 4.6 показан вид выходного напряжения для различных соотношений между этими временными параметрами.

Если постоянная времени цепи намного меньше длительности входного импульса  $\tau \ll t_{и}$ , то конденсатор успевает практически полностью зарядиться за время  $t_{и}$  (рис. 4.6, а). При этом форма выходного импульса искажается незначительно, почти повторяя форму входного импульса, но выходной импульс имеет конечную длительность фронтов.

Если постоянная времени сравнима с длительностью входного импульса, т. е. выполняется соотношение  $\tau < t_{и}$ , то это приводит к значительному затягиванию переднего и заднего фронтов импульса (рис. 4.6, б). Форма выходного импульса при этом значительно отличается от прямоугольной.

При достаточно большой величине постоянной времени цепи  $\tau > t_{и}$  за время действия импульса конденсатор  $C$  не успевает зарядиться до величины входного напряжения  $E$ , и процесс заряда прекращается в момент  $t_2$  по окончании действия входного импульса. После этого конденсатор разряжается через резистор  $R$  и нулевое внутреннее сопротивление источника сигнала с той же постоянной времени (рис. 4.6, в). Длительность выходного импульса увеличивается, в связи с чем такую цепь называют удлиняющей и используют для формирования удлиненных импульсов по сравнению со входными.

При значительном превышении постоянной времени по отношению к длительности входного импульса  $\tau \gg t_{и}$  нарастание выходного напряжения происходит медленно (рис. 4.6, г) до малой амплитуды. Это объясняется тем, что при большом значении  $\tau$  конденсатор не успевает за время действия импульса зарядиться до значительного напряжения. Такие цепи используются в качестве интегрирующих. Известно, что при реализации операции интегрирования выходное напряжение при подаче постоянного по величине входного напряжения должно изменяться по линейному закону. Использование рассматриваемой цепи при большой постоянной времени цепи позволяет получить приближенное к линейному изменение напряжения на начальном участке экспоненты.

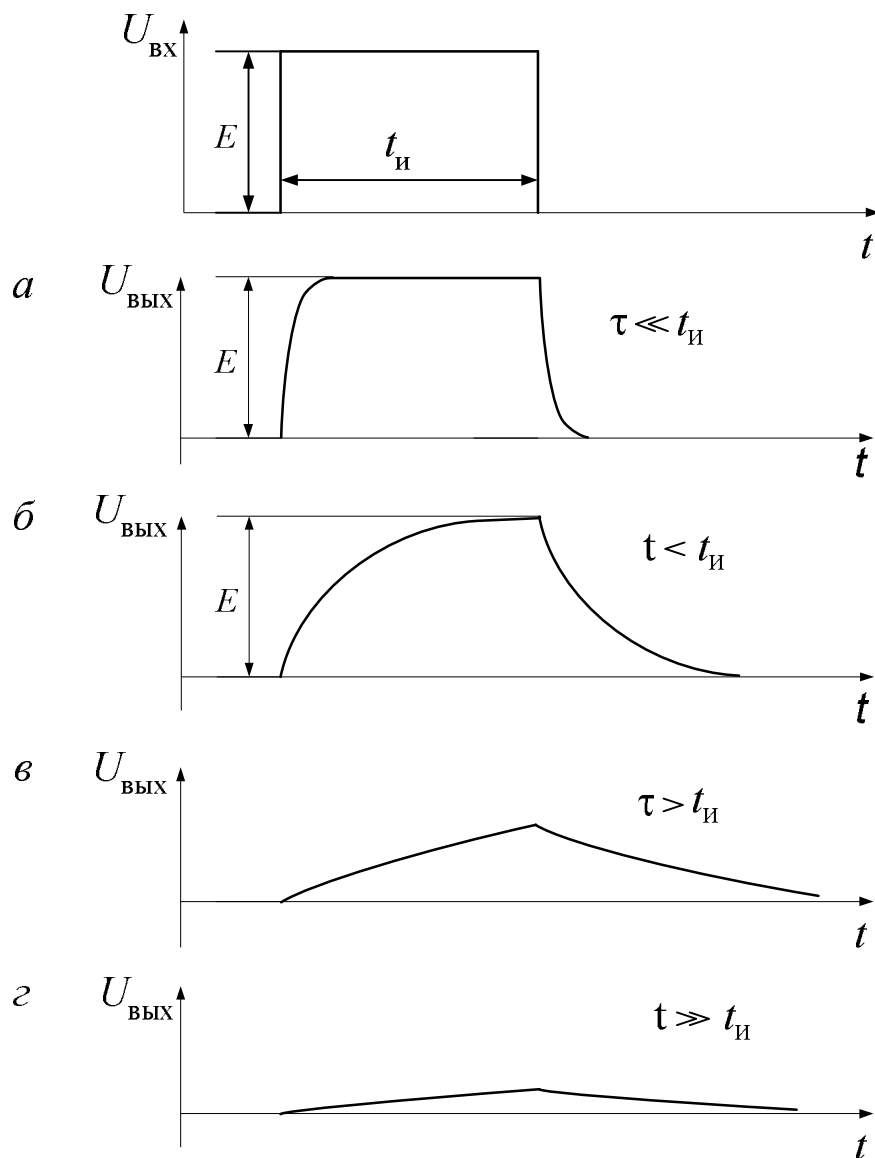


Рис. 4.6. Временные диаграммы сигналов в интегрирующей цепи при различных соотношениях длительности импульса и постоянной времени цепи

## 4.2. Задания для самостоятельной работы

Задания заключаются в построении временных диаграмм изменения выходных напряжений при прямоугольной форме входного импульса и заданной его амплитуде и длительности. Для построения диаграмм можно использовать выражения, приведенные выше и описывающие экспоненциальные законы изменения напряжений на выходе. Можно также использовать приближенные приемы построения экспоненциальных кривых, учитывая характерный для этих кривых момент времени, соответствующий постоянной времени цепи. Этот упрощенный прием иллюстрируется графиками, приведенными для дифференцирующих цепей на рис. 4.7, а, а для интегрирующих – на рис. 4.7, б.

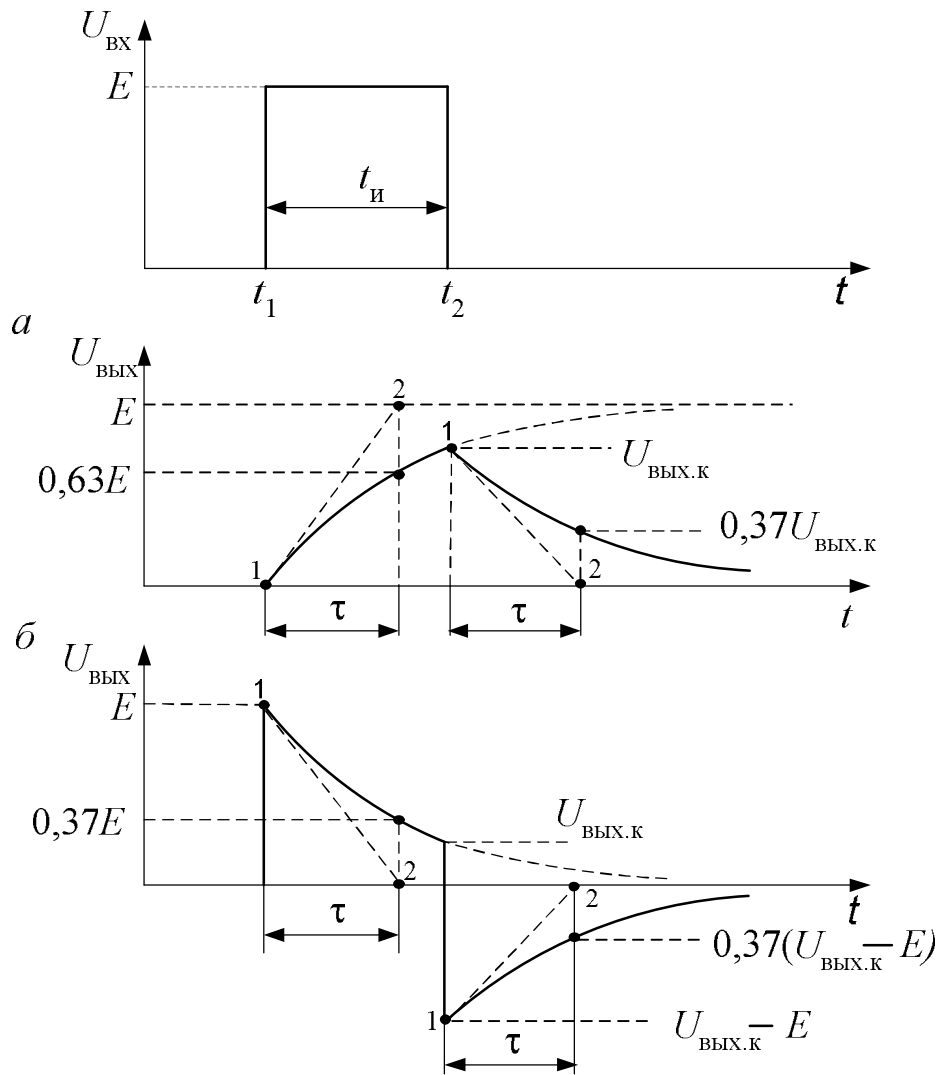


Рис. 4.7. Построение графиков выходных напряжений дифференцирующих и интегрирующих цепей упрощенным способом

Для построения графиков выходных напряжений при использовании этого способа учитывается характерный момент времени, соответствующий постоянной времени цепи  $\tau$ . На рис. 4.7 показаны значения выходных напряжений в эти моменты времени, пользуясь которыми легко построить экспоненциальные кривые изменения напряжений во времени. Отрезки прямых 1–2 (рис. 4.7) представляют собой касательные, проведенные в моменты начала и конца входного прямоугольного импульса к графикам выходных напряжений. С помощью касательных графики можно построить более точно.

Отчет по данной самостоятельной работе должен содержать:

- схему цепи и исходные данные в соответствии с вариантом задания,
- графики входного напряжения и выходного напряжения, построенные в одном масштабе по времени и по напряжению с указанием всех необходимых значений времен и напряжений,

– расчеты, необходимые для построения графиков.

### Варианты заданий

Для каждого варианта задается вид цепи (дифференцирующая или интегрирующая) и исходные численные данные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$	1 кОм	2 Ом	6 кОм	12 кОм	50 кОм	5 кОм	10 кОм	20 кОм	100 кОм	50 кОм
$C$	100 пФ	50 пФ	200 пФ	100 пФ	10 пФ	1 нФ	100 пФ	500 пФ	1000 пФ	5 нФ
$t_{и}$	10 мкс					50 мкс				

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R$	2 кОм	30 кОм	100 кОм	0,5 МОм	1 МОм	10 кОм	50 кОм	100 кОм	30 кОм	0,5 МОм
$C$	100 пФ	100 пФ	200 пФ	150 пФ	50 пФ	1000 пФ	500 пФ	2 нФ	0,01 мкФ	0,1 мкФ
$t_{и}$	0,2 мс					0,5 мс				

Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$R$	120 Ом	300 кОм	1000 кОм	0,5 МОм	1 МОм	100 кОм	50 кОм	100 кОм	300 кОм	0,5 МОм
$C$	1000 пФ	500 пФ	2 нФ	15 нФ	0,5 нФ	100 нФ	5000 нФ	20 нФ	0,01 мкФ	0,1 мкФ
$t_{и}$	1 мс					5 мс				

Вариант	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$R$	20 кОм	300 кОм	1000 кОм	0,5 МОм	1 МОм	100 кОм	50 кОм	100 кОм	300 кОм	0,5 МОм
$C$	1000 пФ	500 пФ	20 нФ	150 нФ	0,5 мкФ	100 нФ	5000 пФ	200 нФ	0,1 мкФ	1 мкФ
$t_{и}$	100 мс					1 с				

### Библиографический список

1. *Лачин В.И., Савелов Н.С.* Электроника. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 710 с.
2. *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы. – М.: Лань, 2009. – 479 с.
3. *Прянишников В.А.* Электроника. Курс лекций. – СПб.: Корона принт, 2002. – 415 с.
4. *Марченко А .Л.* Основы электроники. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 296 с.
5. *Нефедов В.И.* Основы радиоэлектроники и связи. – М.: Высш. шк., 2002. – 510 с.

*Учебное издание*

**Новоселов Юрий Викторович**

## **Физические основы электроники**

Сборник задач с методическими указаниями  
к их решению для студентов специальностей  
190402 – «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном  
транспорте» и 190401 – «Электроснабжение железных дорог»

Редактор *С. В. Пилюгина*

Подписано в печать 18.01.11. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,8

Тираж 150 экз. Заказ № 796

+

Издательство УрГУПС

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66