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

Ю. В. Новоселов
Г. Л. Штрапенин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сборник задач с методическими указаниями
для студентов специальностей
190901 – «Системы обеспечения движения поездов»,
090900.62 – «Информационная безопасность»,
220400.62 – «Управление в технических системах
на железнодорожном транспорте»

Екатеринбург
УрГУПС
2016

УДК 621.38 (075.8)
Н76

Новоселов, Ю. В.

Н76 Физические основы электроники : сб. задач с метод. указаниями к их решению / Ю. В. Новоселов, Г. Л. Штрапенин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 92 с.

Сборник задач предназначен для самостоятельной работы студентов специальностей 190901 – «Системы обеспечения движения поездов», 090900.62 – «Информационная безопасность», 220400.62 – «Управление в технических системах на железнодорожном транспорте» и может быть использован студентами всех форм обучения.

Даны рекомендации к решению типовых задач по амплитудным ограничителям, усилителю на биполярном транзисторе, схеме коммутации на тринисторе, по анализу работы RC-цепей, интегральных триггеров и схем на операционных усилителях, содержатся варианты задач и исходные численные данные.

УДК 621.38 (075.8)

Опубликовано по решению редакционно-издательского совета университета

Авторы:

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

Г. Л. Штрапенин, доцент кафедры «Электрические машины», канд. физ.-мат. наук, УрГУПС

Рецензент:

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

Учебное издание

Новоселов Юрий Викторинович
Штрапенин Геннадий Львович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Редактор Пилюгина С. В.
Верстка Наймушиной С. Н.

Подписано в печать 11.06.16. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 5,3. Тираж 50 экз. Заказ 7.

УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

© Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2016

Оглавление

1. АМПЛИТУДНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ 4
1.1. Основные сведения об амплитудных ограничителях 4
1.2. Задания для самостоятельной работы 11

2. УСИЛИТЕЛЬ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ 14
2.1. Описание графоаналитического метода расчета усилителя 14
2.2. Задания для самостоятельной работы 16

3. СХЕМА КОММУТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИНИСТОРА 26
3.1. Краткие теоретические сведения 26
3.2. Задания для самостоятельной работы 29

4. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ И ИНТЕГРИРУЮЩИЕ *RC*-ЦЕПИ 36
4.1. Краткие теоретические сведения 36
4.2. Задания для самостоятельной работы 44

5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТРИГГЕРЫ 48
5.1. Краткие теоретические сведения 48
5.2 Задания для самостоятельной работы 51

6. СХЕМЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ 82
6.1. Краткие теоретические сведения 82
6.2. Задания для самостоятельной работы 85

Библиографический список 92

1. 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 $R_{обр} \to \infty$. 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*.

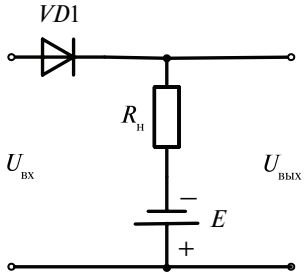


Рис. 1.1. Последовательный диодный ограничитель снизу с отрицательным порогом ограничения

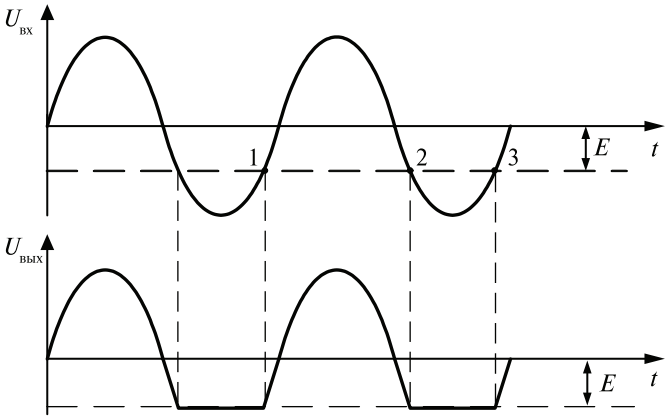


Рис. 1.2. Временные диаграммы работы последовательного ограничителя снизу с отрицательным порогом ограничения

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.

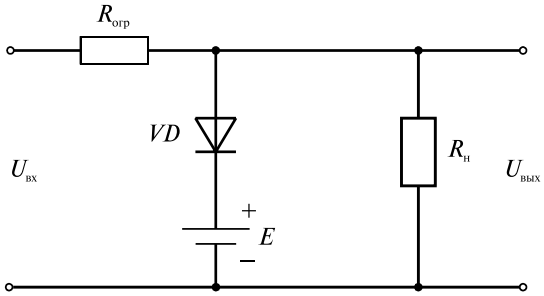


Рис. 1.3. Параллельный диодный ограничитель с положительным порогом ограничения сверху

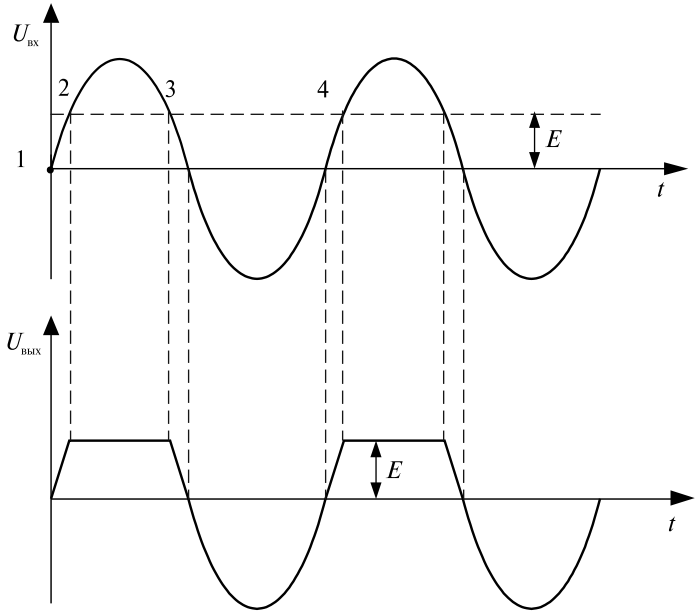


Рис. 1.4. Временная диаграмма процессов в параллельном диодном ограничителе с положительным порогом ограничения сверху

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 примерам, рассмотренным выше, 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. Вольт-амперная характеристика стабилитрона изображена на рис. 1.5.

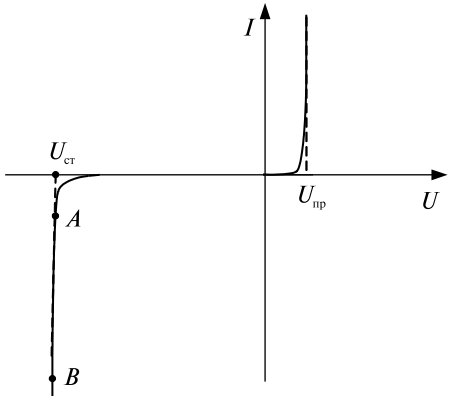


Рис. 1.5. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона

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.

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.

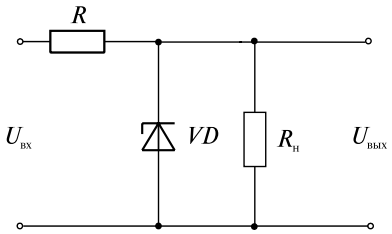


Рис. 1.6. Параллельный ограничитель сверху с положительным порогом на стабилитроне

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

В промежуток времени 4–5 стабилитрон закрыт, так как входное напряжения 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. 1.7 примерно соответствуют стабилитрону КС133, для которого напряжение стабилизации составляет около 3,3 В.

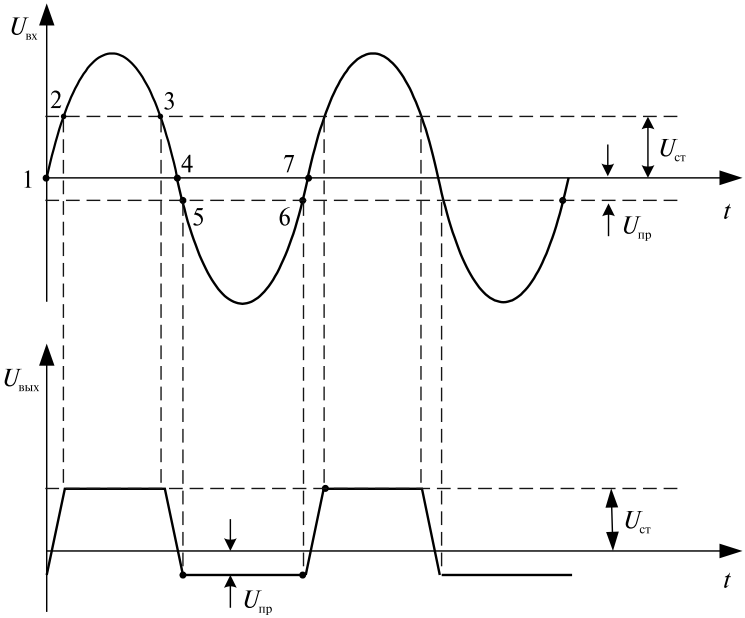


Рис. 1.7. Временная диаграмма входного и выходного напряжения амплитудного ограничителя, выполненного по схеме, приведенной на рис. 1.6

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.

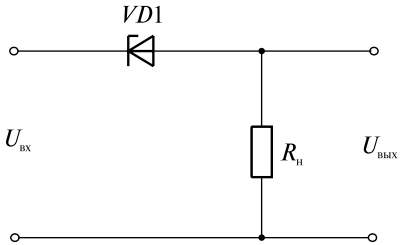


Рис. 1.8. Последовательный ограничитель на стабилитроне

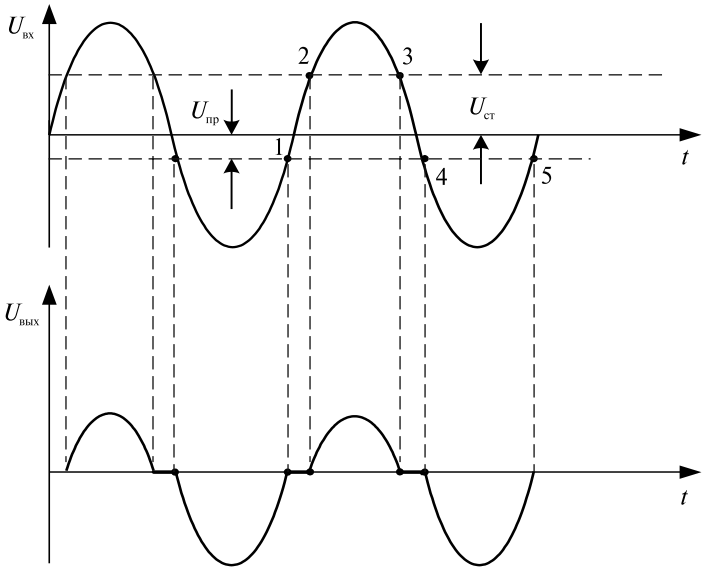


Рис. 1.9. Временная диаграмма работы ограничителя, изображенного на рис. 1.8

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 на отдельном графике диаграмму изменения выходного напряжения, совместив ее по времени с диаграммой входного напряжения.

***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 1

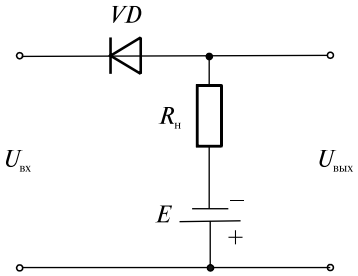


Схема 2

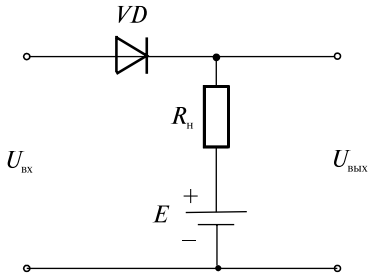


Схема 3

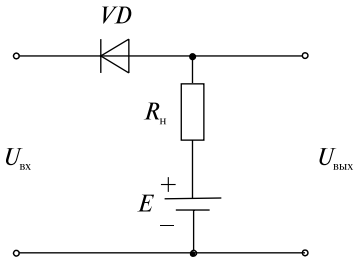


Схема 4

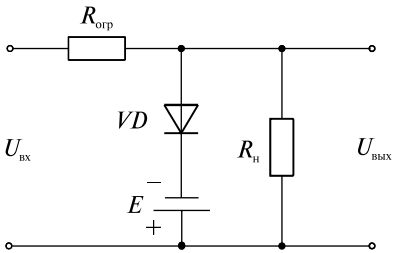


Схема 5

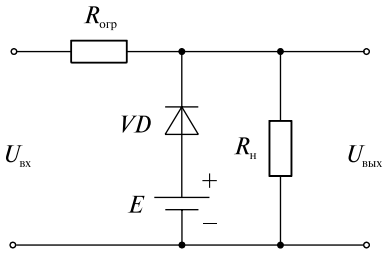


Схема 6

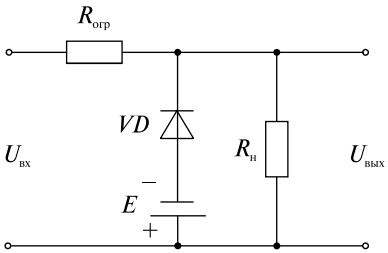


Схема 7

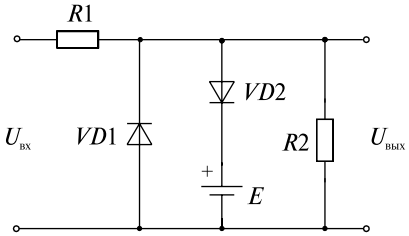
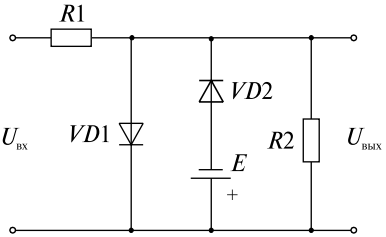


Схема 8



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

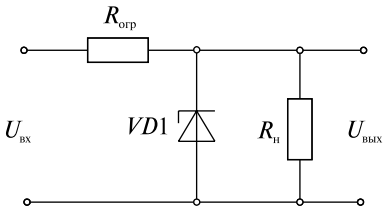


Схема 10

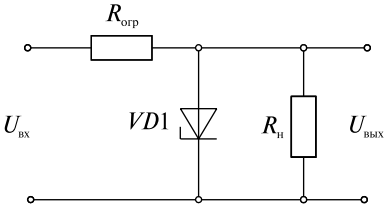


Схема 11

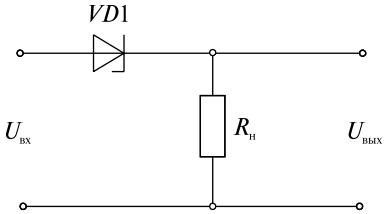
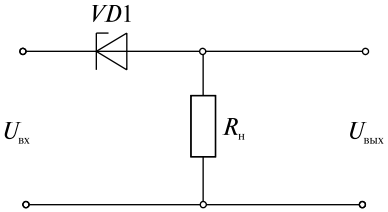


Схема 12



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:

$R_к$ – коллекторная нагрузка,

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

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

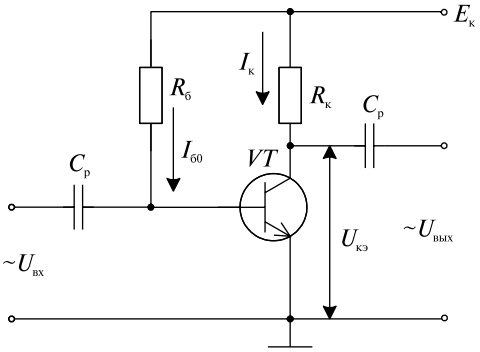


Рис. 2.1. Схема простейшего усилителя на биполярном транзисторе

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

Для работы в режиме усиления исходное положение рабочей точки (при отсутствии входного сигнала) выбирается в середине семейства выходных характеристик 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 $U_{кэ} = E_к$. Ис-

ходный ток базы, определяющий начальное положение рабочей точки по постоянному току, если пренебречь входным сопротивлением транзистора, равен $I_{бо} = E_к/R_б$. Предполагается, что входное напряжение имеет синусоидальную форму $U_{вх} = U_{вх.m}\sin\omega t$. 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.

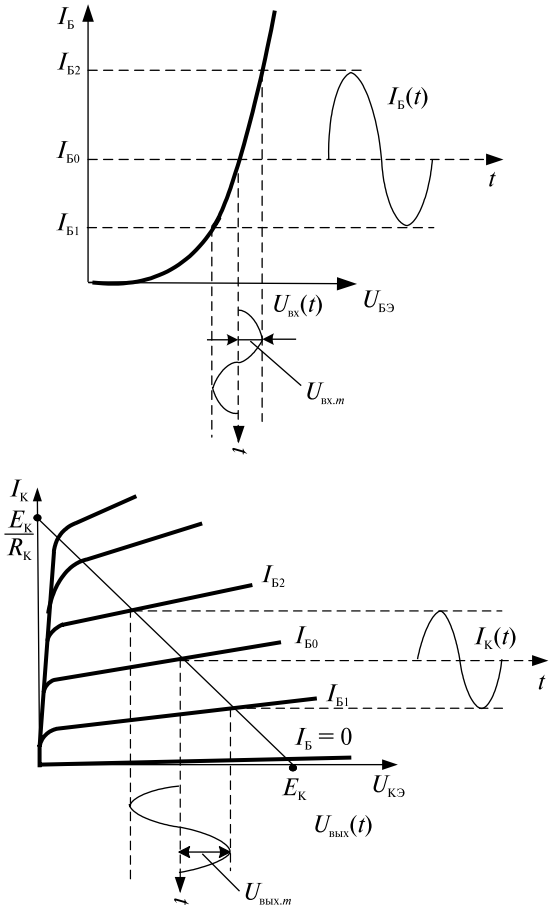


Рис. 2.2. Графический анализ работы усилителя

Отчет по самостоятельной работе должен содержать:

– входные и выходные характеристики транзистора,

– нагрузочную прямую на семействе выходных характеристик,

– 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. В случае необходимости следует построить промежуточные выходные характеристики с учетом полученных в результате расчетов значений токов базы.

Задание 2.2.1

1. Заданы параметры $E_к$, $R_к$, $R_б$, $U_{вх.m}$. 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 $I_{бо}$ 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 $U_{вых.m}$ и коэффициент усиления $K_U = U_{вых.m}/U_{вх.m}$.

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	1К 20ТБ	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_к$, В	16	12	10	15	15	25	30	16	12	10
$R_к$, кОм	0,5	0,4	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
$R_б$, кОм	80	72	33	150	50	62	75	40	60	100
$U_{вх.m}$, 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
$E_к$, В	15	20	10	35	50	30	40	8	20	12
$R_к$, кОм	0,3	0,8	0,2	1	2	0,75	1	0,2	0,33	0,25
$R_б$, кОм	50	100	50	50	125	120	100	32	50	30
$U_{вх.m}$, 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: $E_к$, $R_б$, $U_{вх.m}$, K_U. Найти величину $R_к$, 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 $I_{бо}$ и нанести соответствующую точку на входную характеристику;

в) построить график изменения входного напряжения $U_{вх}(t)$ и определить пределы изменения тока базы $I_{б1}$ и $I_{б2}$;

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

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

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
$E_к$, В	16	12	10	15	15	15	25	15	18	10
$R_б$, кОм	85	60	100	60	75	100	200	50	100	200
$U_{вх.т}$, В	0,03	0,05	0,03	0,02	0,05	0,02	0,03	0,1	0,05	0,02
$К_u$	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
$E_к$, В	15	20	10	45	40	30	50	8	20	20
$R_б$, кОм	50	80	100	64	100	150	125	40	40	50
$U_{вх.т}$, В	0,05	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,02	0,05	0,05
$К_u$	30	40	10	15	30	50	60	25	20	50

Задание 2.2.3

Заданы параметры: $E_к$, $R_к$, $U_{вх.т}$. Найти величину $R_б$, при которой усилитель будет работать в линейном режиме без существенных искажений синусоидальной формы сигналов, обеспечив работу транзистора в активной области и 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*:**

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

б) построить нагрузочную прямую;

в) определить по выходным характеристикам транзистора максимальное значение тока базы $I_{б.m}$, 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) с учетом заданного значения амплитуды входного напряжения определить по входной характеристике величину напряжения $U_{вх2}$, соответствующее амплитуде отрицательной полуволны входного напряжения, и минимальное значение тока базы $I_{б.min}$. 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**									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Тип транзистора	КТ312А	КТ312Б	КТ312В	П307	П307А	П307Б	П308	КТ201А	КТ361В	КТ312А
$E_к$, В	15	20	10	45	50	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
$U_{вх.m}$, В	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0.15	0.12	0.07	0.1	0.08
Исходные данные	**Варианты**									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Тип транзистора	КТ201А	КТ201Б	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_к$, В	16	12	10	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
$U_{вх.m}$, 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 $U_{вх.m.max}$, при которой транзистор будет работать в активном режиме, 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 $I_{б0}$ и нанести исходное положение рабочей точки на нагрузочной прямой и на входной характеристике;

г) определить по выходным характеристикам, при каком токе базы транзистор войдет в режим насыщения;

д) полагая, что входное напряжение имеет синусоидальную форму, найти по входной характеристике предельно-возможную амплитуду входного напряжения $U_{вх.m.max}$, при которой транзистор будет работать на границе активного режима работы, не заходя в режим насыщения или отсечки;

е) построить кривые изменения входных и выходных токов и напряжений при найденном значении $U_{вх.m.max}$ и определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{вых.m}/U_{вх.m}$.

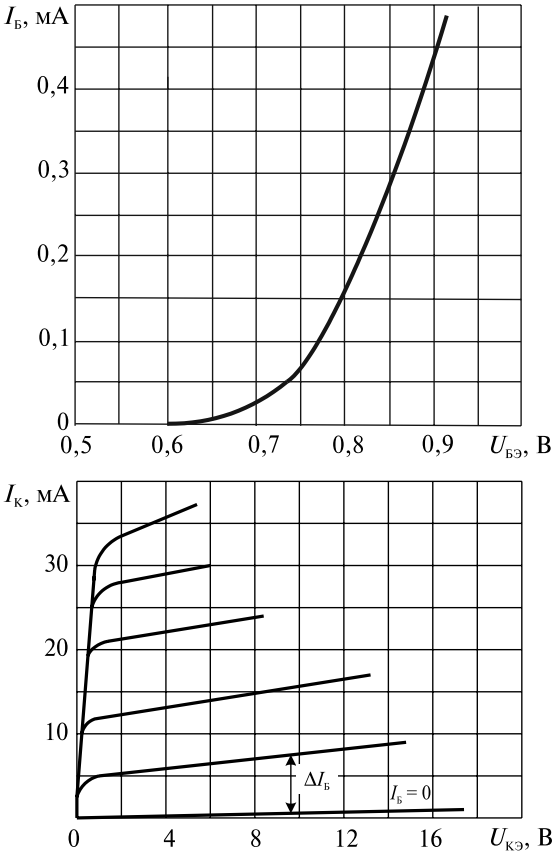
При решении задачи по этому варианту допускается появление нелинейных искажений формы выходного напряжения за счет работы на нижнем нелинейном участке входной характеристики.

Исходные данные для задания 2.4 приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

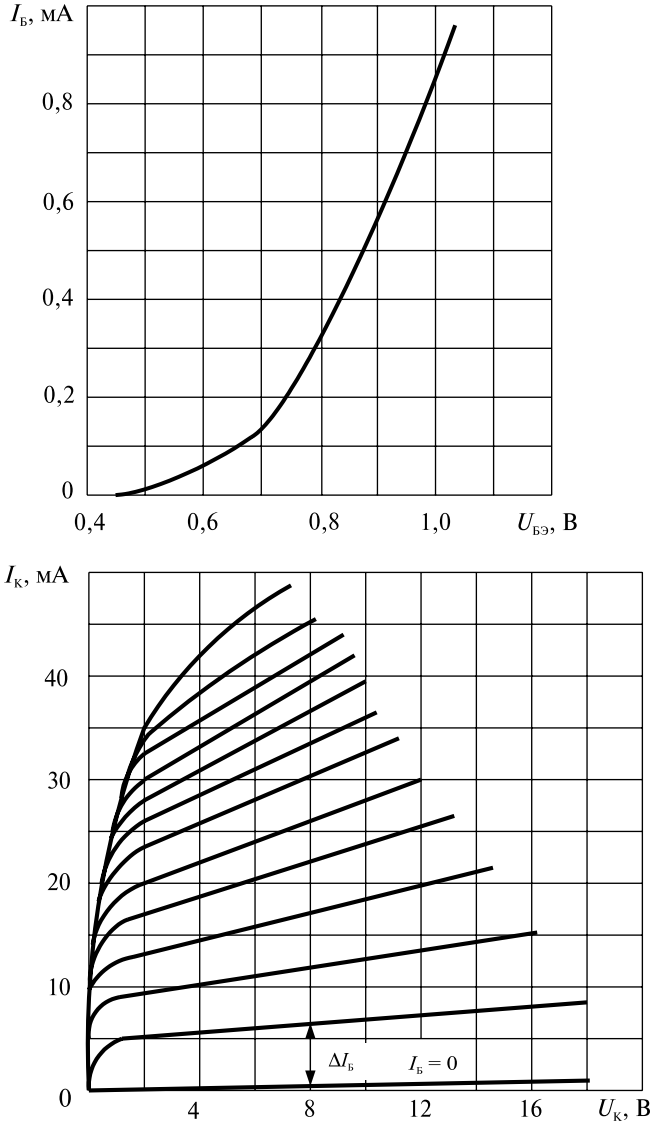
Исходные данные	**Варианты**									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Тип транзистора	КТ201А	КТ201Б	КТ201В	КТ201Г	КТ201Д	КТ361В	КТ361В	КТ349А	КТ349Б	КТ349В
$E_к$, В	6	12	10	15	16	10	15	15	18	10
$R_к$, кОм	1	0.5	0.4	1	0.8	0.5	1	0,5	0,6	0,4
$R_б$, кОм	80	60	40	150	160	40	62	50	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
$E_к$, В	15	20	10	40	50	30	50	16	20	20
$R_к$, кОм	0,5	0,5	0,25	2	1,2	1	2	1	0,4	0,8
$R_б$, кОм	50	40	50	57	125	100	100	80	40	50



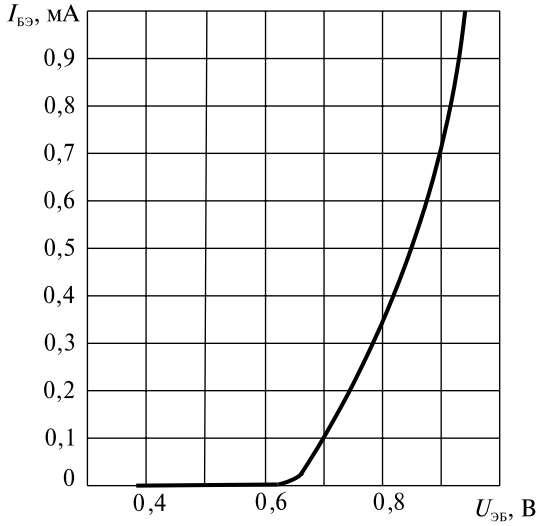
КТ201А, КТ201Б, КТ201В, КТ201Д – $\Delta I_Б$ = 0,1 мА
КТ201Г – $\Delta I_Б$ = 0,05 мА

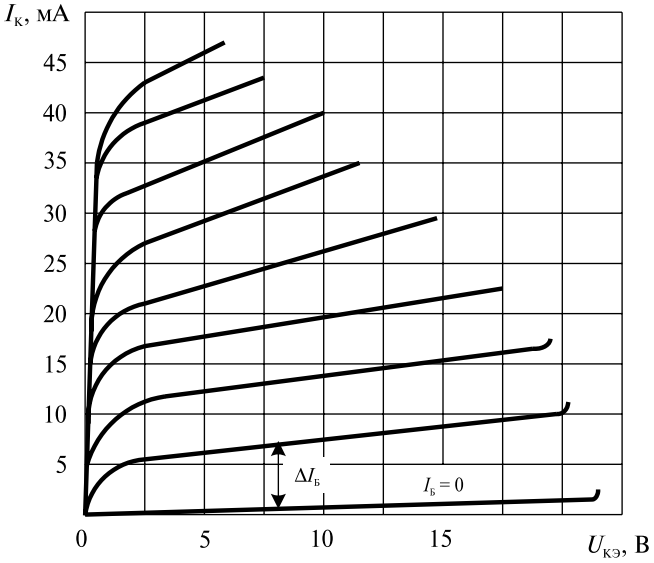
Рис. 2.3. Характеристики кремниевого *n-p-n* -транзистора КТ201



КТ349А – $\Delta I_Б$ = 0,1 мА, КТ349Б – $\Delta I_Б$ = 0,05 мА,
КТ349В – $\Delta I_Б$ = 0,02 мА

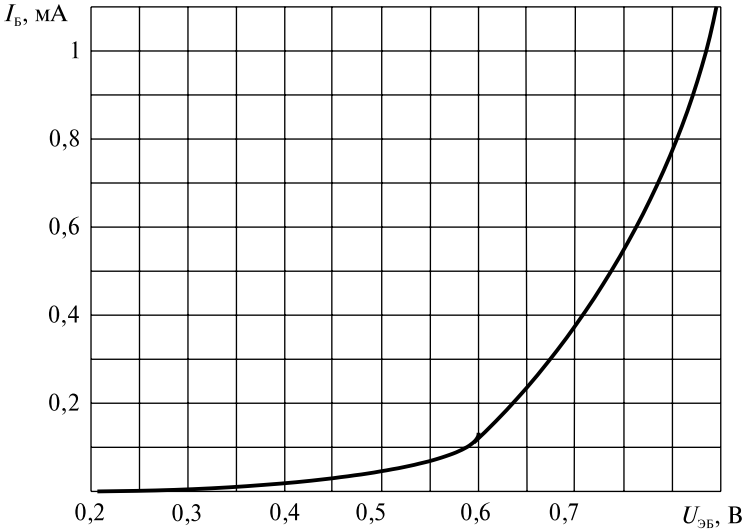
Рис. 2.4. Характеристики кремниевого *n-p-n*-транзистора КТ349

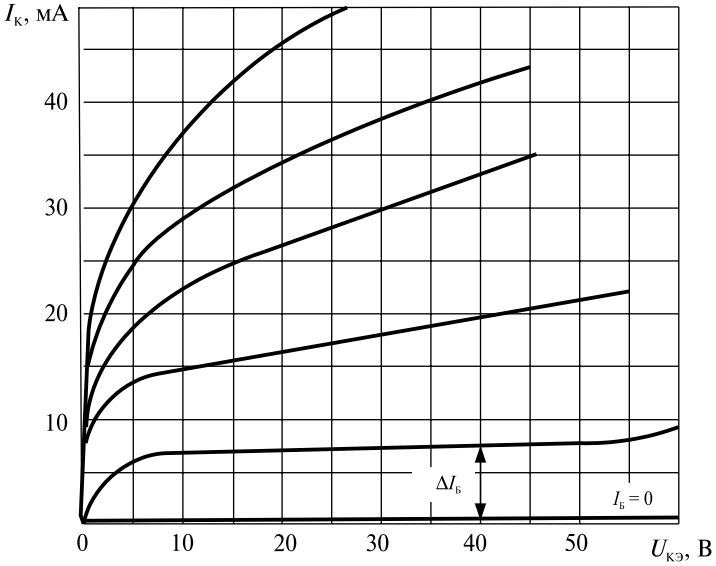




КТ312А, КТ312Б – $\Delta I_Б$ = 0,1 мА, КТ312В – $\Delta I_Б$ = 0,05 мА

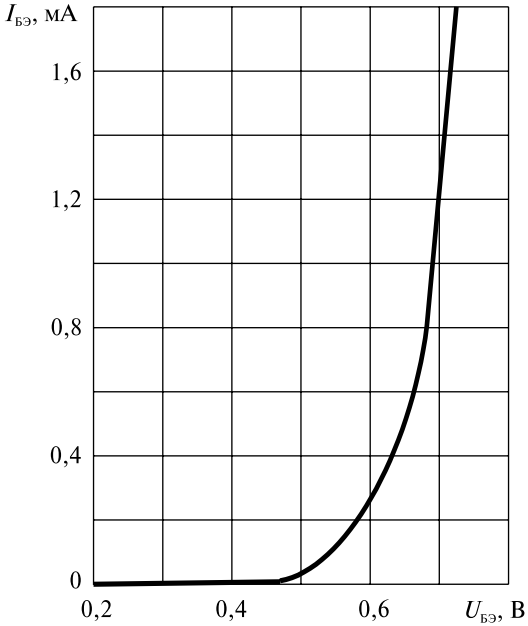
Рис. 2.5. Характеристики кремниевого *n-p-n* -транзистора КТ312

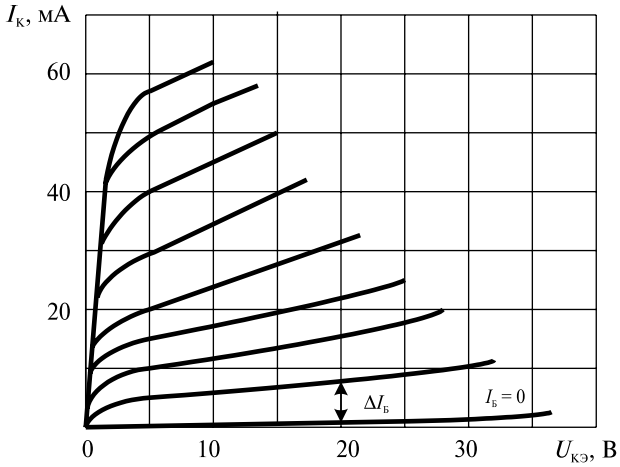




П307, П307Г, П309 – $\Delta I_Б$ = 350 мкА,
П307А, П308 – $\Delta I_Б$ = 200 мкА, П307Б, П307В – $\Delta I_Б$ = 100 мкА

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





КТ361А, КТ361В, КТ361Д – $\Delta I_Б$ = 0,1 мА,
КТ361Б, КТ361Г, КТ361Е – $\Delta I_Б$ = 0,05 мА

Рис. 2.7. Характеристики кремниевого *p-n-p* -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 ее работы. Тринистор в этой схеме выполняет роль ключа.

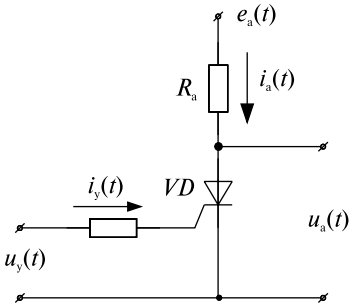


Рис. 3. 1. Схема коммутации с использованием тринистора

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

Если ЭДС анодного питания $e_а$ 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 $e_а$ пересечет точку, соответствующую напряжению включения при данном токе управления (например, на рис. 3.2 при $I_у = I_{у1}$ точку 1).

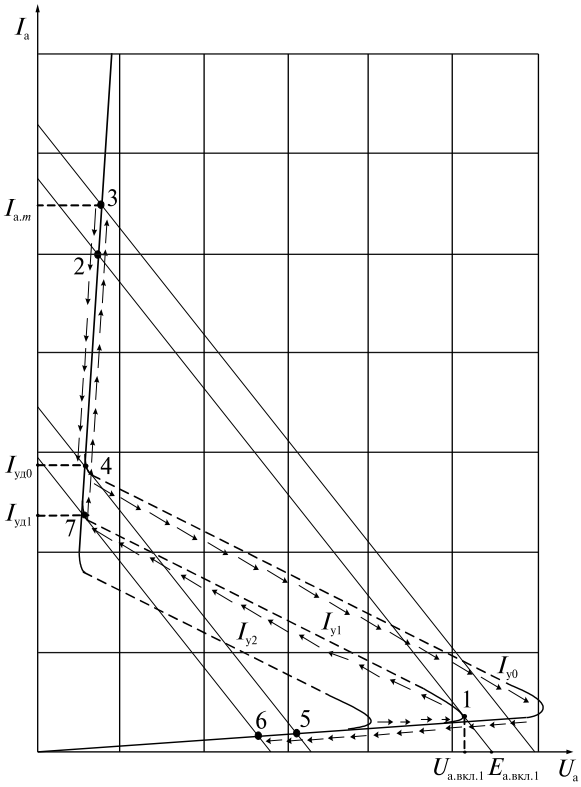


Рис. 3.2. Вольт-амперные характеристики тринистора с нагрузочными прямыми

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 $e_а$ выключение тринистора произойдет в момент времени, когда анодный ток упадет до величины тока удержания с учетом величины тока управления. Например, при $I_у = 0$ 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 $e_а$ будет перемещаться влево по нижнему участку ВАХ (например, до точки 6).

Путем анализа работы схемы можно получить графики изменения анодного тока и анодного напряжения. Пусть, например, $e_а$ из-

меняется по синусоидальному закону $E_{а.m}\sin\omega t$, и поданы импульсы тока управления с амплитудой $I_{у1}$ (рис. 3.3). Тогда графики изменения $i_а(t)$, $u_а(t)$, построенные в соответствии с видом ВАХ (рис. 3.2) будут выглядеть так, как показано на графиках (рис. 3.3).

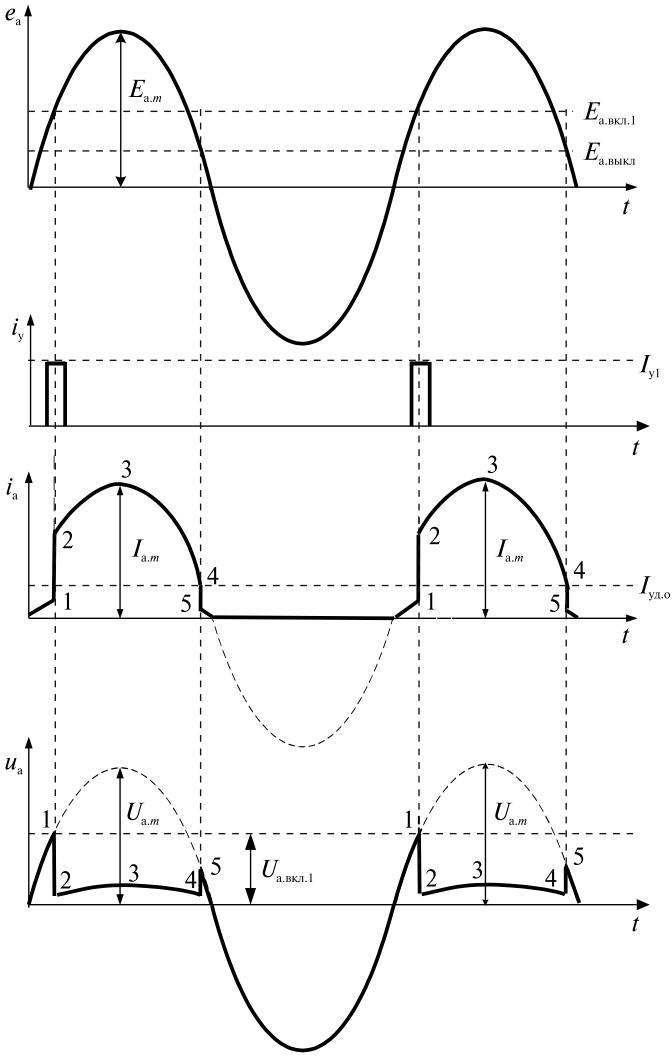


Рис. 3.3. Диаграмма работы схемы коммутации на тринисторе

Во включенном состоянии тринистора анодное напряжение и анодный ток определяется положением рабочей точки на верхней части ВАХ. При выключенном состоянии тринистора 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

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. При решении задачи следует принять, что анодная ЭДС изменяется по синусоидальному закону.

***Этапы решения*:**

а) изобразить вольтамперные характеристики заданного типа тиристора;

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

в) на ВАХ тиристора построить нагрузочную прямую в соответствии с выражением $U_{а.m} = E_{а.m} - I_{а.m}R_а$;

г) перемещая нагрузочную прямую вправо из нуля, определить момент включения тиристора и соответствующую ему величину $E_{а.вкл.1}$. Перемещая далее нагрузочную прямую до положения, соответствующего амплитуде анодной ЭДС, определить амплитуду анодного тока и анодного напряжения и отобразить это на временных диаграммах;

д) определить момент выключения тиристора, перемещая нагрузочную прямую влево (соответственно уменьшению анодной ЭДС);

е) построить графики изменения анодного тока $i_а(t)$ и анодного напряжения $u_а(t)$.

Диаграмма изменения анодной ЭДС и варианты диаграмм изменения тока управления показаны на рис. 3.4 и 3.5 *а*, *б*.

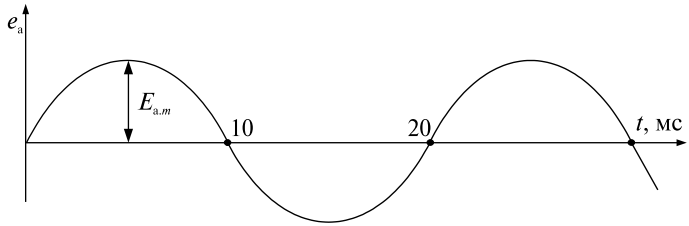


Рис. 3.4. Синусоидальная форма изменения анодной ЭДС

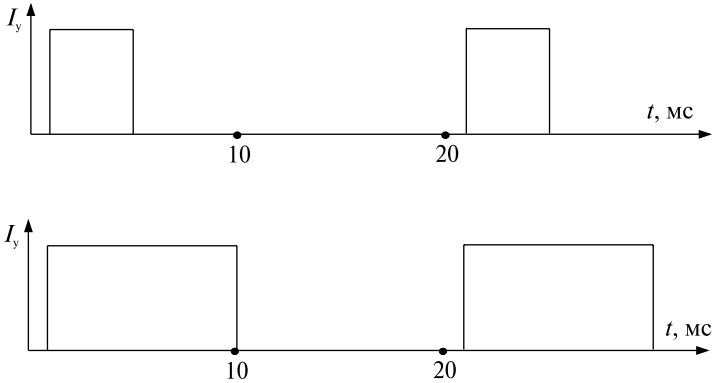


Рис. 3.5. Диаграммы изменения токов управления

Варианты заданий приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Вариант	**Тип тиристора**	**Сопротивление в анодной цепи $R_а$, Ом**	**Амплитуда анодной ЭДС, $E_{а.m}$, В**	**Форма тока в цепи управления, (№ рисунка)**	**Амплитуда тока в цепи управления, $I_у$, мА**
1	2У104А	150	16	3.5-а	10
2	2У104А	200	16	3.5-б	18
3	2У104А	150	12	3.5-а	18
4	2У104А	200	12	3.5-б	25
5	2У104А	150	16	3.5-а	25
6	2У104А	200	12	3.5-б	18

Окончание табл. 3.1

Вариант	Тип тиристора	Сопротивление в анодной цепи $R_а$, Ом	Амплитуда анодной ЭДС, $E_{а.т}$, В	Форма тока в цепи управления, (№ рисунка)	Амплитуда тока в цепи управления, $I_у$, мА
7	2У104А	200	16	3.5-а	10
8	КУ102А	600	50	3.5-б	10
9	КУ102А	800	30	3.5-а	15
10	КУ102А	800	50	3.5-б	20
11	КУ102А	600	30	3.5-а	20
12	КУ102А	600	50	3.5-б	15
13	КУ102А	800	30	3.5-а	20
14	КУ102А	600	50	3.5-б	10
15	КУ202В	8	60	3.5-а	50
16	КУ202В	12	40	3.5-б	150
17	КУ202В	8	40	3.5-а	100
18	КУ202В	12	60	3.5-б	100
19	2У104Б	300	30	3.5-а	10
20	2У104Б	500	20	3.5-б	18
21	2У104Б	300	30	3.5-а	25
22	2У104Б	300	25	3.5-б	25
23	2У104Б	500	30	3.5-а	18
24	2У104Б	300	35	3.5-б	25
25	2У104А	200	12	3.5-а	10
26	2У104А	250	16	3.5-б	18
27	2У104А	200	12	3.5-а	25
28	КУ202В	10	60	3.5-б	100
29	КУ202В	12	50	3.5-а	150
30	2У104А	150	16	3.5-б	18

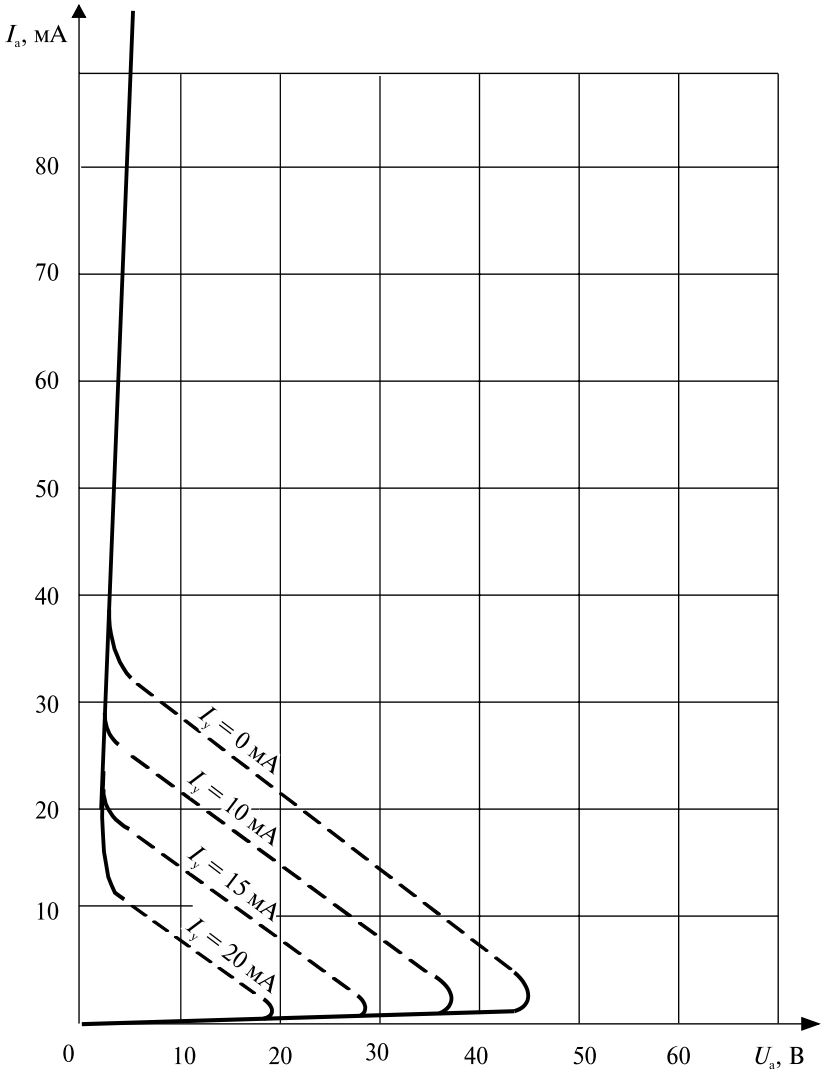


Рис. 3.6. Вольт-амперные характеристики тиристора КУ102А

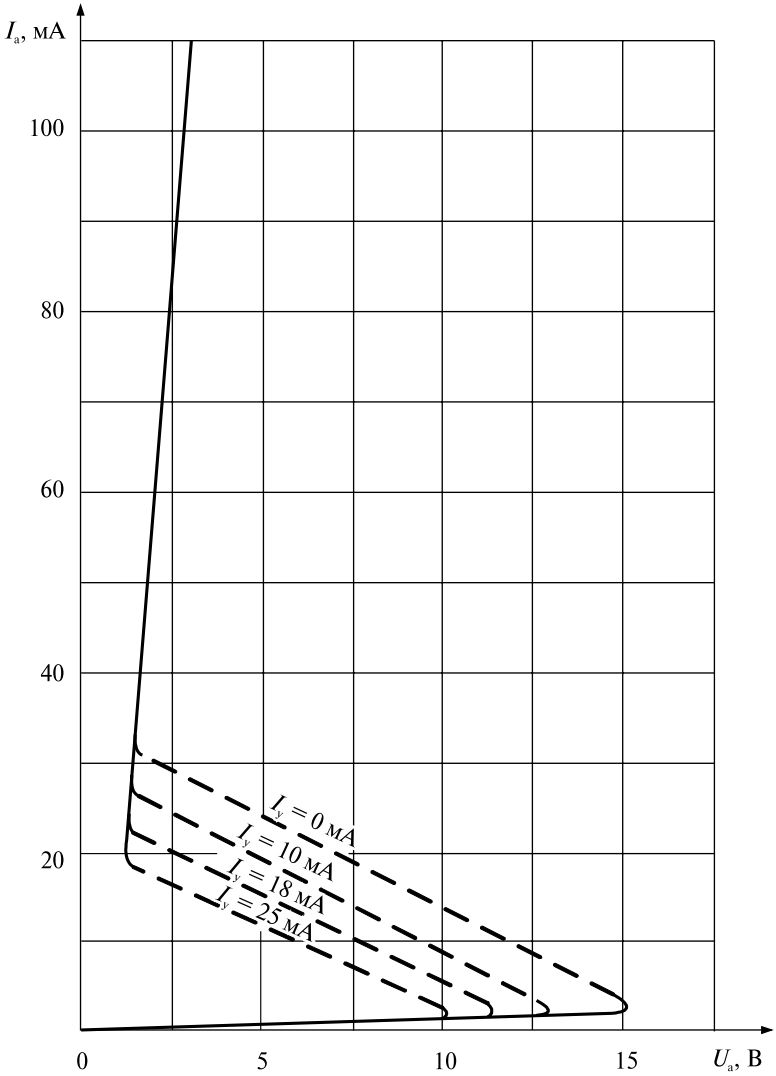


Рис. 3.7. Вольт-амперные характеристики тиристора 2У104А

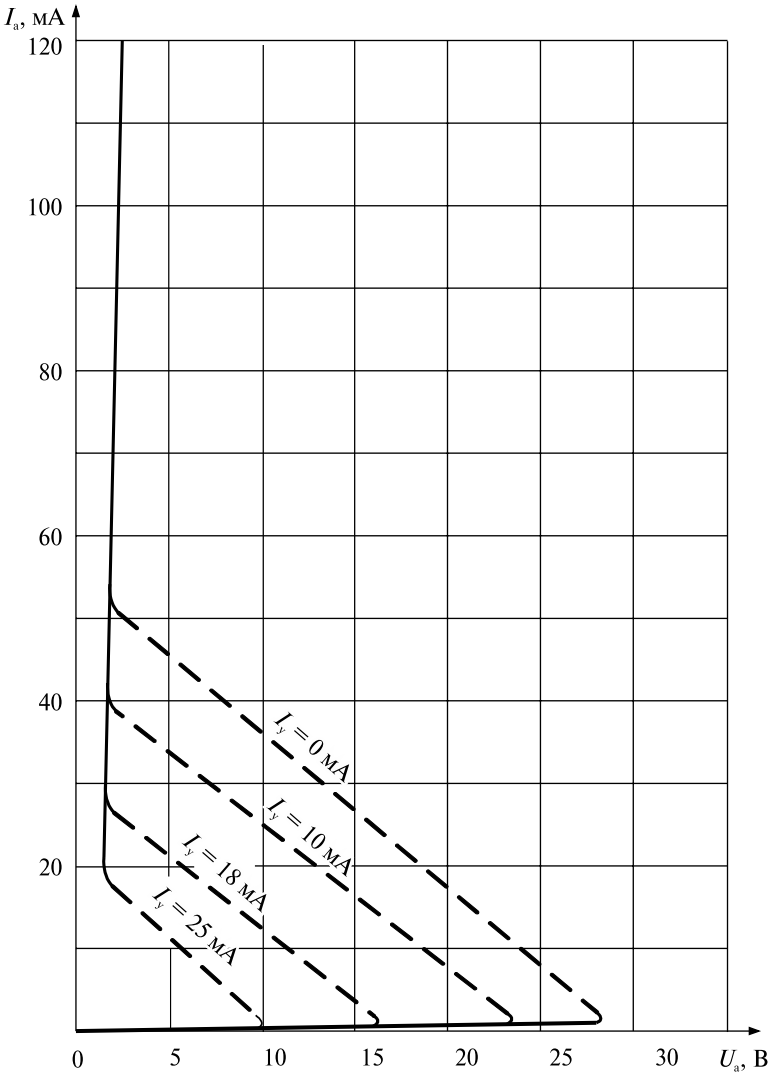


Рис. 3.8. Вольт-амперные характеристики тиристора 2У104Б

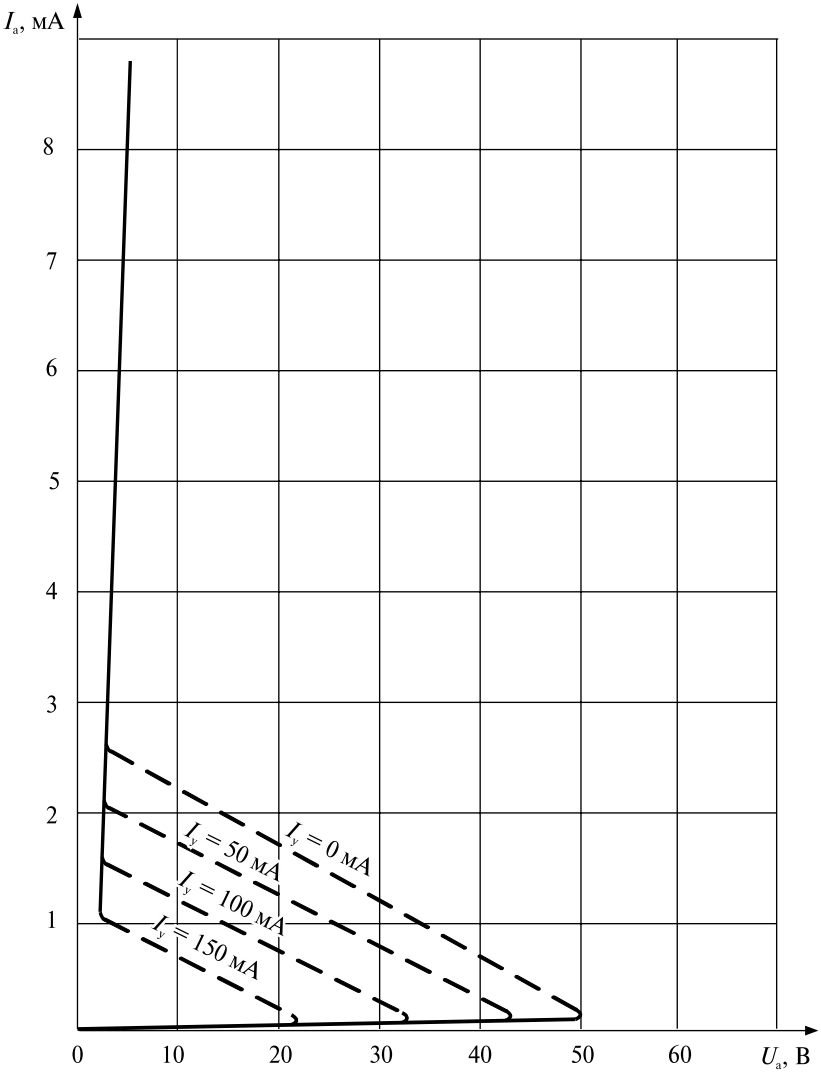


Рис. 3.9. Вольт-амперные характеристики тиристора КУ202В

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.

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

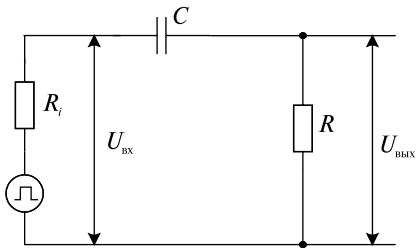


Рис. 4.1. Дифференцирующая *RC*-цепь

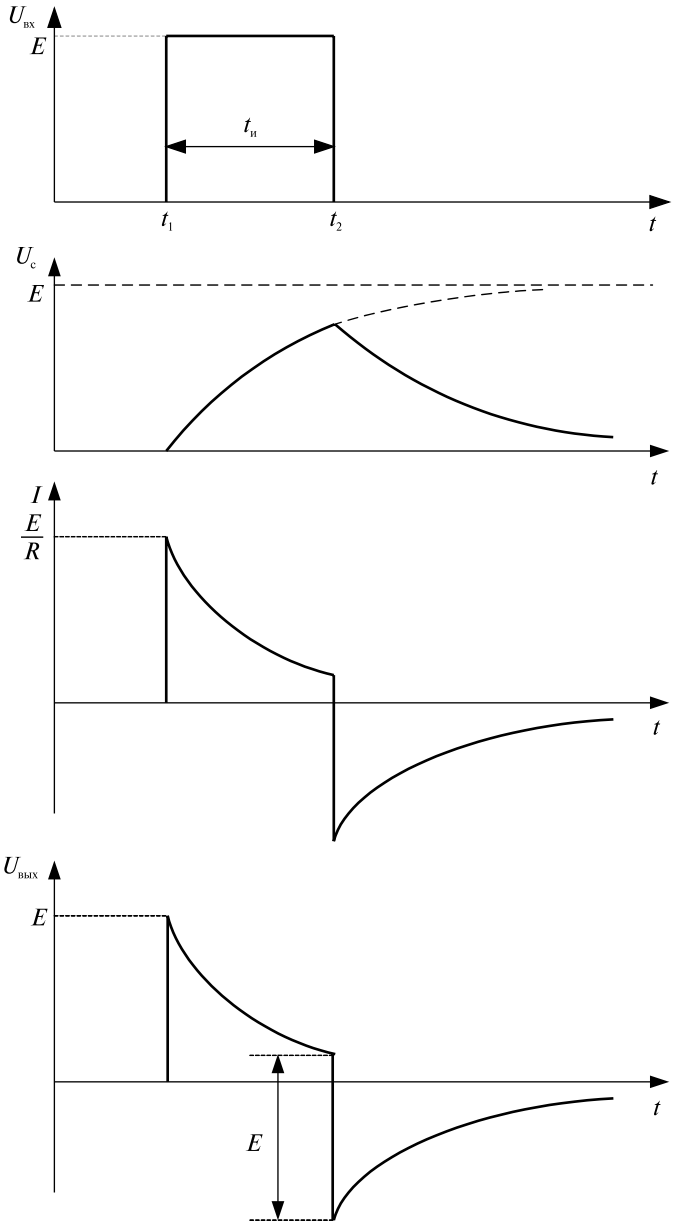


Рис. 4.2. Временные диаграммы сигналов в дифференцирующей цепи

упрощения анализа полагаем, что внутреннее сопротивление R_i генератора входных прямоугольных импульсов равно нулю.

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:

$$U_c = 0,\ I_c = 0,\ U_{вых} = 0.$$

По второму закону Кирхгофа $U_{вх} = U_c + U_{вых}$.

В момент $t = t_1 = 0$ на вход цепи скачком подается напряжение $U_{вх} = E$. 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 $I_c = I_{c.\max} = \dfrac{E}{R}$.

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

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

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 $U_{вых}(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$.

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:

$$U_{вх} = U_c + U_{вых}.$$

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

$$U_{вых}(t_2) = Ee^{-\frac{t_2}{\tau}}.$$

В момент t_2 напряжение на входе скачком уменьшается до нуля. Конденсатор C начинает разряжаться через резистор R и нулевое внутреннее сопротивление источника входного сигнала, выходное напряжение меняет знак и его величина убывает по экспоненте, стремясь к нулю

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

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 длительностью входного импульса $t_и$ показано на рис. 4.3

При выполнении соотношения $RC \ll t_и$ (рис. 4.3, *а*) 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.

Временные диаграммы выходного сигнала при выполнении соотношения $RC < t_и$ показаны на рис. 4.3, *б*. 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, *в* и 4.3, *г* 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 ΔU, что не всегда допустимо, Если же $RC \gg t_и$, как показано на рис. 4.3, *д*, то входной импульс передается на выход на выход почти без искажения, форма выходного импульса при этом близка к прямоугольной. Очевидно, чем больше постоянная времени, тем меньше искажение формы выходного импульса.

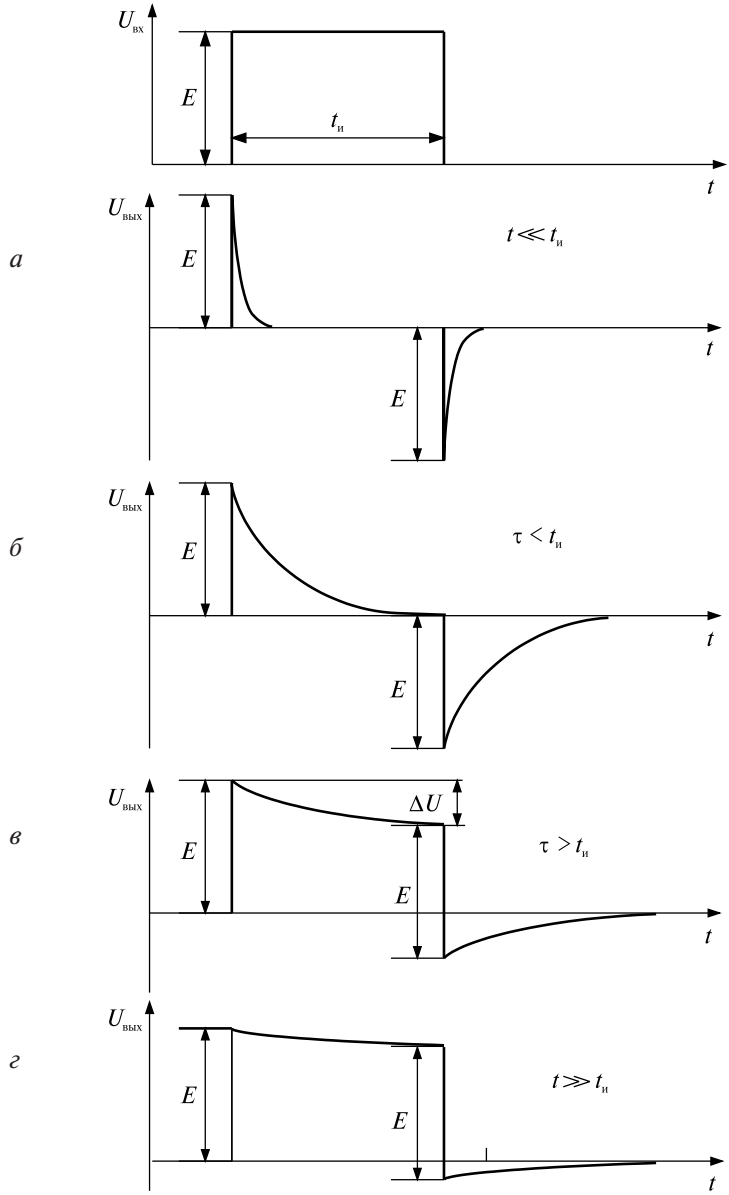


Рис. 4.3. Временные диаграммы сигналов в дифференцирующей цепи при различных соотношениях длительности импульса и постоянной времени

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.

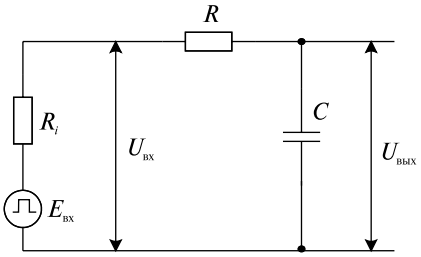


Рис. 4.4. Схема интегрирующей цепи

В момент $t_1 = 0$ 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 $U_{с.m}$, начинает разряжаться по экспоненциальному закону $U_с(t) = U_{с.m}^{\frac{t}{RC}}$.

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

Временные диаграммы, показанные на рис. 4.5, соответствуют случаю, когда постоянная времени цепи сравнима с длительностью входного импульса. Если выполняются другие соотношения между

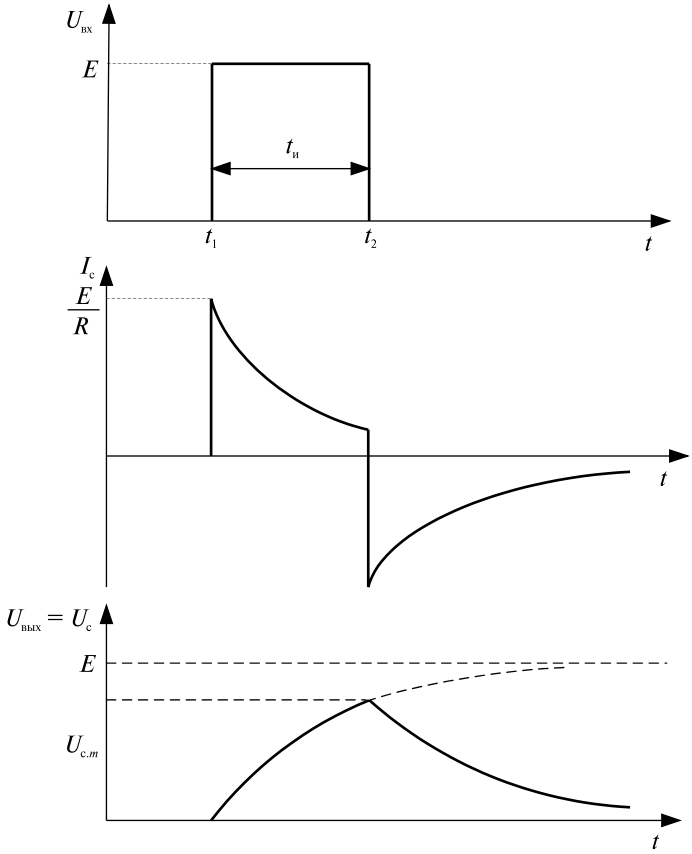


Рис. 4.5. Процессы в интегрирующей цепи

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.

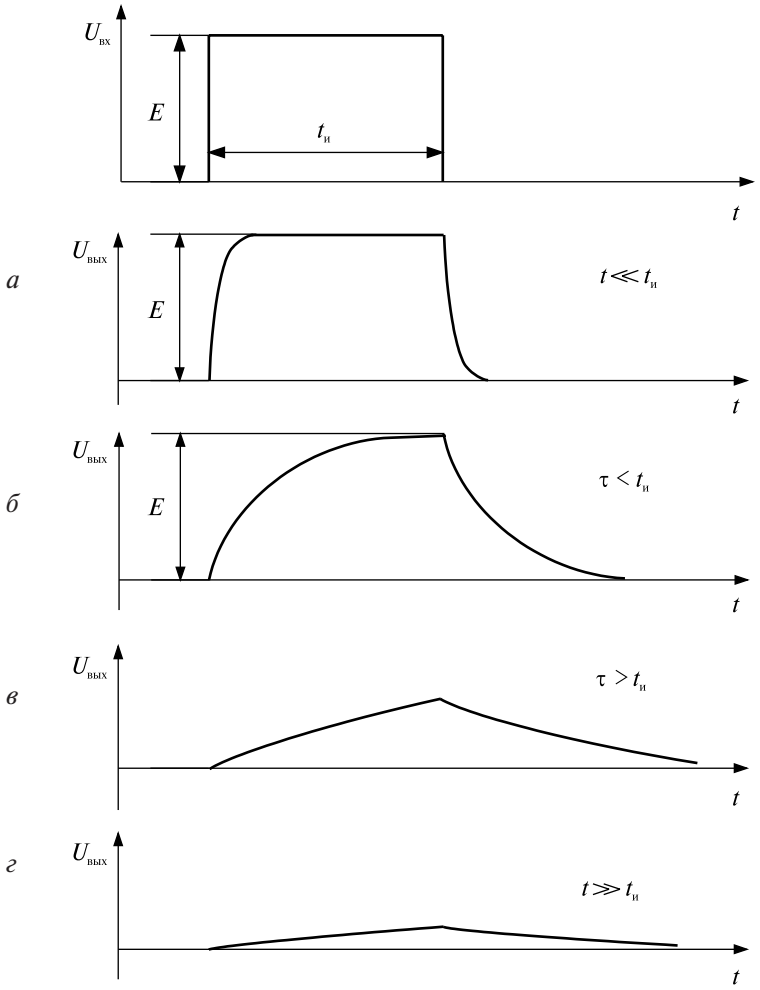


Рис. 4.6. Временные диаграммы сигналов в интегрирующей цепи при различных соотношениях длительности импульса и постоянной времени цепи

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 τ 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 закону изменение напряжения на начальном участке экспоненты.

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 интегрирующих на рис. 4.7 *а*, а для дифференцирующих цепей – на рис. 4.7 *б*.

Для построения графиков выходных напряжений при использовании этого способа учитывается характерный момент времени, соответствующий постоянной времени цепи τ. На рис. 4.7 показаны

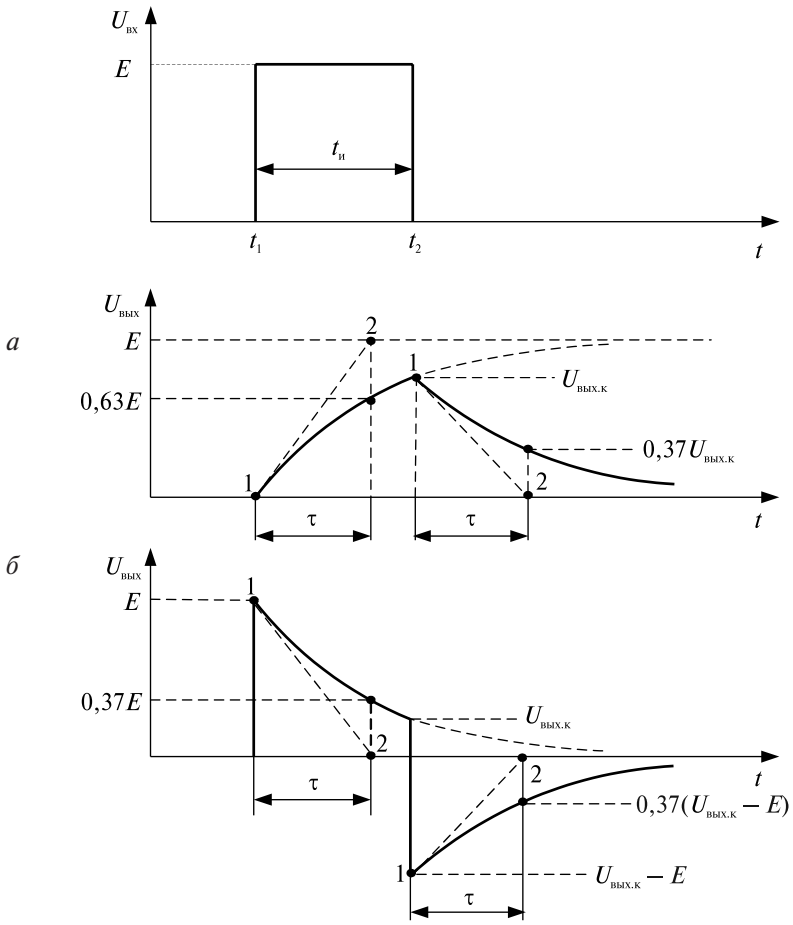


Рис. 4.7. Построение графиков выходных напряжений интегрирующих и дифференцирующих цепей упрощенным способом

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.

В случае, если постоянная времени значительно меньше, чем длительность импульсов, следует для более точного построения графика выходного напряжения сделать разрыв диаграмм и осей времени, увеличив масштаб времени на начальном и конечном участке переходного процесса. Масштаб по оси напряжения для выходного сигнала в случае необходимости следует увеличить таким образом, чтобы обеспечить наглядность построения диаграммы выходного сигнала.

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 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 соответствии с табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
R	10 кОм	30 кОм	60 кОм	120 кОм	500 кОм	5 кОм	10 кОм	200 кОм	100 кОм	50 кОм
C	100 пФ	50 пФ	200 пФ	100 пФ	10 пФ	2 нФ	10 нФ	500 пФ	500 пФ	5 нФ
$t_и$	10 мкс					50 мкс				
Вариант	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
R	20 кОм	300 кОм	100 кОм	0,5 МОм	1 МОм	20 кОм	50 кОм	100 кОм	30 кОм	0,05 МОм
C	1000 пФ	1 нФ	200 пФ	150 пФ	50 пФ	0,5 мкФ	500 нФ	2 нФ	0,01 мкФ	0,1 мкФ
$t_и$	0,2 мс					0,5 мс				

Окончание табл. 4.1

Вариант	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
R	120 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	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	1000 кОм	500 кОм	1000 кОм	300 кОм	0,5 МОм
C	1000 нФ	500 нФ	20 нФ	150 нФ	0,5 мкФ	100 нФ	5000 пФ	200 нФ	0,1 мкФ	1 мкФ
$t_и$	100 мс					1 с				

5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТРИГГЕРЫ

5.1. Краткие теоретические сведения

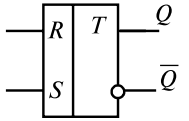
Интегральные триггеры выполнены в виде интегральных микросхем и обладают способностью запоминать поданные на их входы сигналы. Таким образом, состояние триггера, которое принято оценивать по прямому выходу, зависит не только от сигналов, имеющихся на входах в данный момент времени, но и от сигналов, поступивших в предшествующие моменты времени. В составе большинства типов триггеров содержатся схемы управления, представляющие собой комбинационные логические схемы и придающие триггеру те или иные свойства. Например, элементы управления определяют момент переключения триггера в другое состояние, осуществляют функцию запрета или разрешения переключения и др. В общем случае триггеры имеют две группы входов: информационные и управляющие. На информационные входы поступают сигналы, определяющие состояние, в которое необходимо переключить триггер, а на управляющие входы поступают сигналы, придающие триггеру те или иные дополнительные свойства. Ниже приведена информация об основных типах триггеров, логике их работы, а также об условных графических изображениях триггеров в схемах. Более подробную информацию о структуре триггеров и временных диаграммах их работы можно найти в литературе.

Асинхронный одноступенчатый RS-триггер с прямым управлением

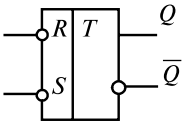
Данный тип триггера имеет только информационные входы и переключается в момент изменения сигналов на этих входах. Вход S (Set – установка) служит для установки триггера в состояние логической единицы (высокого уровня на прямом выходе Q а вход R – для установки триггера в состояние логического нуля (низкого уровня напряжения на прямом выходе).

В исходном состоянии, т. е. в режиме хранения информации, на входах S и R необходимо поддерживать низкие уровни напряжения, соответствующие логическим нулям. В режиме хранения информации триггер может находиться в любом состоянии в зависимости от

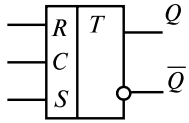
последнего поданного на один из информационных входов сигнала. Условное графическое изображение такого триггера показано на рис. 5.1, *а*.



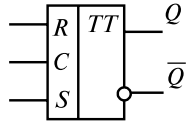
а) одноступенчатый асинхронный *RS*-триггер с прямым управлением



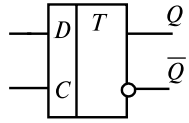
б) одноступенчатый асинхронный *RS*-триггер с инверсным управлением



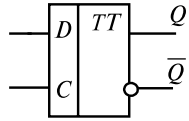
в) одноступенчатый синхронный *RS*-триггер



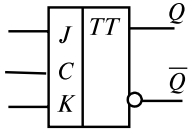
г) двухступенчатый синхронный *RS*-триггер



д) одноступенчатый синхронный *D*-триггер



е) двухступенчатый синхронный *D*-триггер



ж) двухступенчатый синхронный *JK*-триггер

Рис. 5.1. Условные графические изображения различных типов интегральных триггеров

Переключение триггера из состояния логического нуля в состояние логической единицы происходит в момент подачи напряжения с уровнем логической единицы на вход *S*. Для переключения из состояния логической единицы в состояние логического нуля необходимо подать напряжение с уровнем логической единицы на вход *R*.

Асинхронный одноступенчатый RS-триггер с инверсным управлением

Данный триггер, также как и предыдущий, имеет только информационные входы *R* и *S*. В режиме хранения информации на оба входа подаются напряжения логического нуля. Для переключения из нулевого состояния в состояние логической единицы подается напряжение логической единицы на вход *S*, а для переключения в состояние логического нуля подается напряжение логического нуля на вход *R*. Условное графическое изображение такого типа триггера показано на рис. 5.1, *б*.

Синхронный одноступенчатый RS-триггер

В триггере такого типа наряду с информационными входами *S* и *R* имеется управляющий вход *C* – вход синхронизации. Переключение триггера происходит при подаче информационного сигнала с уровнем логической единицы на один из информационных входов и сигнала синхронизации также с уровнем логической единицы на вход *C*. Триггер является одноступенчатым, поэтому переключение происходит по переднему фронту синхронизирующего импульса. Условное графическое изображение триггера показано на рис. 5.1, *в*.

Синхронный двухступенчатый RS-триггер

Триггер такого типа содержит в своем составе две триггерных ступени, поэтому переключение происходит в отличие от одноступенчатого *RS*-триггера по заднему фронту синхронизирующего импульса. Условное графическое изображение триггера показано на рис. 5.1, *г*.

Синхронный одноступенчатый D-триггер

Триггер такого типа имеет информационный вход *D* и синхронизирующий вход *C*. Переключение триггера происходит по переднему фронту синхронизирующего импульса в то состояние, которое имеет в этот момент информационный вход *D*. Условное графическое изображение триггера показано на рис. 5.1, *д*.

Синхронный двухступенчатый D-триггер

Триггер содержит две триггерных ступени, поэтому в отличие от одноступенчатого *D*-триггера он переключается по заднему фронту синхронизирующего импульса. Условное графическое изображение триггера показано на рис. 5.1, *е*.

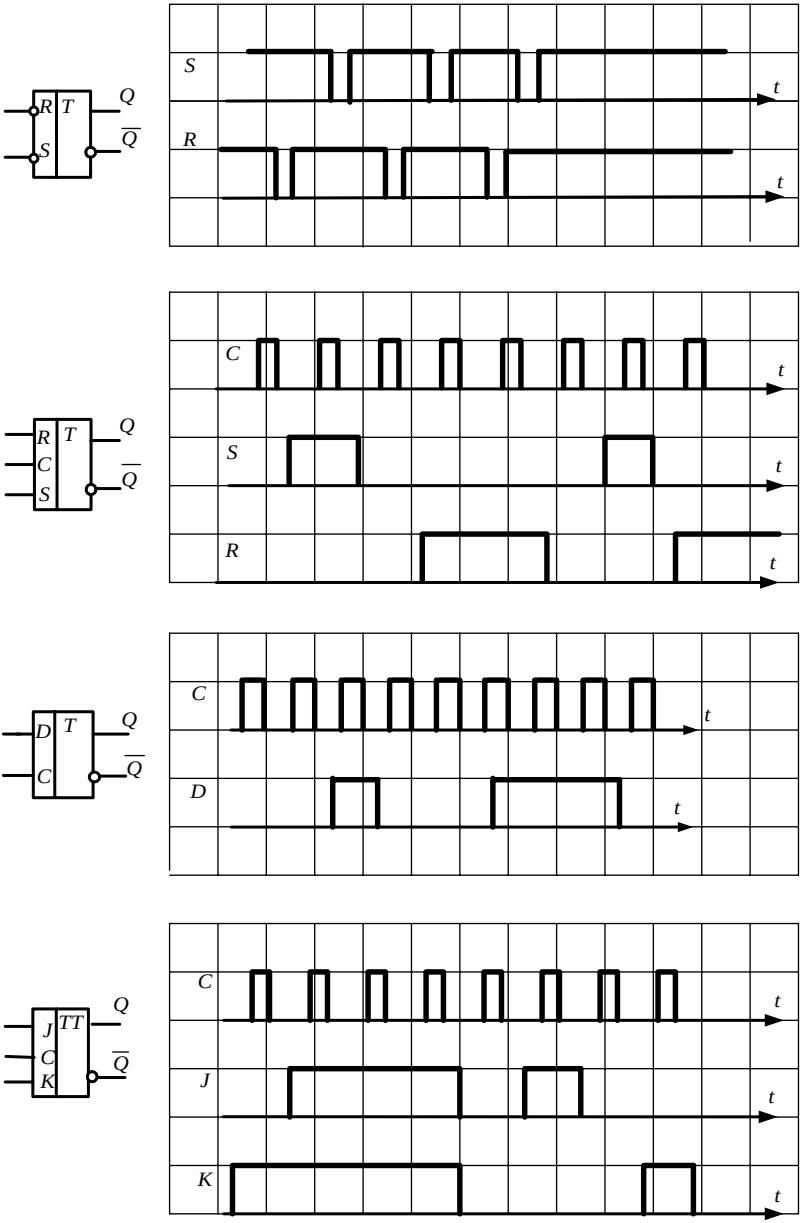
Двухступенчатый JK-триггер

Триггер такого типа может работать в двух режимах. В режиме раздельной установки переключение в состояние логической единицы или логического нуля происходит при подаче сигнала логической единицы соответственно на вход *J* или вход *K* по заднему фронту синхронизирующего импульса. В счетном режиме на оба входа *J* и *K* подаются сигналы логической единицы и триггер переключается в противоположное состояние по заднему фронту каждого импульса на входе *C*, который превращается, таким образом в информационный вход. В таком режиме триггер используется в счетчиках импульсов. Условное графическое изображение триггера показано на рис. 5.1, *ж*.

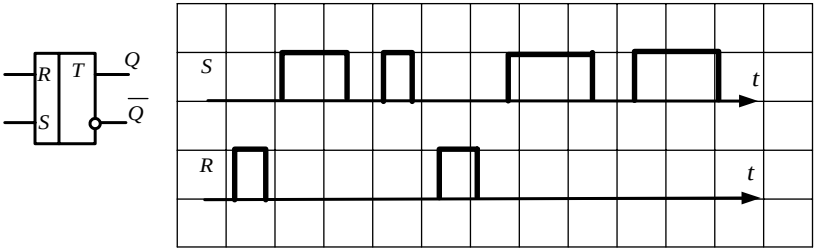
5.2. Задания для самостоятельной работы

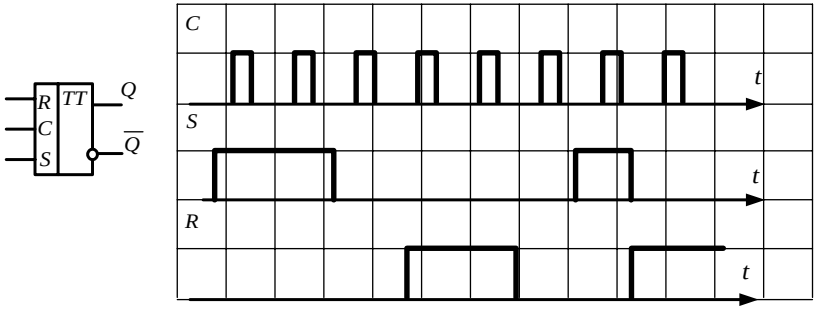
Самостоятельная работа заключается в построении временных диаграмм сигналов на прямом выходе различных типов триггеров при заданных последовательностях изменений сигналов на входах триггеров. При выполнении заданий следует привести условные графические изображения заданных типов триггеров и для каждого типа триггера изобразить в одном масштабе времени диаграммы изменения входных сигналов и выходного сигнала триггера по прямому выходу. Варианты заданий приведены ниже.

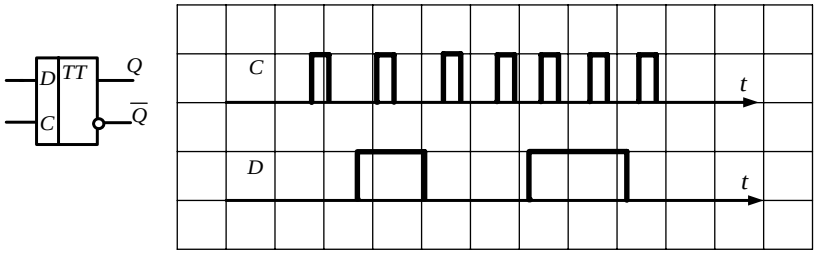
Вариант 1

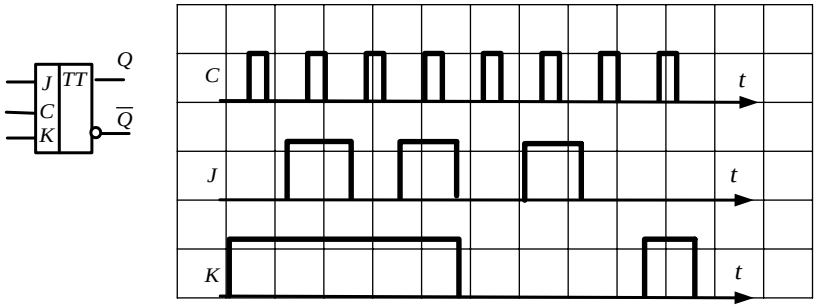


Вариант 2

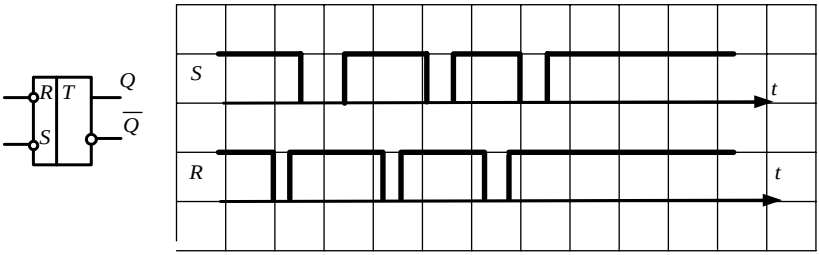

R
T
Q
S
$\overline{Q}$
S
t
R
t

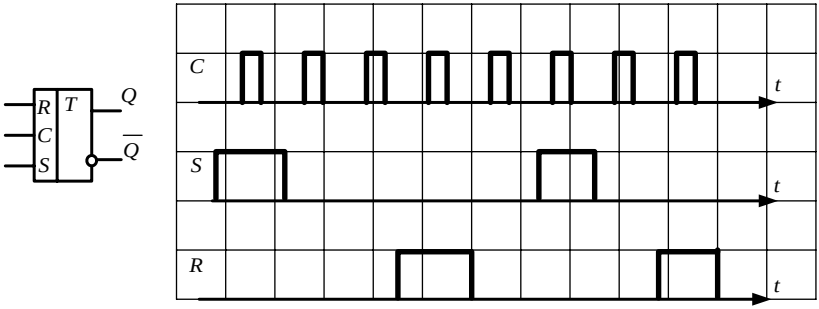

R
TT
Q
C
S
$\overline{Q}$
C
t
S
t
R
t

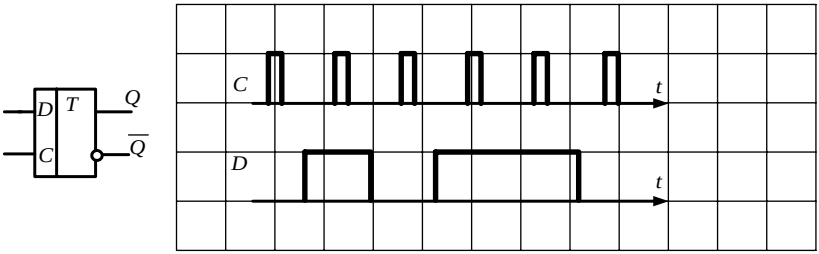

D
TT
Q
C
$\overline{Q}$
C
t
D
t

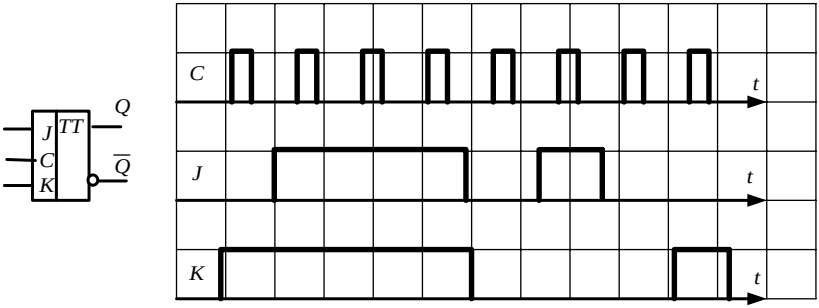

J
TT
Q
C
K
$\overline{Q}$
C
t
J
t
K
t

Вариант 3

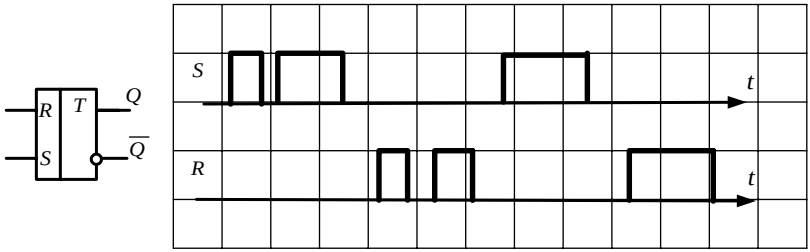


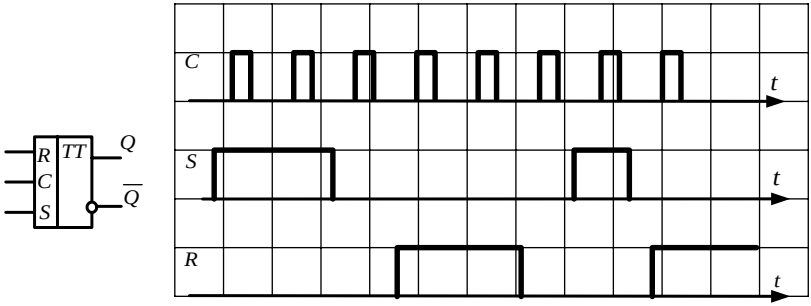


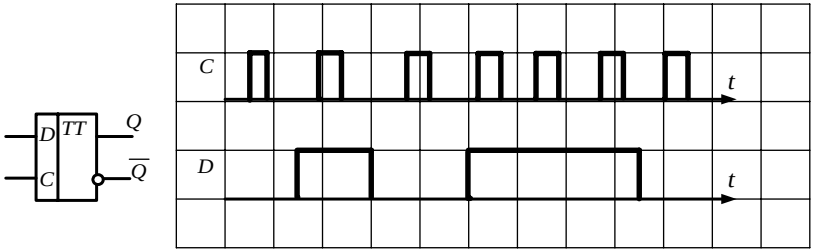


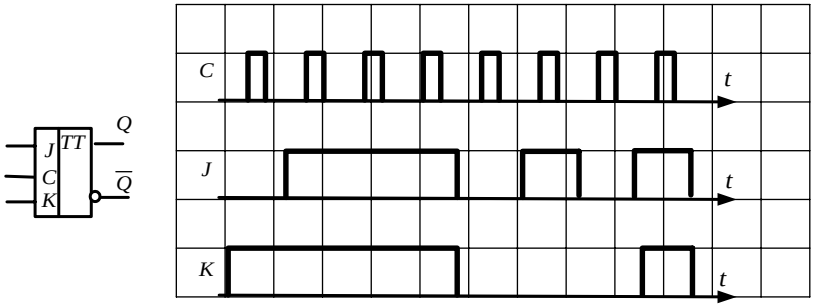


Вариант 4

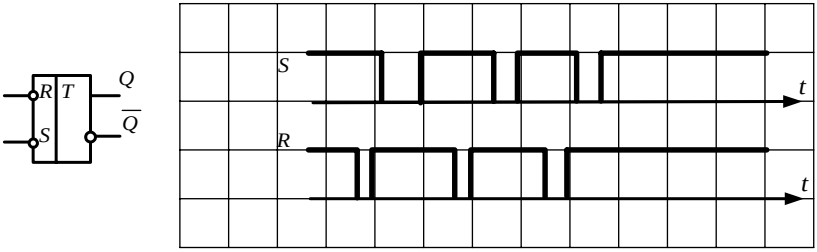

R
T
Q
S
$\overline{Q}$
S
t
R
t

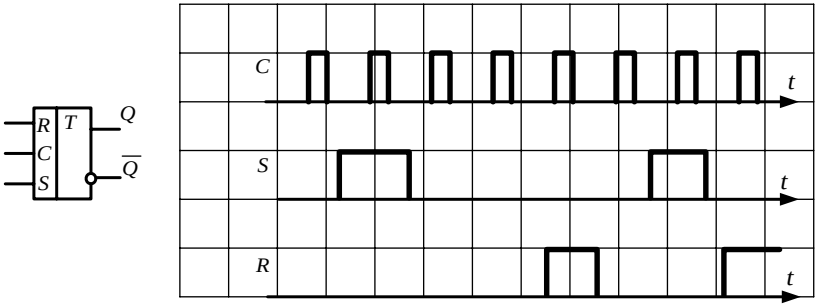

R
TT
Q
C
S
$\overline{Q}$
C
t
S
t
R
t

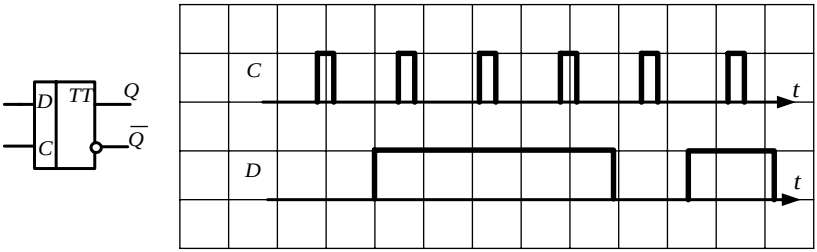

D
TT
Q
C
$\overline{Q}$
C
t
D
t

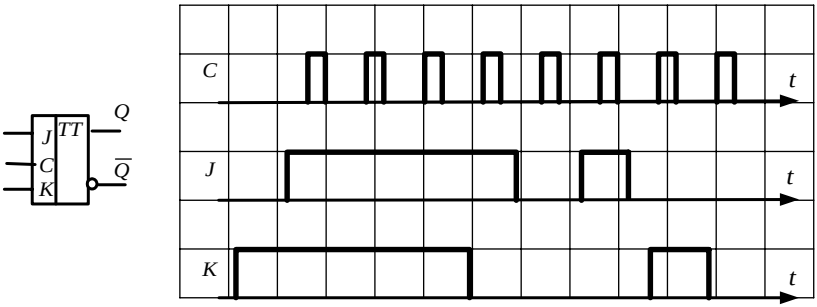

J
TT
Q
C
K
$\overline{Q}$
C
t
J
t
K
t

Вариант 5

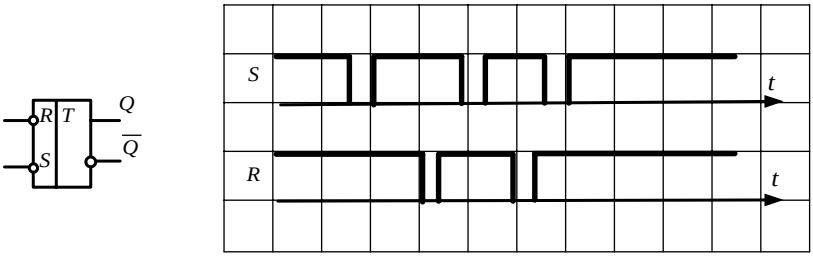


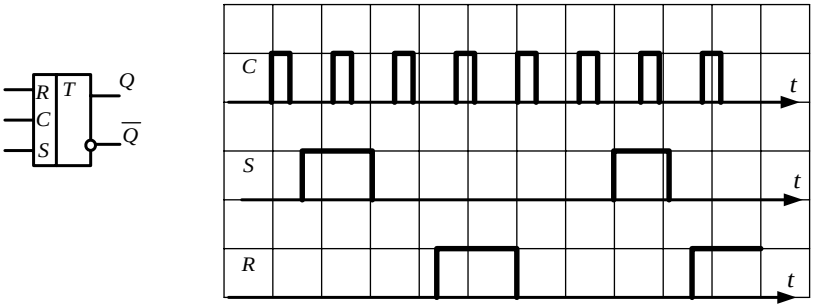


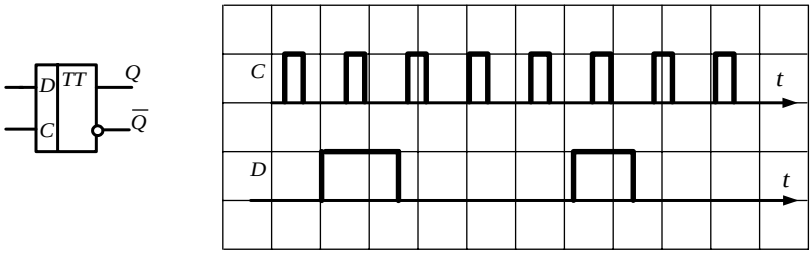


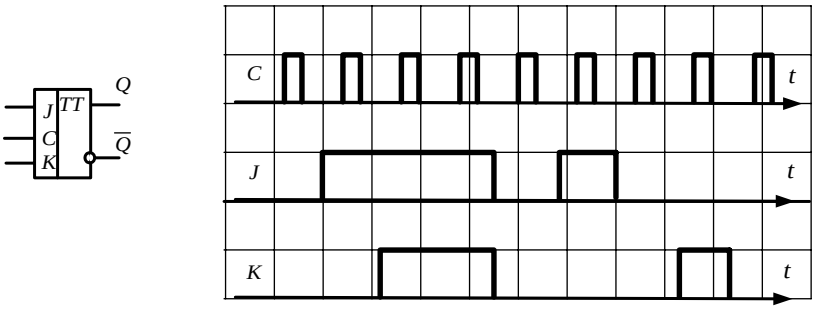


Вариант 6

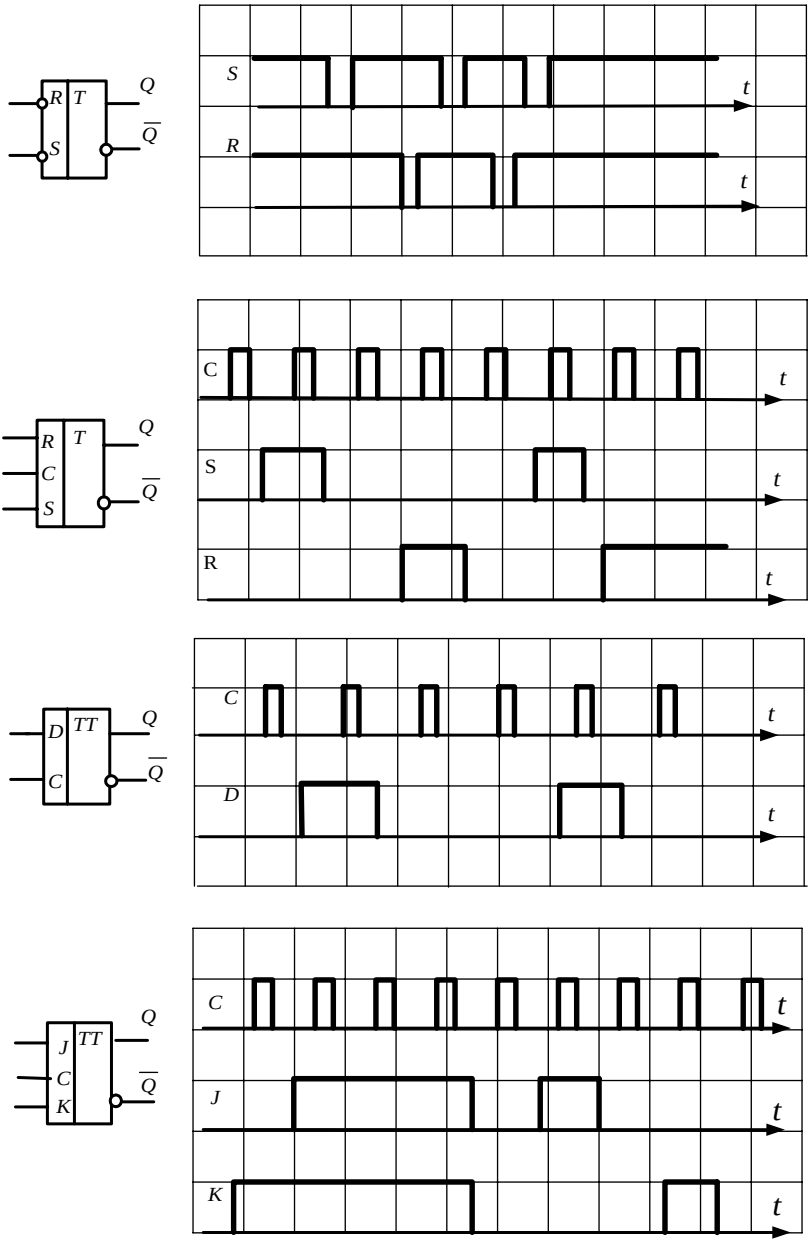

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t


R
T
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

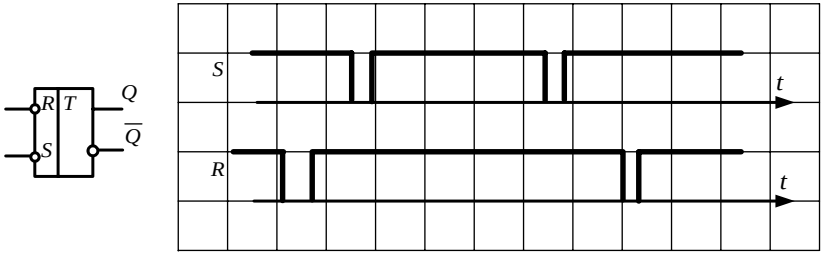

D
TT
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

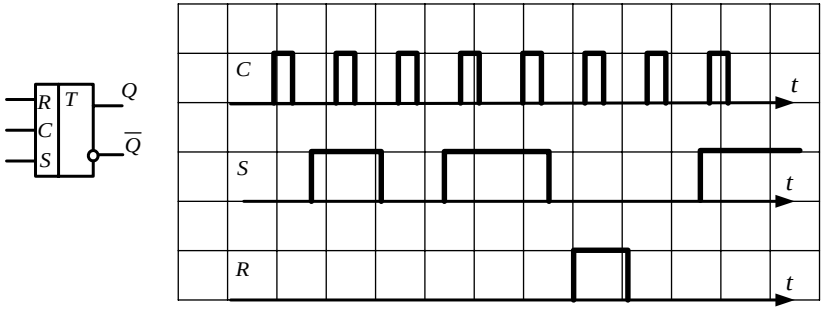

J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

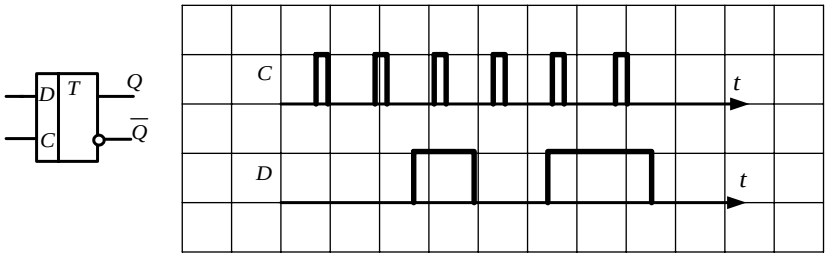
Вариант 7

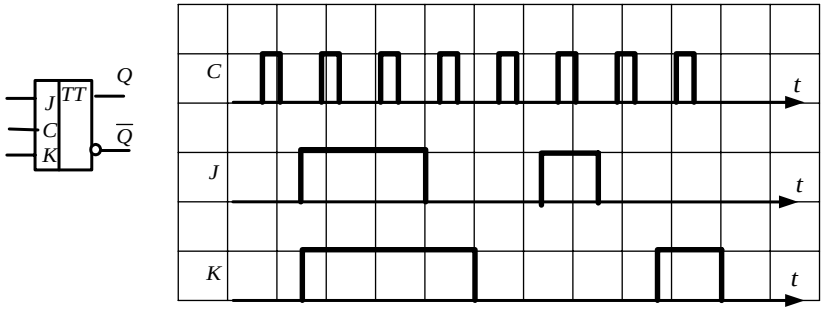


Вариант 8

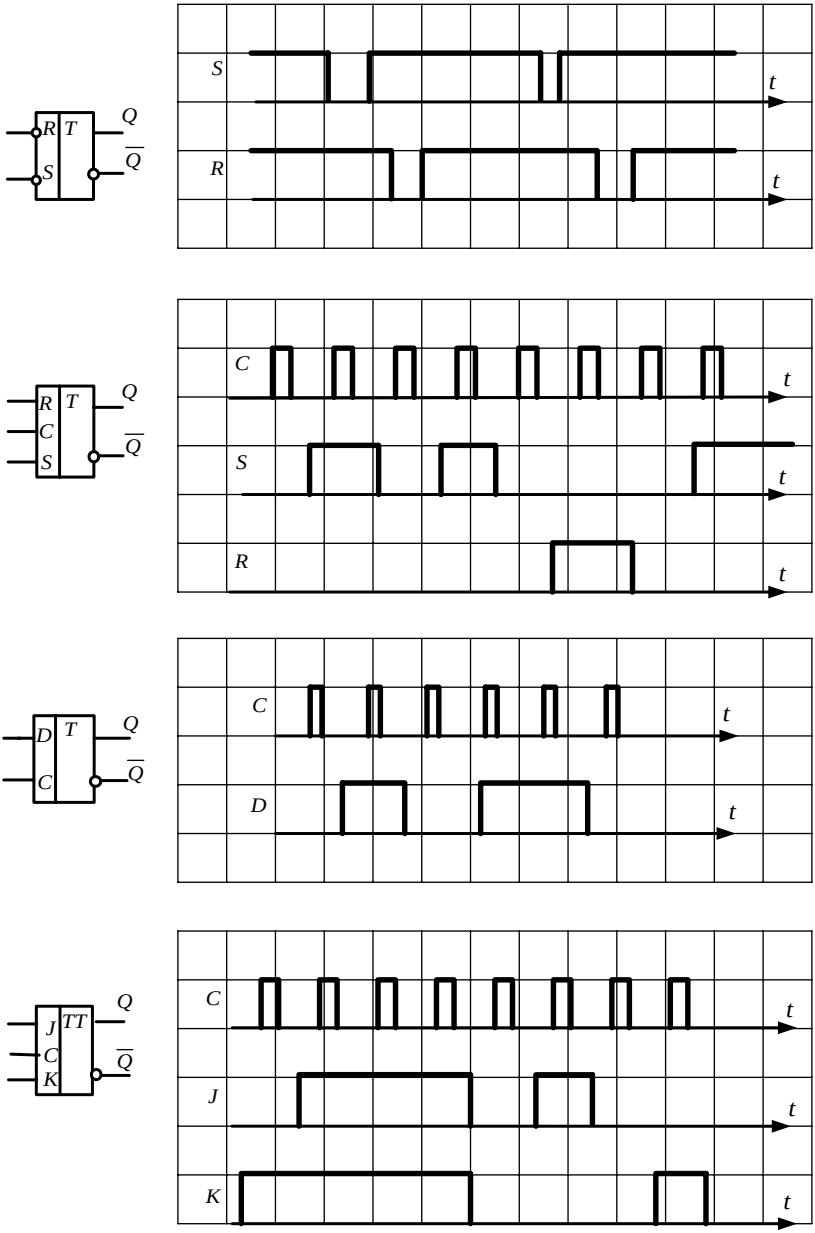

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t


R
T
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

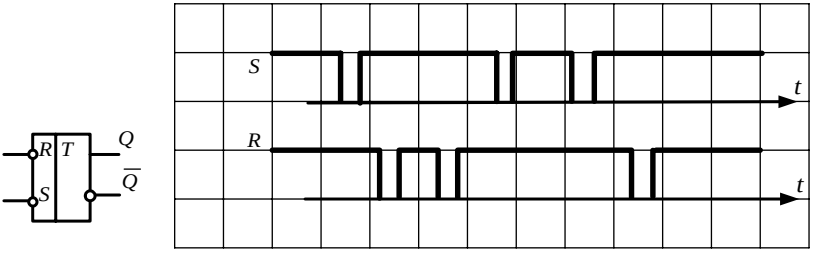

D
T
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

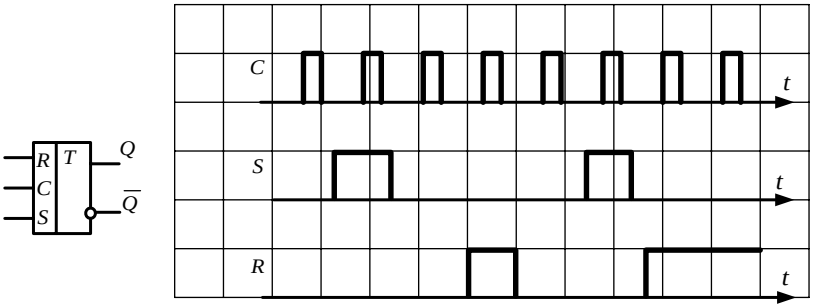

J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

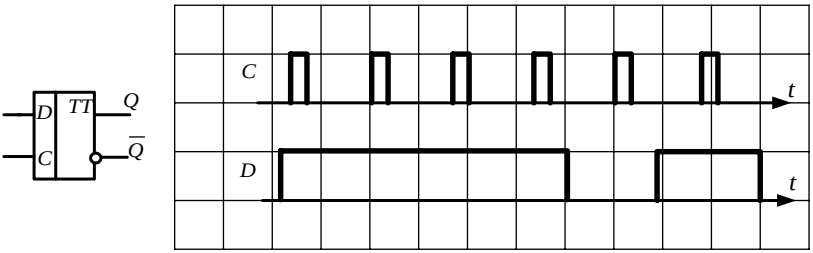
Вариант 9

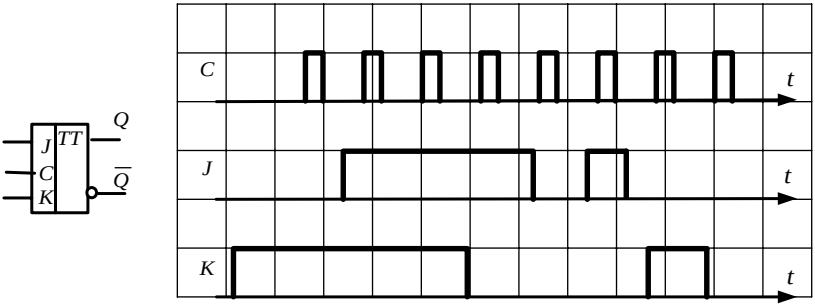


Вариант 10

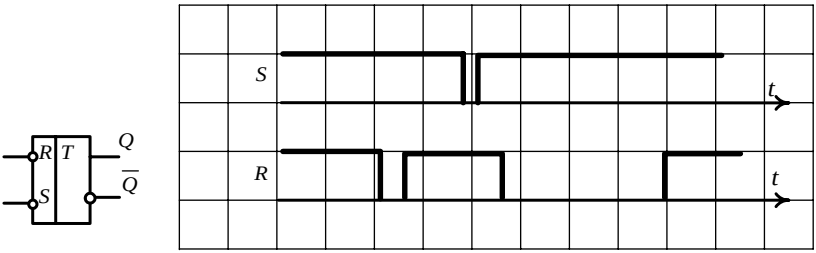

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

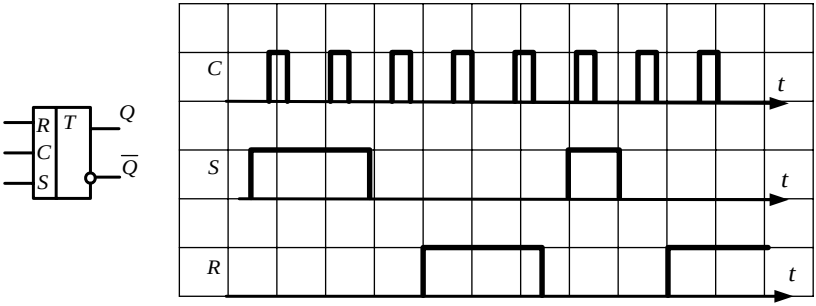

R
T
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

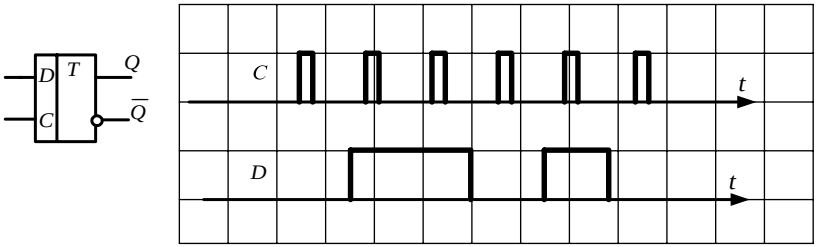

D
TT
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

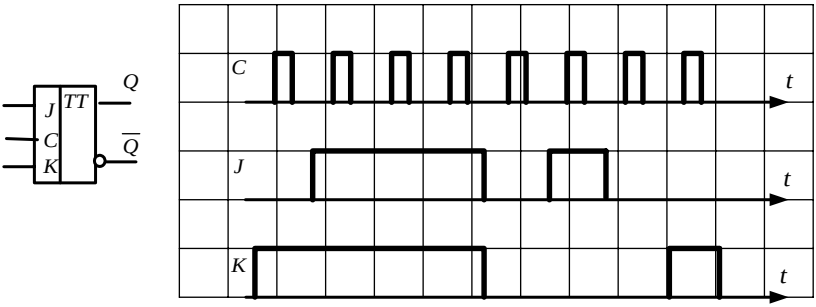

J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 11

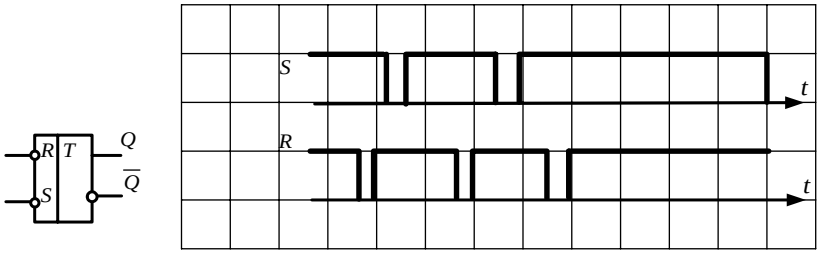


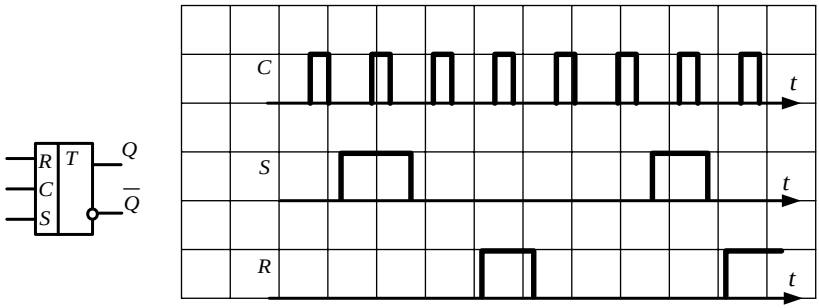


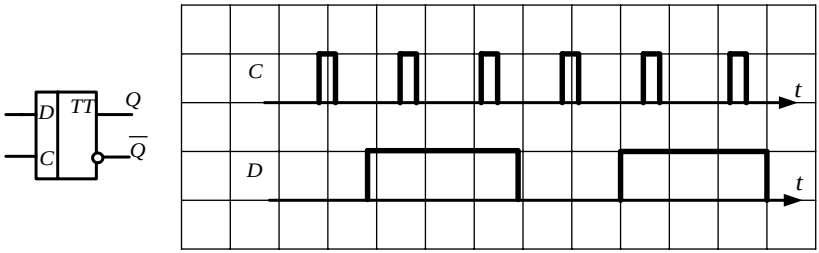


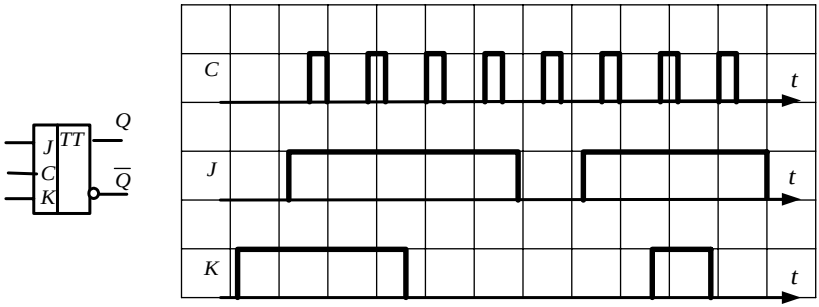


Вариант 12

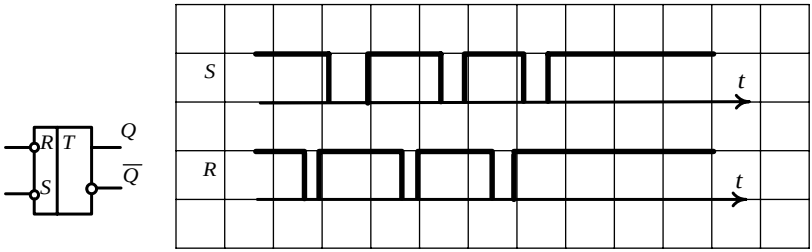


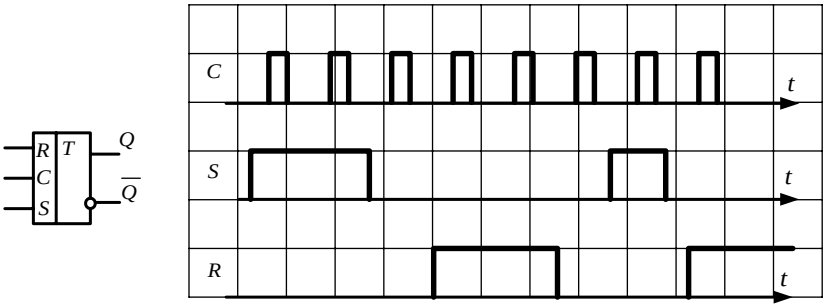


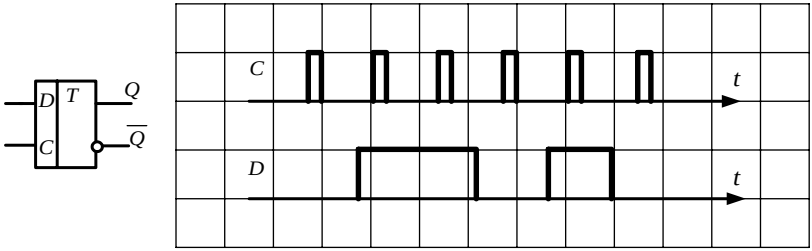


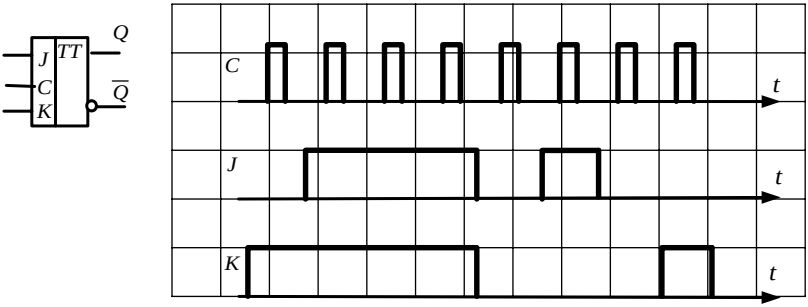


Вариант 13

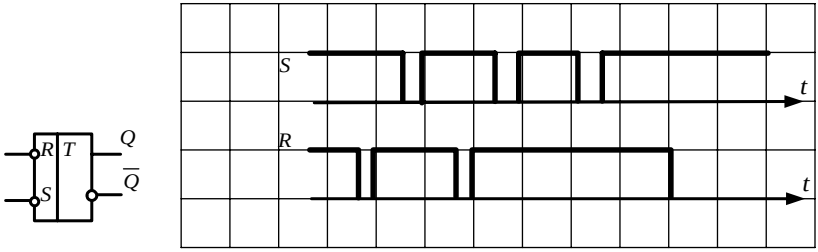


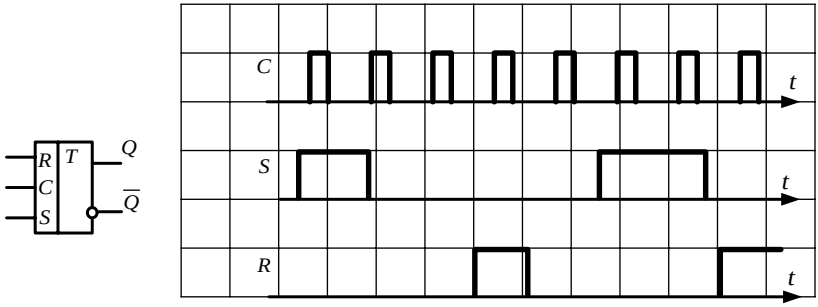


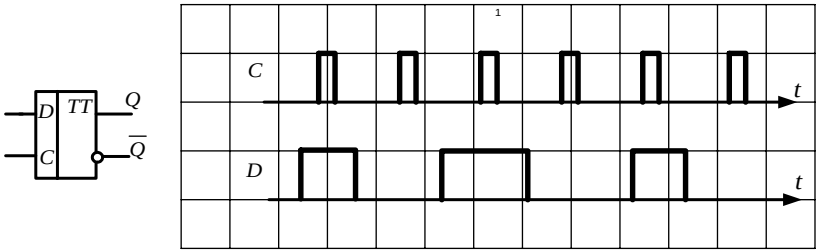


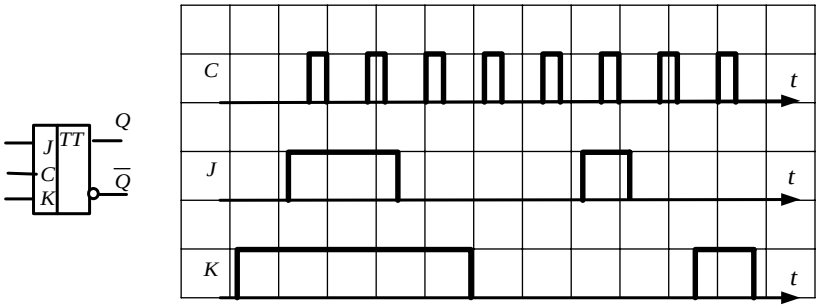


Вариант 14

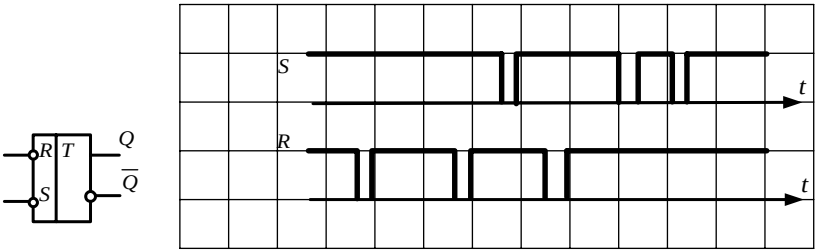

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

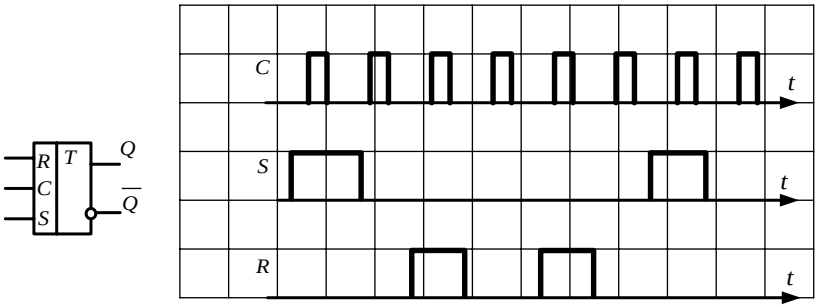

R
C
S
T
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

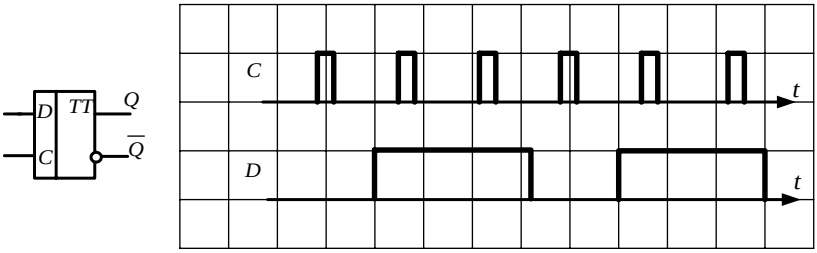

D
C
TT
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

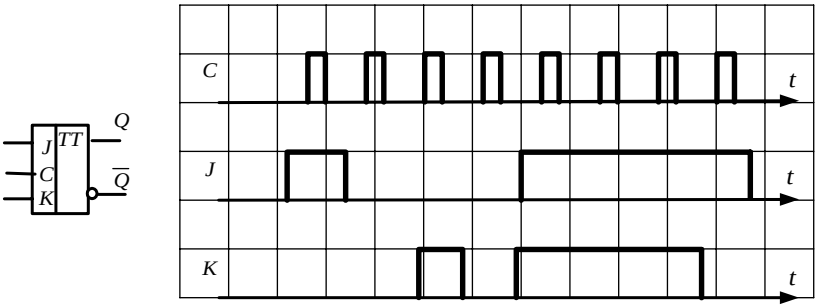

J
C
K
TT
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 15

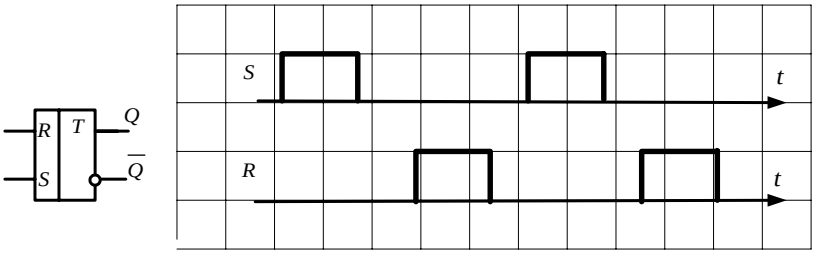


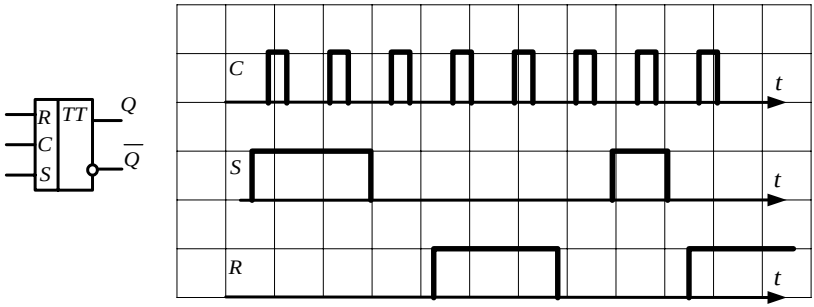


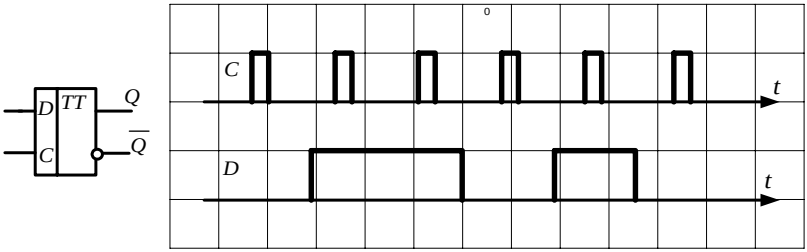


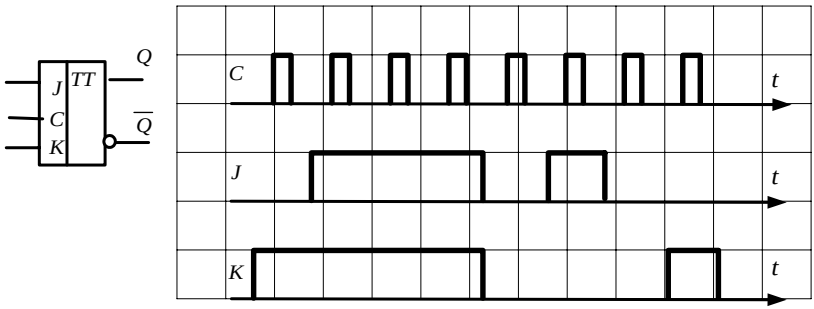


Вариант 16

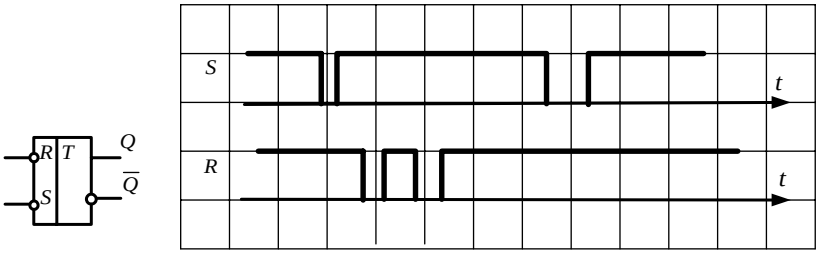


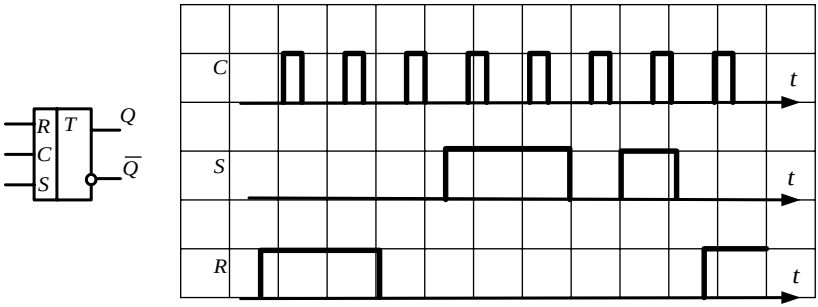


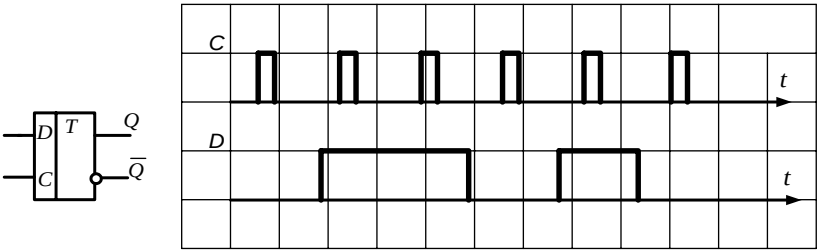


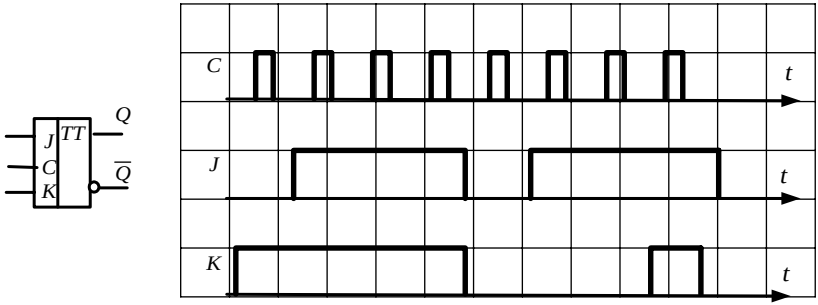


Вариант 17

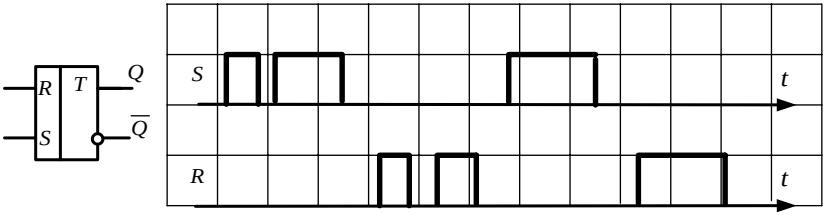


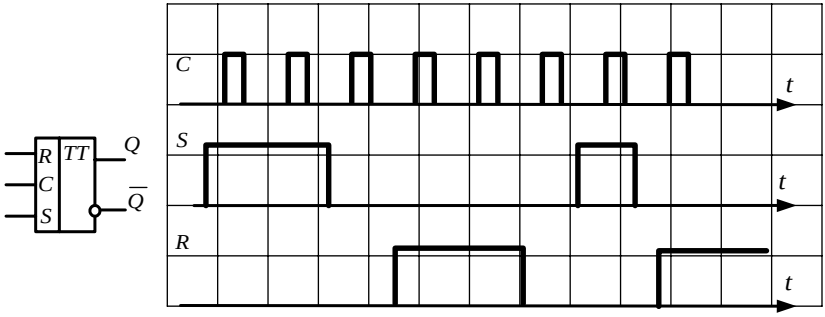


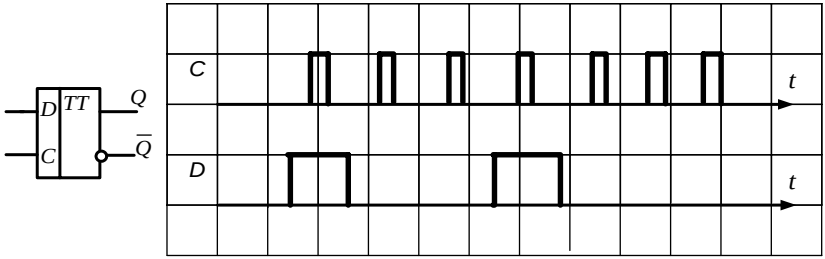


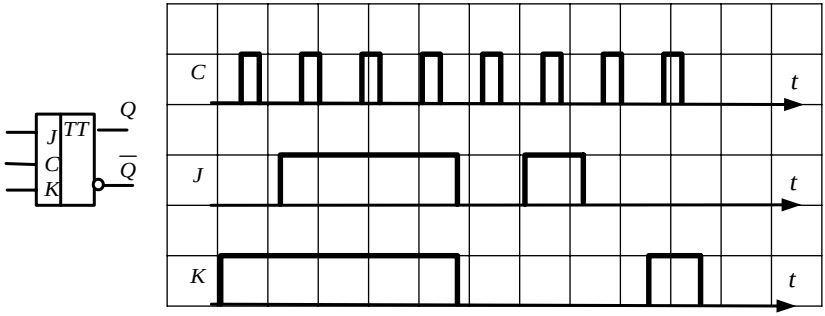


Вариант 18

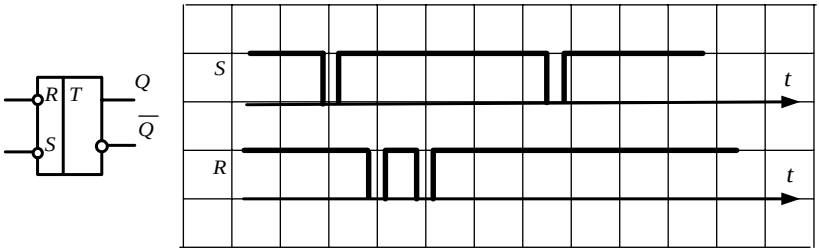


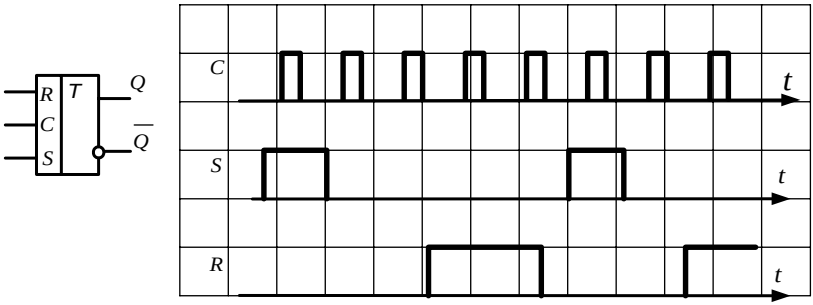


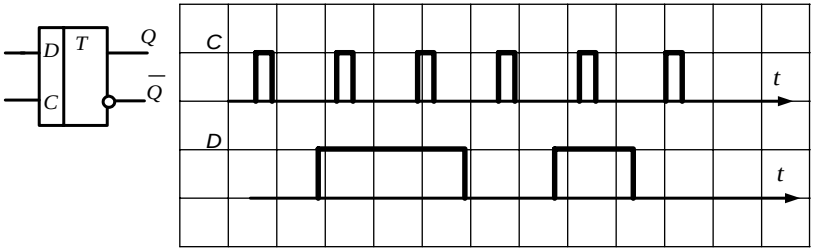


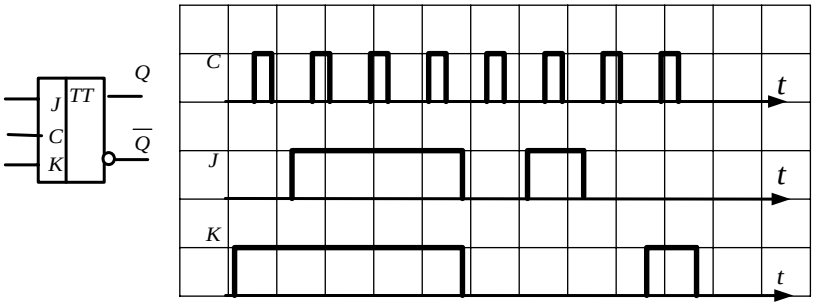


Вариант 19

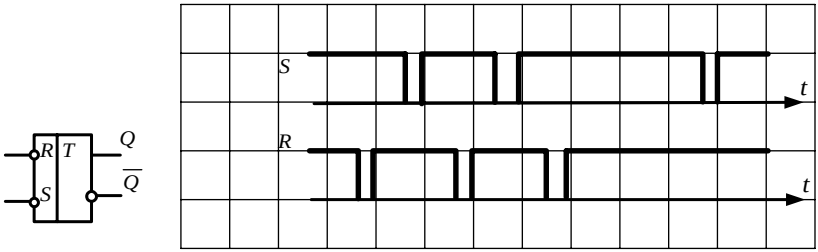


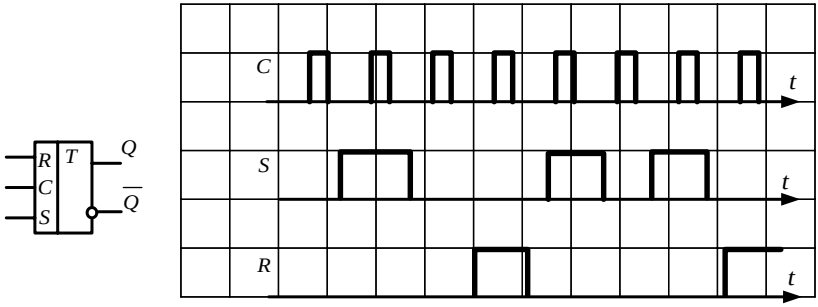


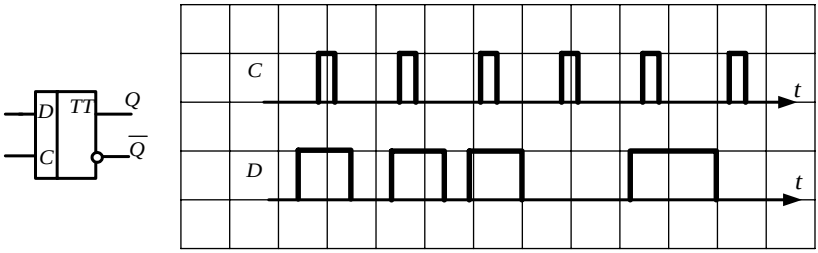


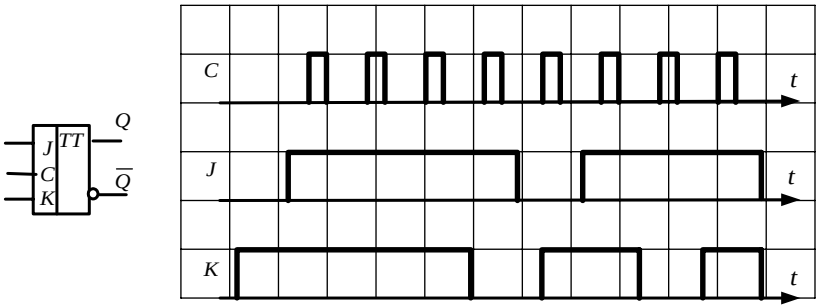


Вариант 20

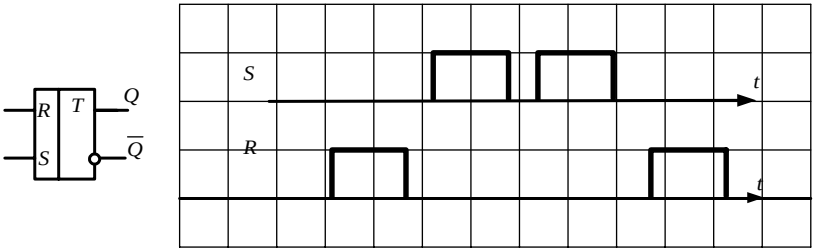

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

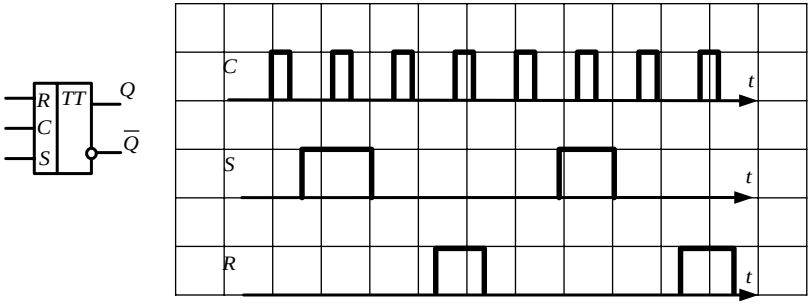

R
T
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

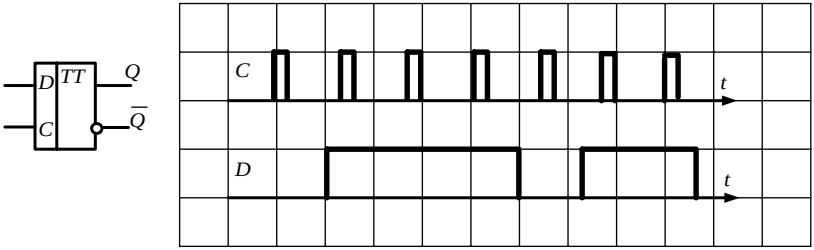

D
TT
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

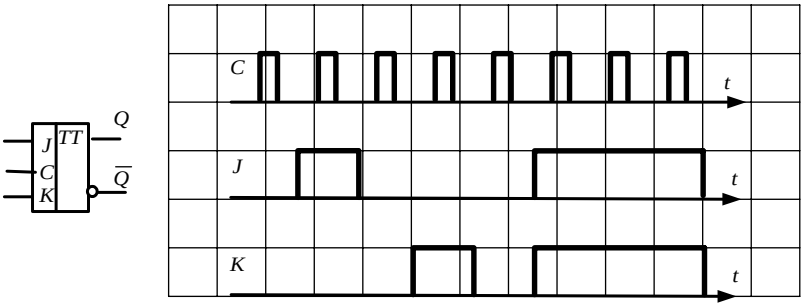

J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 21

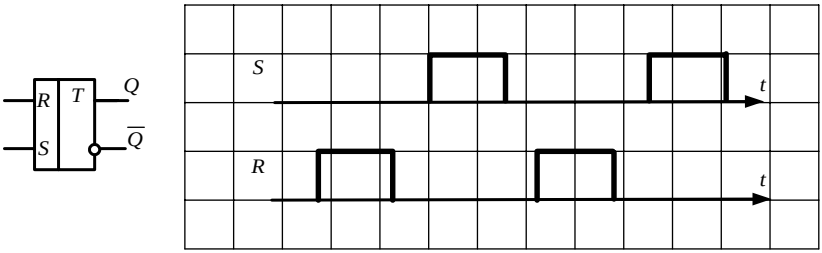

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

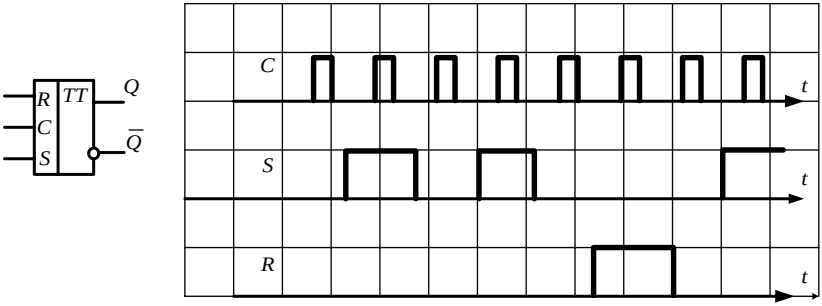

R
C
S
TT
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

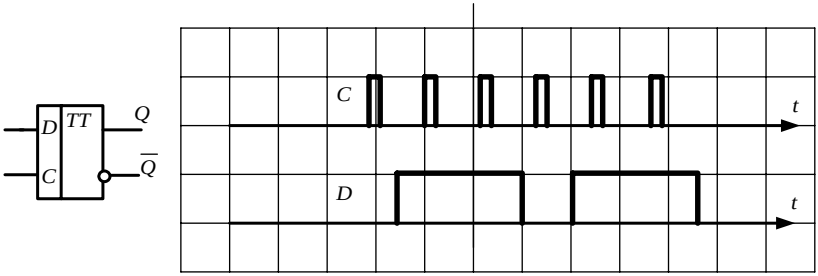

D
C
TT
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

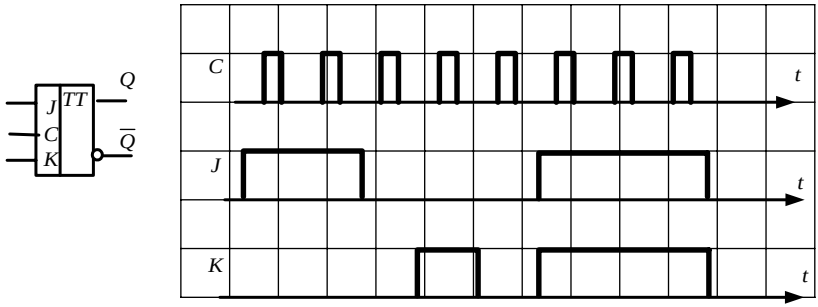

J
C
K
TT
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 22

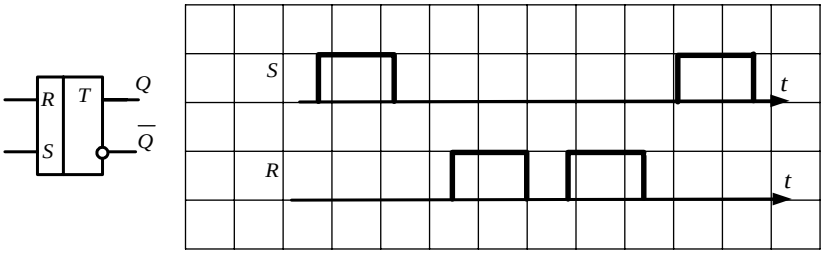


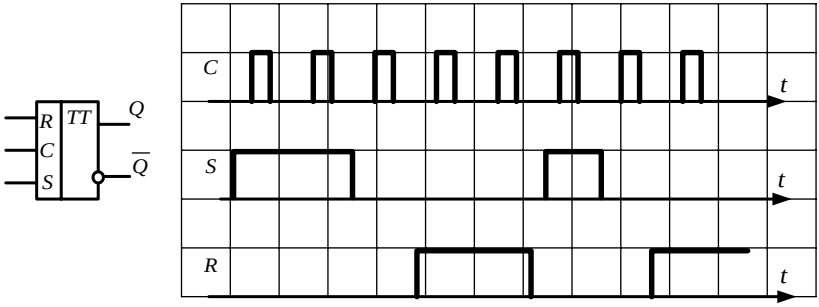


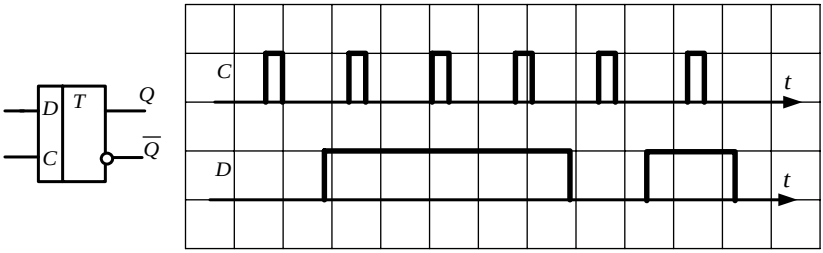


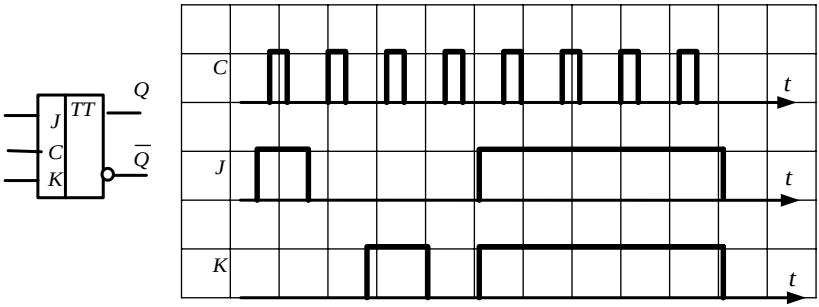


Вариант 23

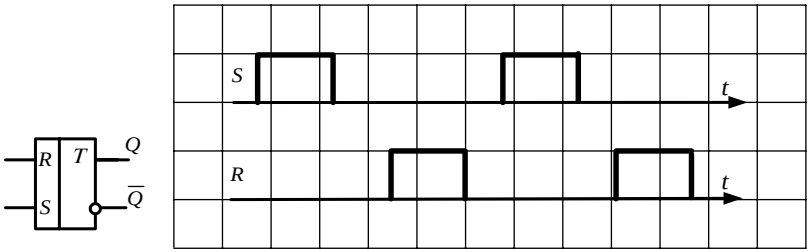

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

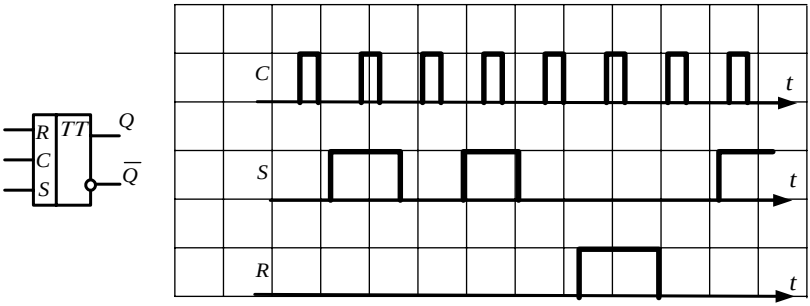

R
C
S
TT
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

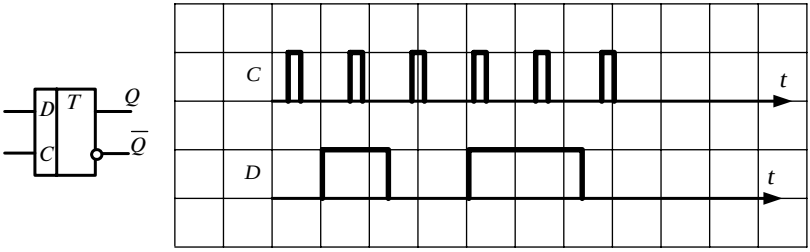

D
C
T
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

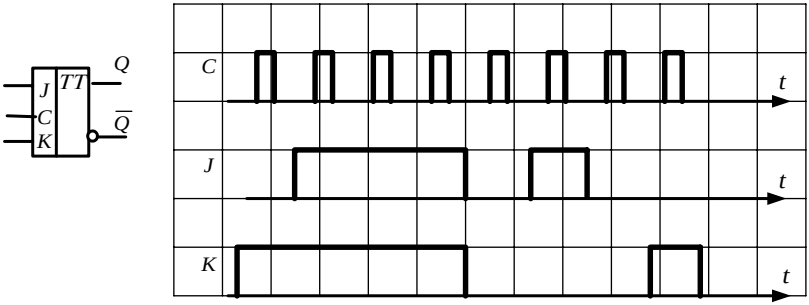

J
C
K
TT
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 24

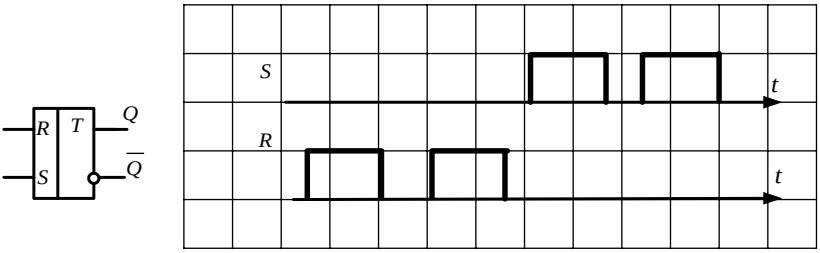

R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t

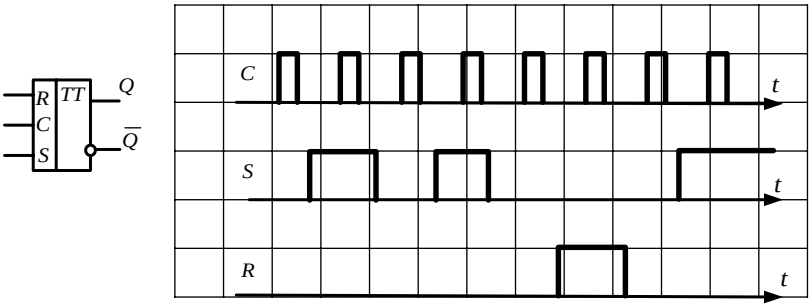

R
TT
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

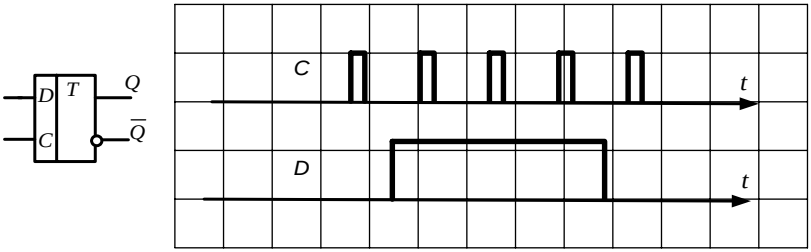

D
T
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t

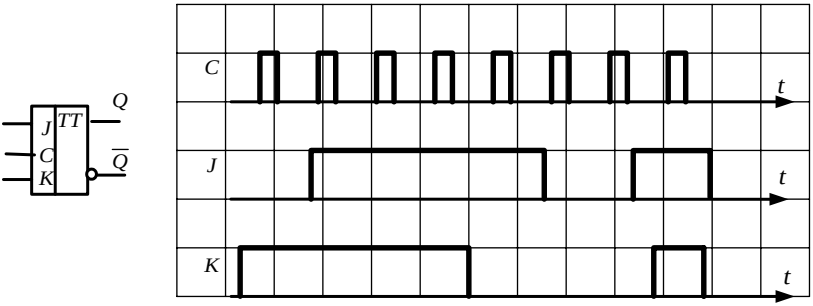

J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

Вариант 25

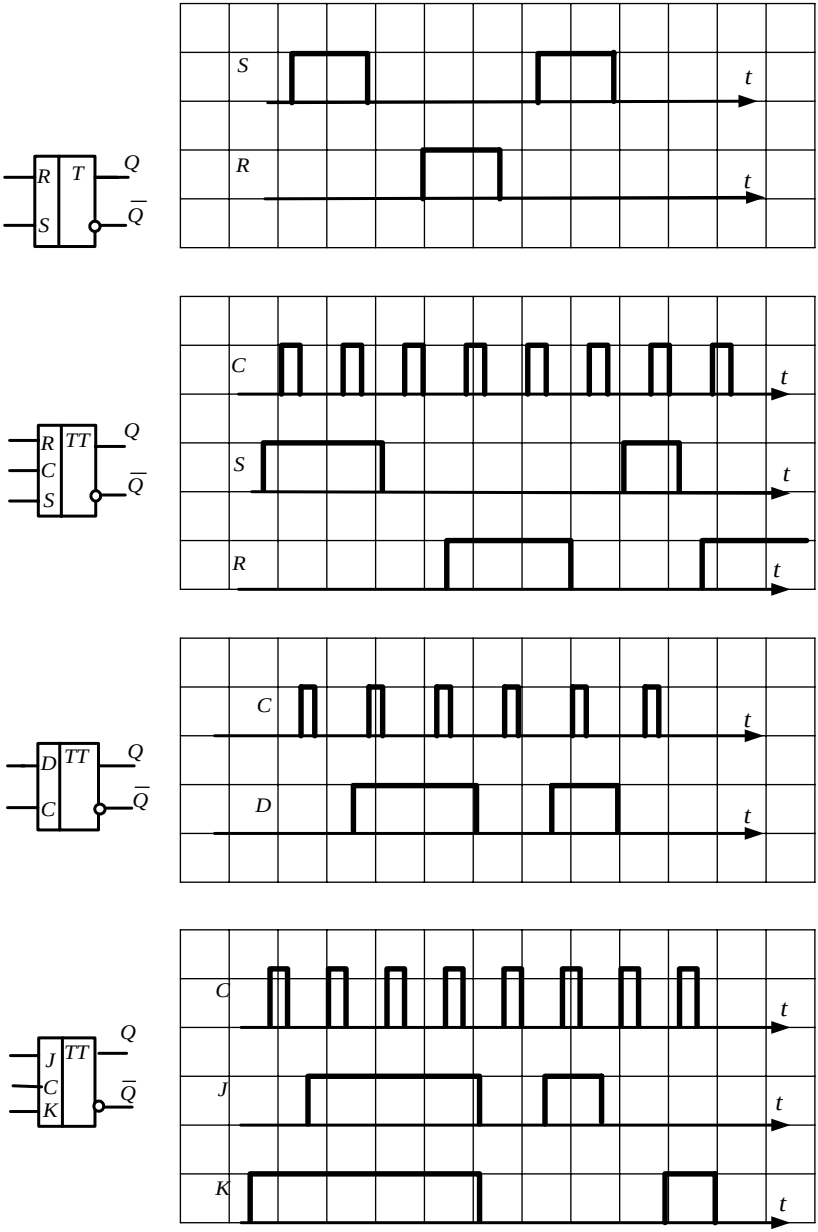

R
T
Q
S
$\overline{Q}$
S
R
t
t


R
TT
Q
C
S
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t

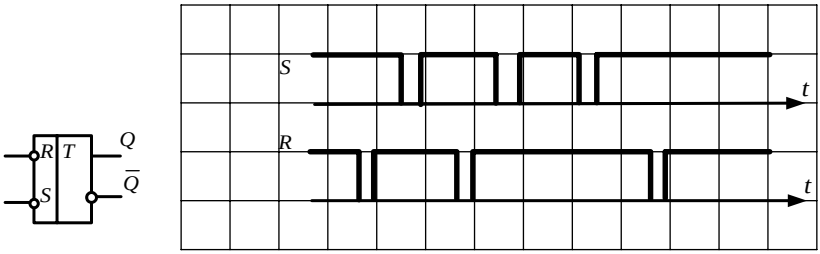

D
T
Q
C
$\overline{Q}$
C
D
t
t

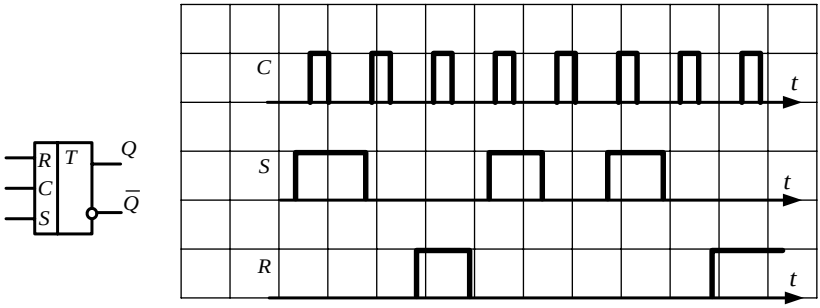

J
TT
Q
C
K
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

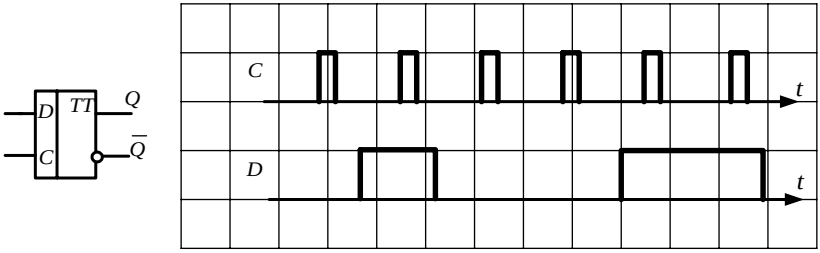
Вариант 26

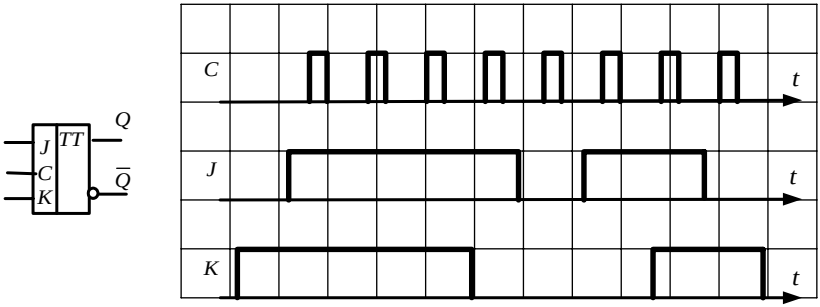


Вариант 27

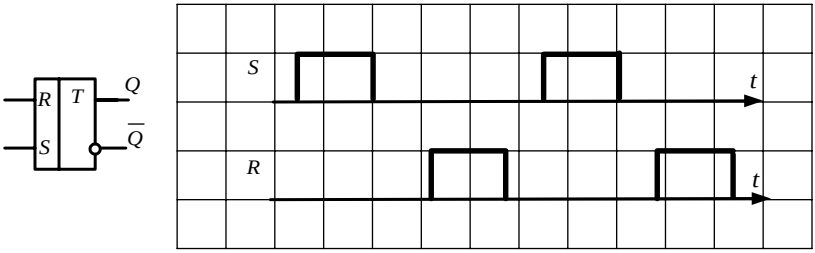


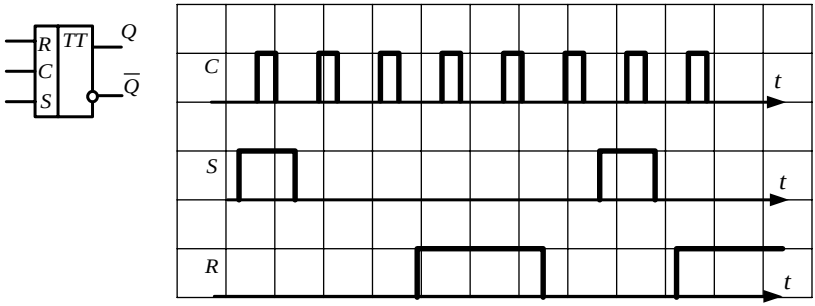


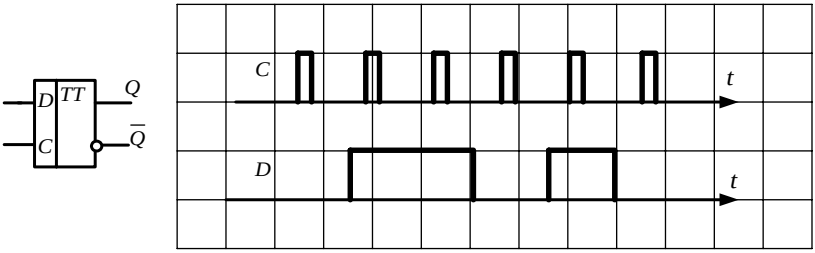


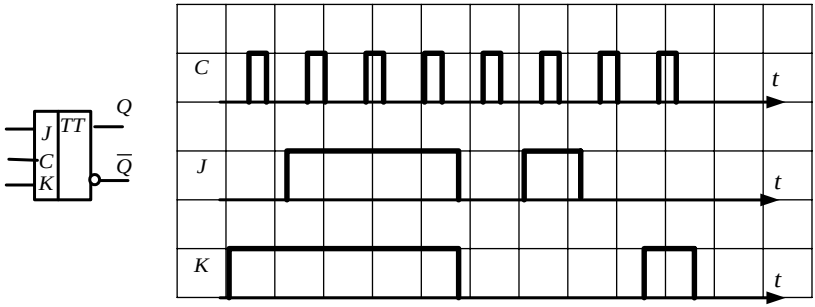


Вариант 28

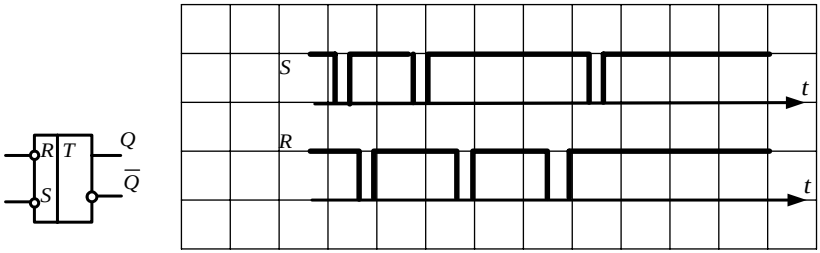


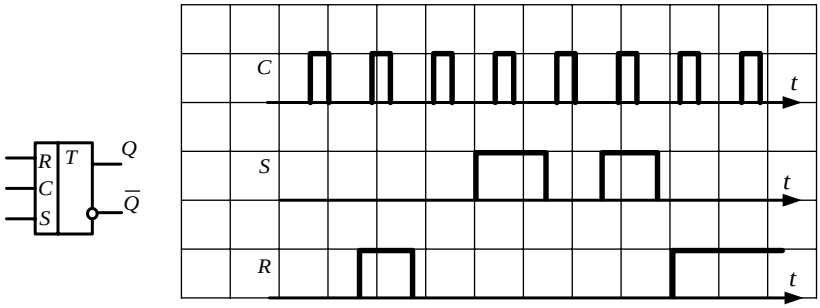


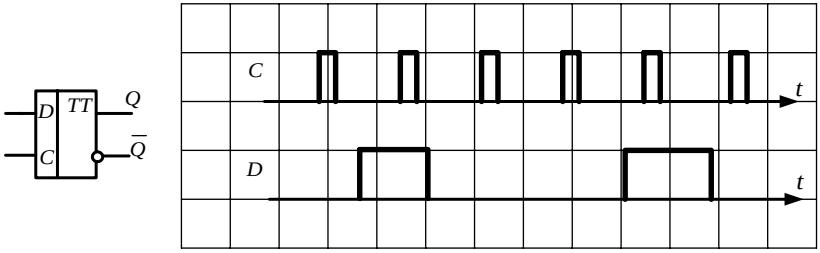


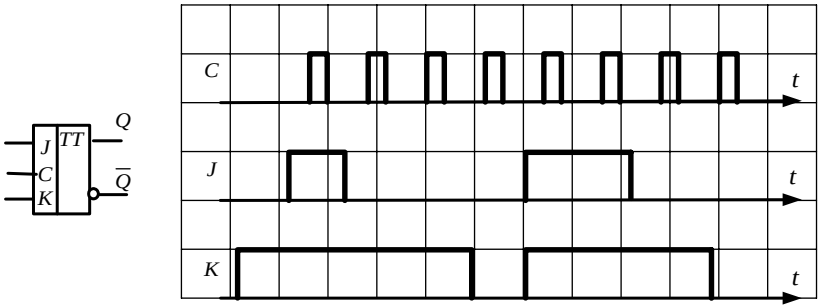


Вариант 29

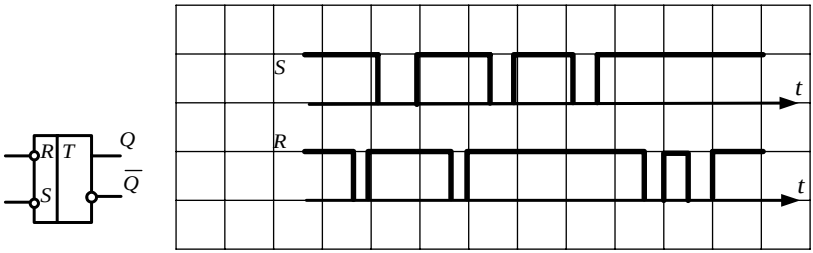


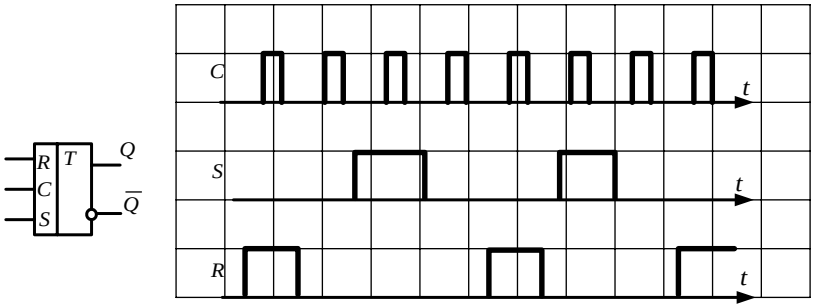


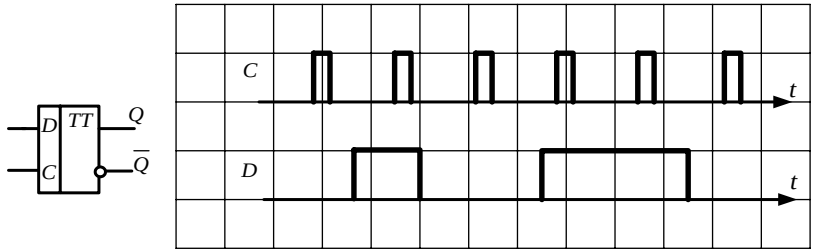


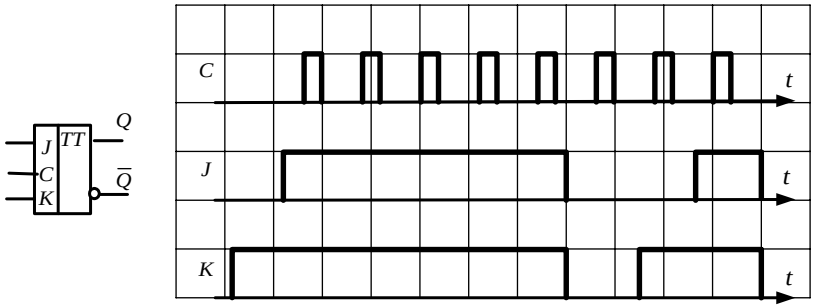


Вариант 30


R
T
S
Q
$\overline{Q}$
S
R
t
t


R
T
C
S
Q
$\overline{Q}$
C
S
R
t
t
t


D
TT
C
Q
$\overline{Q}$
C
D
t
t


J
TT
C
K
Q
$\overline{Q}$
C
J
K
t
t
t

6. СХЕМЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

6.1. Краткие теоретические сведения

Операционными усилителями (ОУ) называют высококачественные усилители с дифференциальным входом с большим коэффициентом усиления, предназначенные для усиления и обработки различных аналоговых и дискретных сигналов. Современные ОУ обычно выполняются в виде интегральных микросхем.

Разновидности условных графических обозначений ОУ представлены на рис. 6.1.

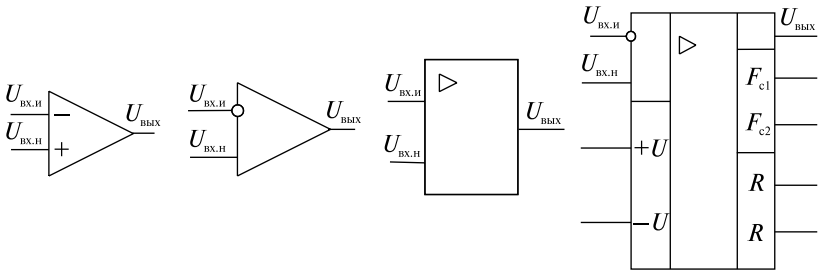


Рис. 6.1. Условные графические изображения операционных усилителей

Как видно из рисунка, усилитель имеет два входных вывода (слева) и один выходной вывод (справа).

Вход, при подаче на который входного напряжения $U_{вх}$ выходное напряжение $U_{вых}$ совпадает по фазе с входным, называется неинвертирующим и обозначается знаком (+). Вход, при подаче на который входного напряжения выходное напряжение оказывается сдвинутым по фазе на 180° относительно входного, называется инвертирующим и обозначается знаком инверсии (о) или (–). Для облегчения понимания назначения выводов допускается введение дополнительных полей с обеих сторон от основного поля, в которых указываются метки, характеризующие функции вывода (см. рис. 6.1). Например: R – выводы балансировки; F_c – выводы частотной коррекции; $+U$, $-U$ – выводы подключения питания и т. д.

С точки зрения использования ОУ в различных схемах важное значение имеет его амплитудная (передаточная) характеристика,

которая представляет собой зависимость $U_{вых}$ от $U_{вх}$ при нулевой частоте входного сигнала (рис. 6.2).

Характеристики снимаются при подаче входного напряжения на один из входов при напряжении на другом входе, равном нулю: кривая *1* соответствует подаче входного напряжения на неинвертирующий вход, кривая 2 – на инвертирующий вход.

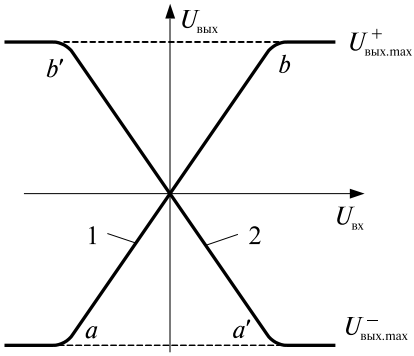


Рис. 6.2. Передаточные характеристики неинвертирующего усилителя (1) и инвертирующего усилителя (2)

На передаточных характеристиках ОУ можно выделить два участка:

– наклонный участок *a*-*b* (*a*'-*b*'), на котором сохраняется линейная зависимость $U_{вых} = K \cdot U_{вх}$, где K – коэффициент усиления. Этот режим используется при создании широкого класса схем для преобразования аналоговой информации (усилителей различных типов, устройств для выполнения математических операции и т.д.);

– горизонтальный участок, расположенный за пределами точек *a*, *b* (*a*', *b*'). ОУ в этом случае может находиться в состоянии $U_{вых} = U^{+}_{вых.max}$ либо $U^{-}_{вых.max}$ при подаче достаточно большого по амплитуде входного напряжения. Максимальные значения выходных напряжений $U^{+}_{вых.max}$ и $U^{-}_{вых.max}$ зависят от напряжений источников питания ОУ, для современных операционных усилителей типа *Rail to Rail* отличие не превышает десятых долей Вольта. Сказанное иллюстрируется на рис. 6.3, на котором приведены входной и выходной сигналы для усилителя на ОУ с коэффициентом усиления $K = 10\,000$ при подаче входного напряжения на неинвертирующий вход. При превышении входным сигналом определенных пределов наблюдается его ограничение.

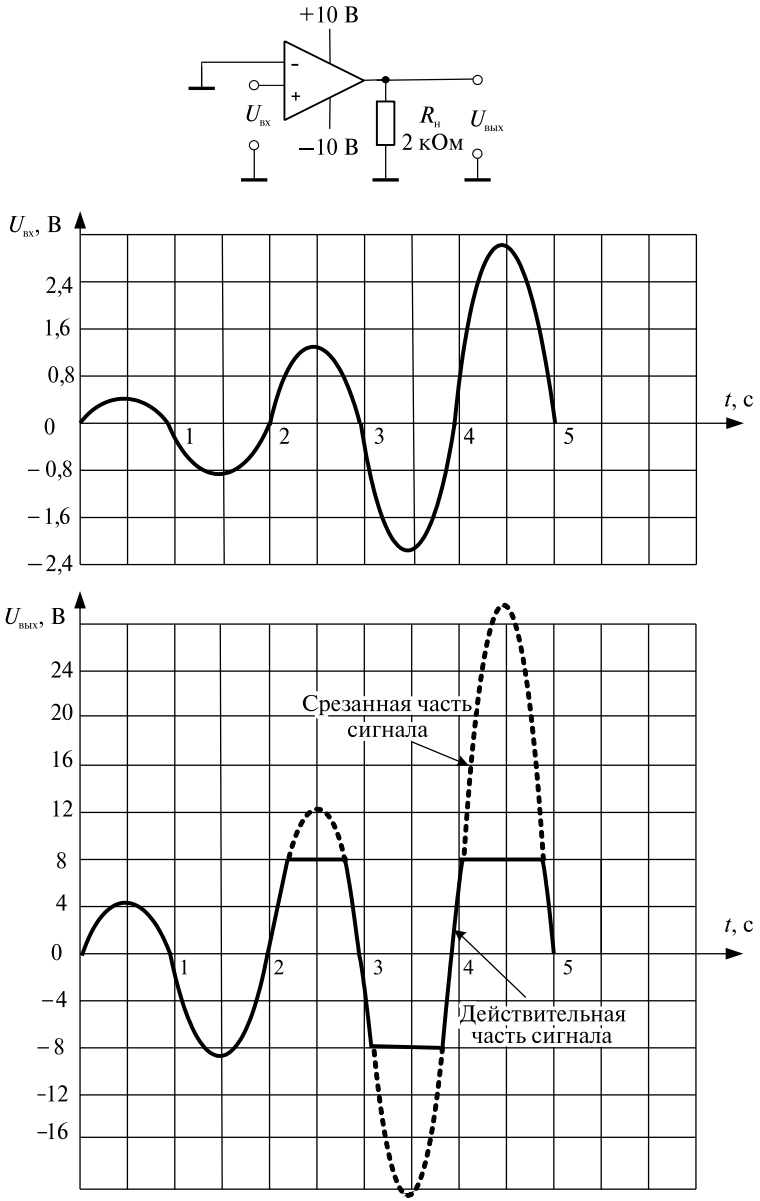


Рис. 6.3. Схема усилителя на неинвертирующем ОУ, диаграммы входного и выходного сигналов усилителя на ОУ с коэффициентом усиления $K = 10\,000$

Работа ОУ на наклонном участке *a-b* (*a'-b'*) может быть обеспечена путем использования отрицательных обратных связей различных типов, при этом наибольшее распространение получили две типовые схемы включения ОУ – неинвертирующий усилитель и инвертирующий усилитель, схемы которых представлены на рис. 6.4а и рис. 6.4б соответственно.

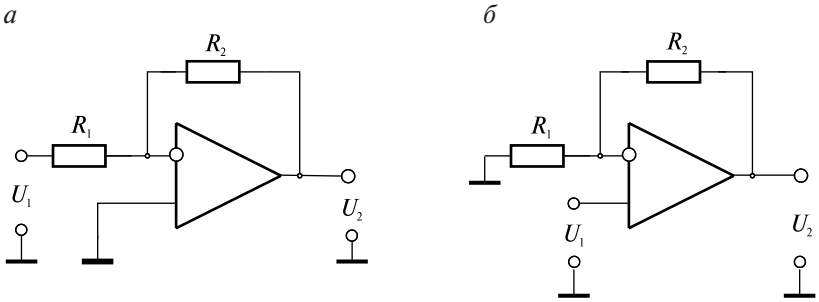


Рис. 6.4. Основные схемы операционных усилителей:
а – инвертирующего, *б* – неинвертирующего

Коэффициент усиления *K* неинвертирующего усилителя в приближении идеального ОУ (входные токи равны нулю, потенциалы обоих входов одинаковы) можно определить по упрощенной формуле

$$K_н = U_2/U_1 = 1 + R_2/R_1.$$

Аналогично, для инвертирующего усилителя

$$K_и = U_2/U_1 = -R_2/R_1.$$

6.2. Задания для самостоятельной работы

Самостоятельная работа заключается в построении временных диаграмм сигналов $U_{вых}$ на выходе инвертирующего усилителя (схема 1) или неинвертирующего усилителя (схема 2) на одном из двух типов ОУ при заданных входных сигналах, напряжениях питания $\pm E_п$ и сопротивлениях резисторов *R*1 и *R*2. Расчет проводится для двух значений сопротивлений переменного резистора *R*: минимального *RI* и максимального *RF* с учетом зависимости диапазона выходных напряжений от напряжения питания для каждого типа ОУ.

При выполнении заданий следует изобразить диаграммы изменения входных и выходных сигналов в одном масштабе времени. Исходные данные берутся из таблицы 6.1. Схемы усилителей и варианты заданий приведены ниже.

Таблица 6.1

№	Схема	Тип ОУ	Вариант $u_{вх}(t)$	$\pm E_п$, В	$R1$, кОм	$R2$, кОм	RI, кОм	RF, кОм
1	1	1	1	10	20	50	50	150
2	2	1	2	15	10	30	60	270
3	1	2	3	12	5	30	150	300
4	2	2	4	9	20	5	5	30
5	1	1	5	15	30	200	100	500
6	2	1	6	10	5	100	150	360
7	1	2	1	6	20	10	30	120
8	2	2	2	10	10	20	100	220
9	1	1	3	15	5	30	120	360
10	2	1	4	12	15	10	5	20
11	1	2	5	9	30	60	100	320
12	2	2	6	10	5	100	200	450
13	1	1	1	16	20	100	100	240
14	2	1	2	12	10	50	60	200
15	1	2	3	9	5	100	50	150
16	2	2	4	15	15	5	10	50
17	1	1	5	10	30	60	200	360
18	2	1	6	12	2	20	60	240
19	1	2	1	15	20	30	60	330
20	2	2	2	9	10	20	90	200
21	1	1	3	12	5	120	100	180
22	2	1	4	16	15	10	15	60
23	1	2	5	5	30	60	20	120
24	2	2	6	10	5	150	50	360
25	1	1	1	7	20	20	40	150
26	2	1	2	12	10	30	50	220
27	1	2	3	16	5	100	100	360
28	2	2	4	9	15	2	4	20
29	1	1	5	5	30	30	60	160
30	2	1	6	10	3	100	20	240

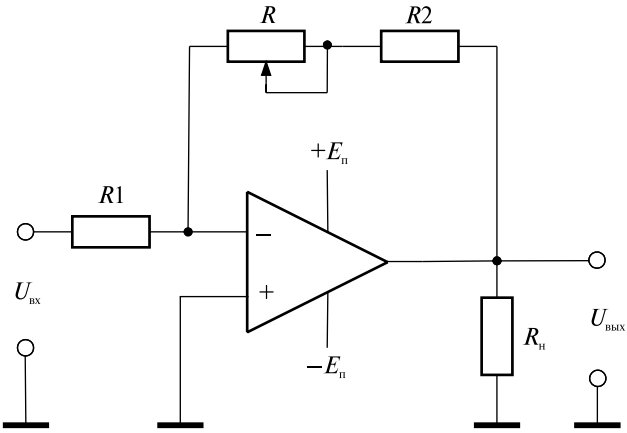


Рис. 6.5. Усилитель по схеме 1

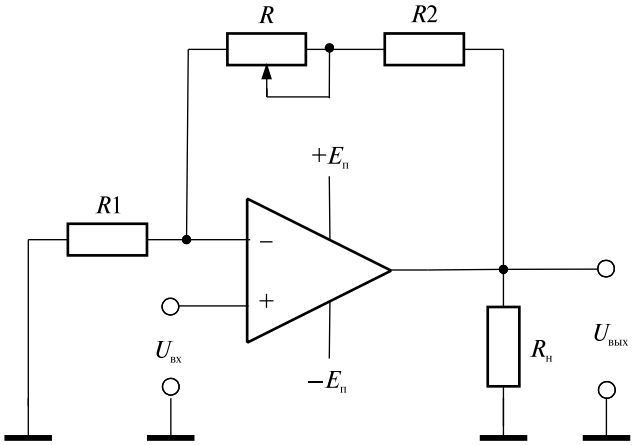


Рис. 6.6. Усилитель по схеме 2

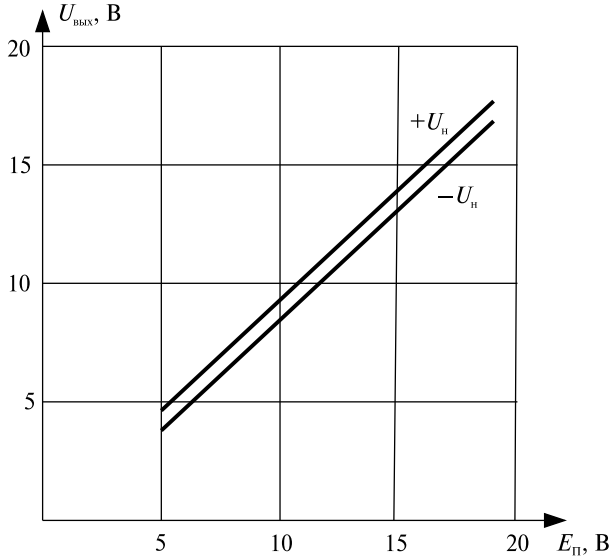


Рис. 6.7. Зависимость максимальных значений выходных напряжений от напряжения питания для операционного усилителя 1-го типа

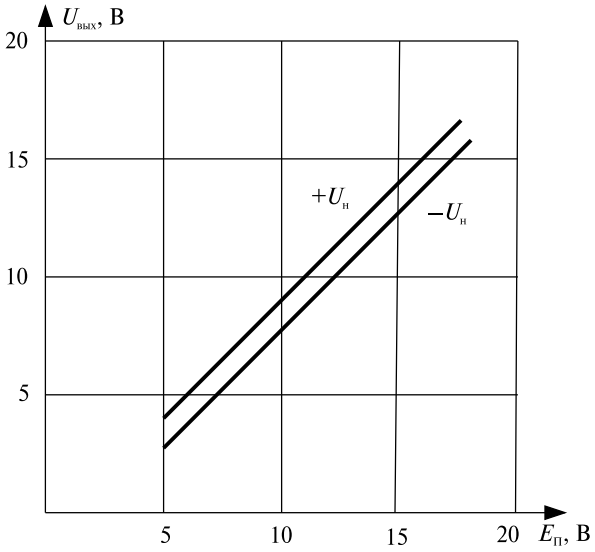


Рис. 6.8. Зависимость максимальных значений выходных напряжений от напряжения питания для операционного усилителя 2-го типа

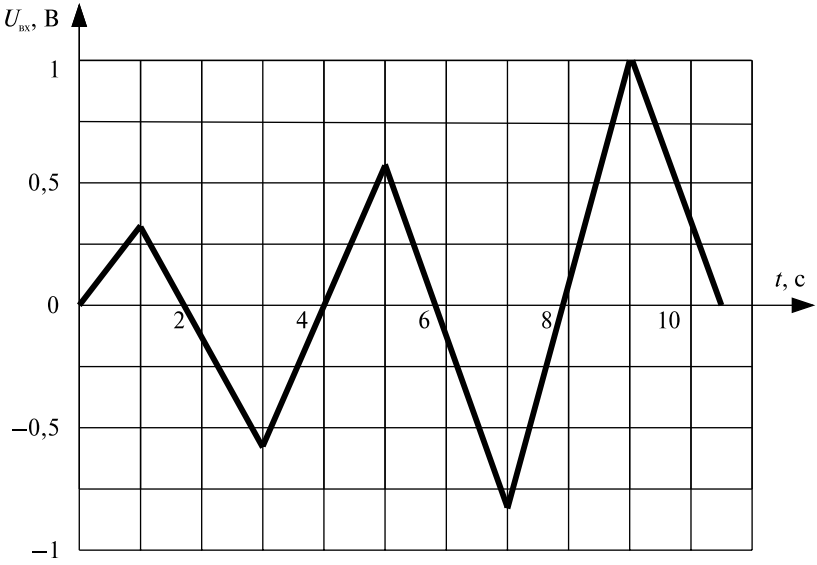


Рис. 6.9. Диаграмма входного напряжения (вариант 1)

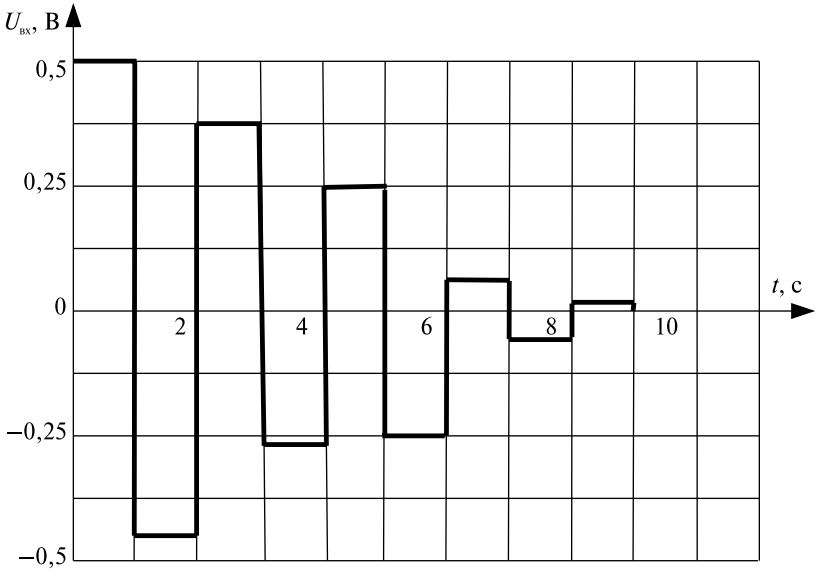


Рис. 6.10. Диаграмма входного напряжения (вариант 2)

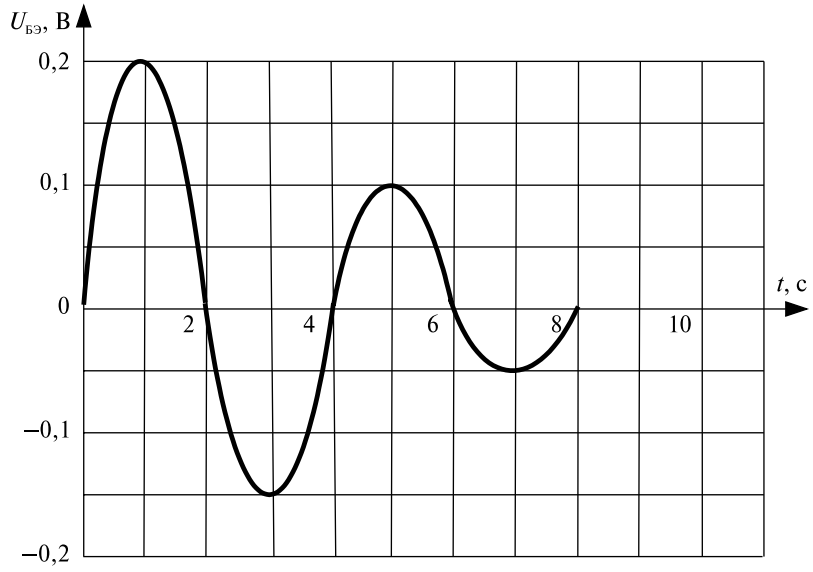


Рис. 6.11. Диаграмма входного напряжения (вариант 3)

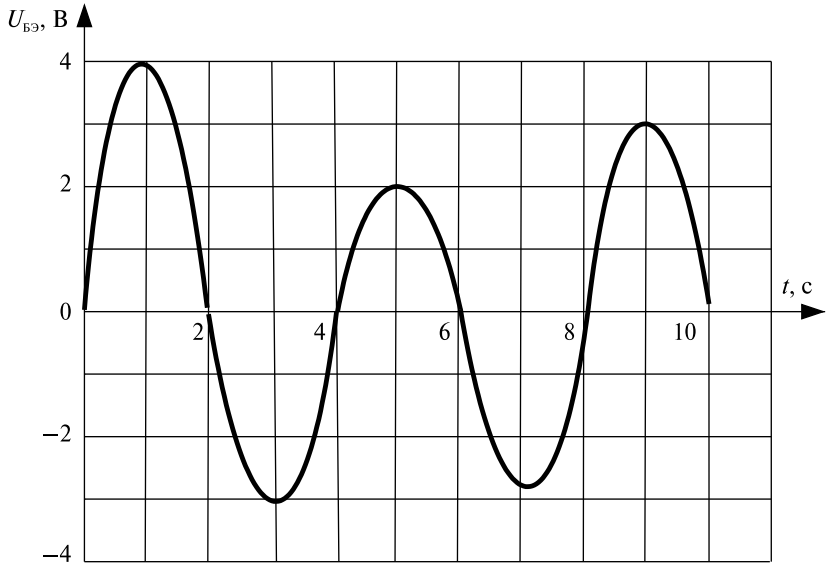


Рис. 6.12. Диаграмма входного напряжения (вариант 4)

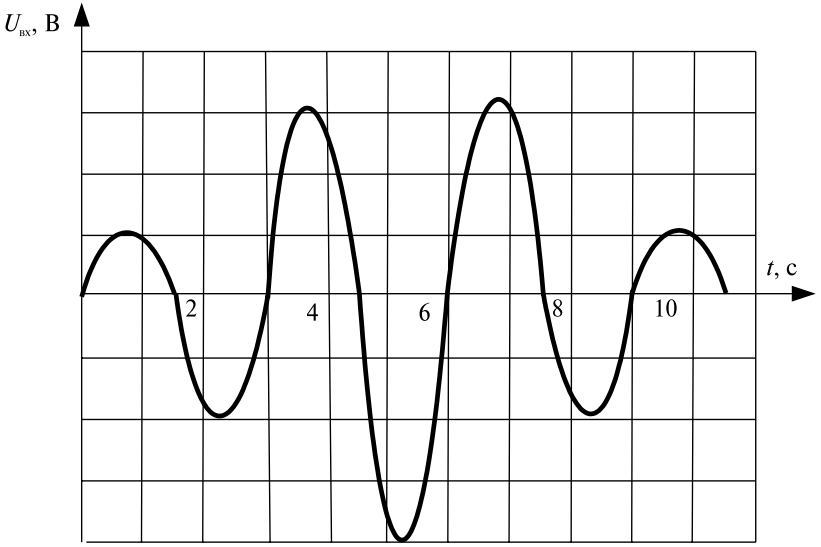


Рис. 6.13. Диаграмма входного напряжения (вариант 5)

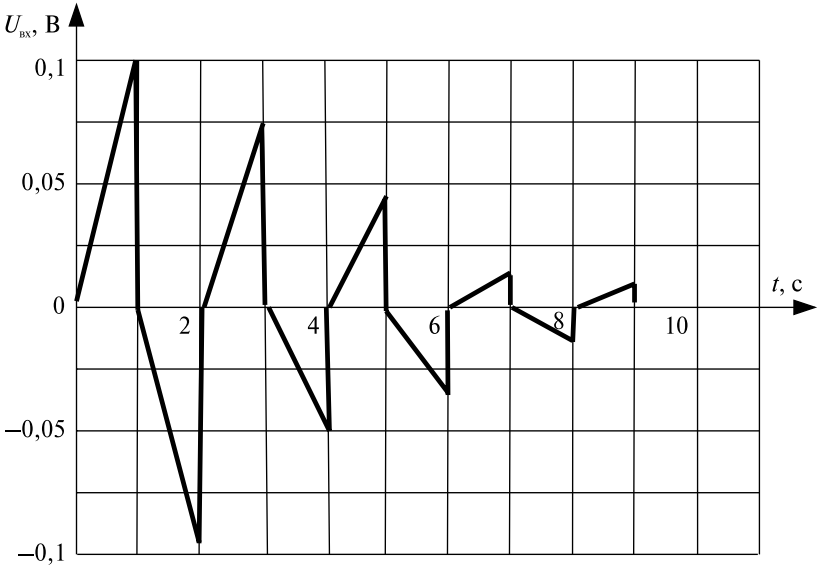


Рис. 6.14. Диаграмма входного напряжения (вариант 6)

Библиографический список

1. *Лачин В. И.* Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 710 с.
2. *Пасынков В. В.* Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М. : Лань, 2009. – 479 с.
3. *Прянишников В. А.* Электроника. Курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : Корона принт, 2002. – 415 с.
4. *Марченко А. Л.* Основы электроники / А. Л. Марченко. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 296 с.
5. *Нефедов В. И.* Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2002. – 510 с.
6. *Чижма С. Н.* Электроника и микросхемотехника : учеб. пособие / С. Н. Чижма. – М. : Маршрут, 2012. – 359 с.
7. *Новоселов Ю. В.* Дискретные и цифровые устройства электроники / Ю. В. Новоселов. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2007. – 52 с.