

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ПРАКТИЧЕСКИЕ (ЛАБОРАТОРНЫЕ) РАБОТЫ

по учебной дисциплине:

ОП. 12 «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА»

Специальность: 35.02.08

Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

г. Грязовец
2018 г.

Рассмотрено

цик洛вой комиссией по общепрофессиональным
дисциплинам и профессиональным модулям
отделения «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»

Согласовано

зам. директора по ОМР
 Е. А. Ткаченко
« 30 » августа 2018 г.

Протокол № 1 от « 30 » августа 2018 г.

Председатель комиссии:
 Т. В. Невзорова

Пояснительная записка

Пакет инструкционных карт разработан на основании программы учебной дисциплины ОП.12 «Электронная техника» для специальности 35.02.08 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

В результате изучения дисциплины «Электронная техника» студент должен уметь:

- ✓ снимать характеристики полупроводниковых диодов;
- ✓ снимать характеристики и определять параметры транзисторов;
- ✓ снимать характеристики тиристоров;
- ✓ снимать характеристики фотодиодов, фоторезисторов;
- ✓ производить упрощенный расчет выпрямителя;
- ✓ исследовать работу усилителя.
- ✓ составлять различные логические схемы.

При изучении дисциплины необходимо постоянно обращать внимание на необходимость проведения практических занятий, так как практические навыки могут быть использованы в будущей профессиональной деятельности.

Курс учебной дисциплины ОП.12 «Электронная техника» по рассчитан на 106 часов максимальной нагрузки, из них 34 часа – практические работы.

Практические занятия проводятся целой группой. Студенты работают в паре по инструкционным картам. Все практические работы оформляются в отдельную рабочую тетрадь. Практические занятия рассчитаны на 2 часа, что отражено в тематическом плане.

Перечень практических работ и отрабатываемых профессиональные и общие компетенции

| № п/п | Название работы | Профессиональные и общие компетенции |
|---------------------------------|--|---|
| 1. | Изучение электровакуумного диода, триода, пентода. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 2. | Изучение полупроводникового диода. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 3. | Изучение полупроводникового транзистора. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 4. | Определение параметров транзистора по вольт-амперным характеристикам. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 5. | Изучение тиристора. Снятие и анализ характеристик управляемого тиристора. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 6. | Изучение интегральных микросхем. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 7. | Изучение фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Изучение конструкции и характеристик фотоэлектронных приборов. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 8. | Изучение неуправляемых однофазных выпрямителей. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 9. | Расчет неуправляемых однофазных выпрямителей. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 10. | Изучение выпрямителей и сглаживающих фильтров. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 11. | Изучение выпрямителей на тиристорах. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 12. | Изучение работы усилителя с построением вольт-амперных характеристик. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 13. | Определение параметров однокаскадного усилителя. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 14. | Изучение схем релаксационных генераторов, автогенераторов. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 15. | Изучение работы мультивибратора в ждущем режиме. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 16. | Построение схем на логических элементах. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| 17. | Изучение триггеров, шифраторов, дешифраторов. | ОК 1-9 ПК 1.1, 1.3, 3.2 |
| Всего практических работ | | 17 |

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение электровакуумного диода, триода, пентода»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение электровакуумного диода, триода, пентода.

Цель работы: Изучить принцип действия электровакуумного прибора.

Методическая часть

Измерить анодные характеристики вакуумного диода при двух различных токах накала, определить сопротивление диода при различных напряжениях и проверить его одностороннюю проводимость для электрического тока.

Приборы и принадлежности:

- 1) электронная лампа (кенотрон) 5Ц4М на панели с зажимами;
- 2) два цифровых мультиметра;
- 3) реостат лабораторный;
- 4) потенциометр проволочный;
- 5) источник электропитания постоянного и переменного тока;
- 6) соединительные провода.

Теоретическое введение

1. Электронно - вакуумные приборы (электронно-вакуумные лампы, электронные лампы) – вакуумные приборы, работа которых основана на взаимодействии потока электронов, движущихся в высоком вакууме, с электрическим полем, создаваемым металлическими электродами. Конструктивно они представляют собой стеклянные, металлические или керамические герметичные сосуды, из которых удалён воздух и внутри которых находятся два или более металлических электродов. Давление остаточных газов в электронной лампе составляет 10^{-6} мм рт. ст. и менее. Высокий вакуум необходим для того, чтобы газы (воздух) не мешали движению электронов в лампе.

В этих приборах источником электронов является катод – электрод с отрицательным потенциалом, который при пропускании через него тока разогревается и испускает электроны. Эти электроны движутся под действием сил электрического поля к аноду, электроду с высоким положительным потенциалом. Попадая на анод, электроны создают электрический ток в электрической цепи, в состав которой и входит электронная лампа. Другие электроды, называемые сетками, служат для создания электрических полей, которые управляют интенсивностью потока электронов, то есть количеством электронов, попадающих на анод (в электрическую цепь).

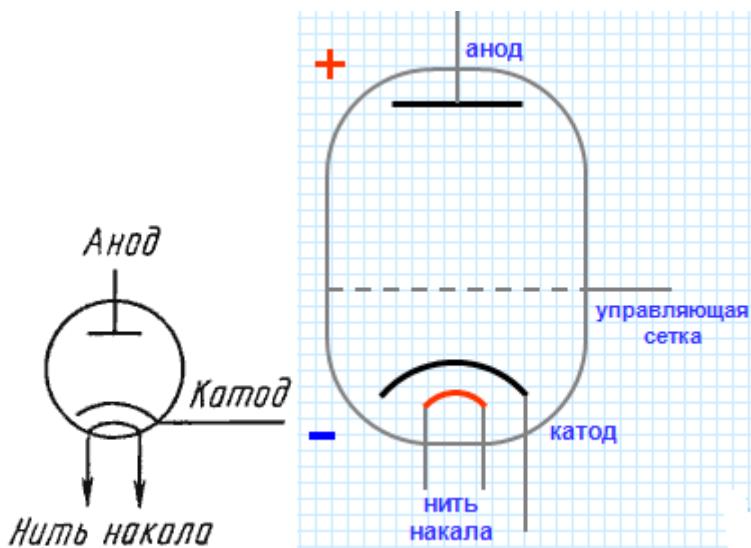
Количество электродов, их форма, размеры и взаимное расположение определяют функциональное назначение, характеристики и название электронных ламп.

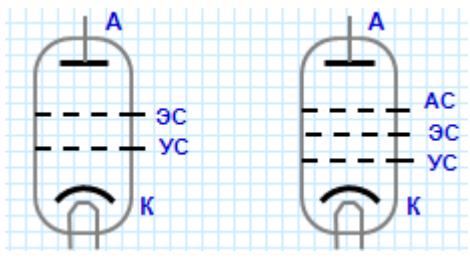
Электронная лампа, имеющая два электрода – анод и катод, называется *диодом*. Триод имеет три электрода: катод, анод и управляющую сетку. Лампа, содержащая четыре электрода, называется *тетродом*, а пять электродов – *пентодом*.

Существуют электронные лампы с большим числом электродов (гептод, октод), а также совмещённые лампы такие как: двойной диод, двойной триод, триод-пентод и другие. Внешний вид некоторых электронных ламп и их условные обозначения на электрических схемах показаны на рис. 1 и рис.2, а отдельные элементы (электроды) пятиэлектродной лампы (пентода) приведены на рис. 3.



Рис. 1. В нижней части (цоколе) в корпус вплавлены электроды, с помощью которых лампа соединяется с электрической схемой.





Тетрод Пентод

А – анод; К – катод; УС – управляющая сетка; ЭС – экранирующая сетка;
АС – защитная сетка.

Рис. 2. Условные обозначения и названия электродов некоторых электронных ламп: диода, триода, тетрода и пентода.

Вакуумные электронные лампы с подогреваемым катодом

В результате термоэлектронной эмиссии (Термоэлектронная эмиссия – явление вырывания электронов из металла при высокой температуре) электроны покидают поверхность катода.

Под воздействием разности потенциалов между анодом (+) и катодом (-) электроны достигают анода и образуют анодный ток во внешней цепи.

С помощью дополнительных электродов (сеток) осуществляется управление электронным потоком путём подачи на эти электроды электрического потенциала.

Катод

Для того чтобы обеспечить эмиссию электронов с катода, его дополнительно подогревают. По способу подогрева катоды подразделяются на катоды прямого и косвенного накала. Металлические катоды (например, в мощных лампах с большой плотностью тока катода) делаются из вольфрама.

Катод прямого накала представляет собой металлическую нить из металла с высоким удельным электрическим сопротивлением. Ток накала проходит непосредственно через катод. Лампы прямого накала потребляют меньшую мощность, быстрее разогреваются, отсутствует проблема обеспечения электрической изоляции между катодом и нитью накала. Но обычно они имеют меньший срок службы, при использовании в сигнальных цепях требуют питания накала постоянным током.

Катод косвенного накала представляет собой цилиндр, внутри которого располагают подогреватель (нить накала), электрически изолированную от катода. Подогреватель приходится раскалять гораздо сильнее, чем прямонакальный катод, поэтому он потребляет большую мощность, лампа выделяет много тепла, требует заметного времени для прогрева (десятка секунд, а то и минуты).

Анод

Положительный электрод. Выполняется иногда в форме пластины, но чаще в форме коробочки окружающей катод и сетки и имеющей форму цилиндра или параллелепипеда.



Анод электронной лампы

Сетка

Между катодом и анодом располагаются сетки, которые служат для управления потоком электронов и устранения побочных явлений, возникающих при движении электронов от катода к аноду. Сетка представляет собой решётку или спираль из тонкой проволоки, навитую вокруг катода на нескольких поддерживающих стойках. В стержневых лампах роль сеток выполняет система из нескольких тонких стержней, параллельных катоду и аноду.

По назначению сетки подразделяются на следующие виды:

- **Управляющая сетка** — небольшое изменение разности потенциалов между управляющей сеткой и катодом приводит к большим изменениям анодного тока лампы, что позволяет усиливать сигнал. Располагается на минимально возможном расстоянии от катода.
- **Экранирующая сетка** — устраниет паразитную ёмкость между управляющей сеткой и анодом, что позволяет увеличить коэффициент усиления. На экранирующую сетку подаётся постоянное напряжение, равное или несколько меньшее анодного.

В зависимости от назначения лампы, она может иметь до семи сеток.

Баллон

Блестящее напыление (геттер), которое можно видеть на стекле большинства электронных ламп, выполняет двойную функцию — адсорбент остаточных газов, а также индикатор вакуума (многие виды геттера белеют при попадании воздуха в лампу в случае нарушения её герметичности).

Для подключения применяются металлические электроды, проходящие через стеклянный корпус лампы.

лампы (пентода). На левом снимке изображены слева-направо: нить накала, катод, три сетки и анод, в верхней части – элементы крепления и кольцо с поглотителем остатков воздуха; на правом снимке – анод электронной лампы.

Принцип работы. Действие электронных ламп основано на явлении термоэлектронной эмиссии и действии электрического поля на движущиеся заряды. Явление, которое используется в электронных лампах для получения электронных потоков, называется термоэлектронной эмиссией. Термоэлектронная эмиссия - это испускание электронов с поверхности нагретого вещества. В этих приборах электроны испускаются катодом, который нагревают, пропуская через него небольшой ток, называемый током накала.

Применение. Все электронные лампы, кроме диода, обладают усилительными свойствами. Они позволяют заметно увеличить амплитуду слабого переменного электрического сигнала (напряжения), подаваемого на управляющую сетку. Поэтому их используют для приёма, усиления и генерации, а также для преобразования электрических колебаний (напряжений). Основное применение вакуумных диодов – выпрямление переменного тока и детектирование электрических колебаний. В настоящее время применение электронных ламп в технике заметно ограничено вследствие повсеместного использования полупроводников приборов (диодов, транзисторов, тиристоров, микросхем) и устройств из других электронных материалов. Однако их все ещё широко применяют для производства мощных высокочастотных генераторов, высококачественной аудиотехники.

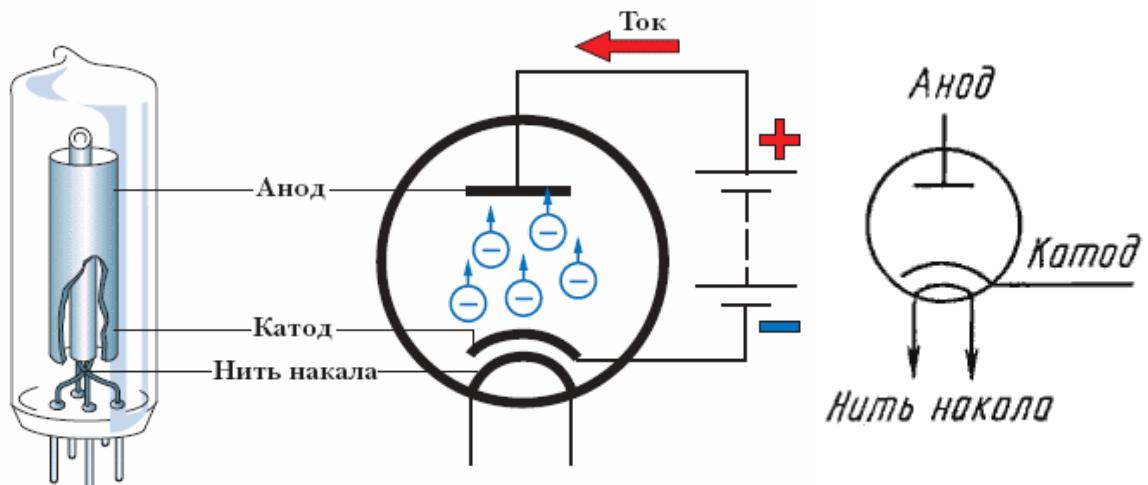


Рис. 4.

Анод имеет один вывод для соединения с цепью, для катода косвенного накала делают два вывода от нити накала и один от катода.

При разогреве катода с помощью тока накала электроны начинают вылетать с его поверхности за счёт термоэлектронной эмиссии. Покинувшие катод электроны будут препятствовать вылету других электронов, в результате чего вокруг катода образуется электронное облако. Часть электронов из этого облака с небольшими скоростями возвращается обратно в катод. При постоянной температуре катода облако стабилизируется, имеет место динамическое

равновесие, при котором на катод падает из облака столько же электронов, сколько их вылетает из него за счёт термоэлектронной эмиссии.

При подаче на катод отрицательного потенциала, а на анод – положительного потенциала между ними возникает электрическое поле, которое заставляет электроны двигаться от катода к аноду, приводя тем самым к появлению в цепи тока (рис.4).

Если же на катод подан положительный потенциал («плюс»), а на анод отрицательный потенциал («минус»), то электрическое поле препятствует движению электронов, которые вылетают из катода и ток в цепи не течёт. Такое включение диода называется обратным, а напряжение между катодом и анодом – обратным напряжением.

В вакуумном диоде ток идёт только в одном направлении – от анода к катоду. При этом электроны, образующие ток, движутся от катода к аноду. Диод обладает односторонней электрической проводимостью.

При неизменном токе накала, то есть при постоянной температуре катода, сила анодного тока I_a зависит от анодного напряжения U_a . При постепенном повышении анодного напряжения сила анодного тока растёт до определённого значения, после чего она остаётся неизменной, несмотря на дальнейшее увеличение анодного напряжения. *Основной характеристикой диода является его анодная характеристика или вольт-амперная характеристика диода, которая показывает зависимость анодного тока диода от анодного напряжения при неизменном напряжении накала.*

Анодная характеристика вакуумного диода показана на рис. 5. Она имеет три участка.

1. *Первый, нелинейный участок.* На начальном участке анодной характеристики ток медленно возрастает при увеличении напряжения на аноде, что объясняется противодействием электрическому полю анода объёмного отрицательного заряда электронного облака.

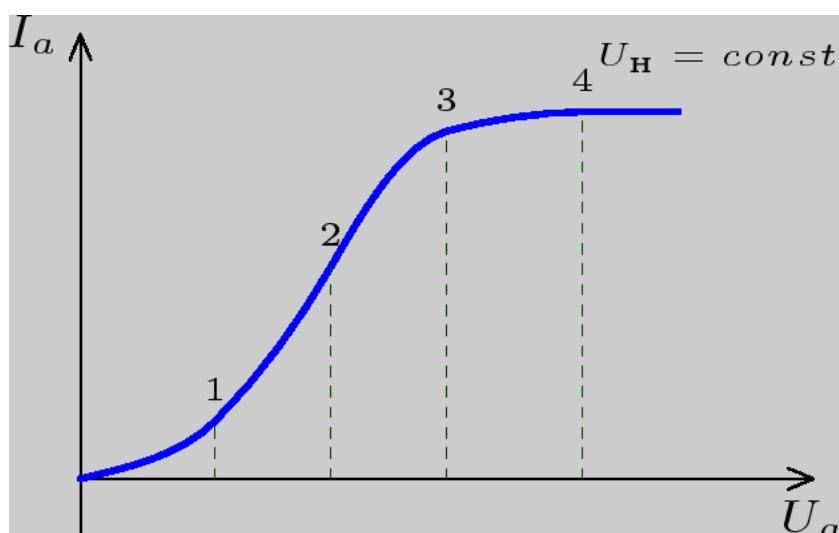


Рис. 5. Анодная характеристика вакуумного диода. I_a – сила анодного тока, U_a – анодное напряжение, то есть напряжение между анодом и катодом, U_n – напряжение накала катода.

При анодном напряжении, равном нулю, вылетевшие из катода электроны образуют вокруг него отрицательный пространственный заряд, называемый электронным облаком, который отталкивает вылетающие из нагретого катода электроны. Большая их часть возвращается на катод и лишь незначительному числу электронов удается долететь до анода. Поэтому даже при анодном напряжении $U_a = 0$ сила анодного тока I_a немногим больше нуля. Для того чтобы уменьшить ток до нуля $I_a = 0$, нужно приложить к аноду небольшое отрицательное напряжение, называемое запирающим. Поэтому вольт-амперная характеристика диода начинается чуть левее начала координат, что обычно не показывают на рисунках (графиках).

С увеличением положительного анодного напряжения увеличивается число электронов, переносимых на анод, и электронное облако около катода постепенно уменьшается. Сила анодного тока растёт с увеличением напряжения экспоненциально, что обусловлено разбросом начальных скоростей вылетевших из катода электронов.

2. Второй участок анодной характеристики описывается законом Ленгмюра – Богуславского или «законом трёх вторых», согласно которому зависимость силы анодного тока от напряжения определяется выражением

$$I = k U^{3/2}$$

Здесь k - постоянная, зависящая от материала, температуры, площади катода и от расстояния между катодом и анодом.

2. Третий участок - участок насыщения. При дальнейшем увеличении напряжения на аноде рост тока замедляется, а затем полностью прекращается, так как все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. Дальнейшее увеличение анодного тока при данной величине тока накала невозможно, поскольку для этого нужны дополнительные электроны, которых нет. Установившейся в этом режиме анодный ток называется током насыщения. **Ток насыщения I_n – это наибольший возможный анодный ток при данной температуре катода, определяемой током накала.**

Этот участок характеристики описывается законом Ричардсона – Дешмана, определяемый формулой (1): $J_n = C \cdot T^2 \cdot \exp(-A/kT)$. Очевидно, что для увеличения тока насыщения необходимо увеличить число электронов, вылетающих за 1 с из катода, то есть нужно повысить температуру катода, увеличив ток накала.

Основные параметры вакуумного диода:

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}$$

- крутизна вольт-амперной (анодной) характеристики равная изменению анодного тока (в мА) при изменении анодного напряжения на 1 В;

$$R_i = \frac{1}{S};$$

- максимально допустимое обратное напряжение. При некотором напряжении, приложенном в обратном направлении происходит пробой диода. Между катодом и анодом проскаивает искра, что сопровождается резким возрастанием силы тока;

- запирающее напряжение — напряжение, необходимое для прекращения тока в диоде;

- максимально допустимая рассеиваемая мощность

Крутизна S_i и дифференциальное сопротивление R_i являются функциями анодного напряжения и температуры катода.

Применение вакуумного диода. Вакуумный диод пропускает ток только в одном направлении. Поэтому его используют в качестве выпрямителя переменного тока, то есть для преобразования электрических колебаний в напряжение постоянной полярности. Диод, действующий как выпрямитель, называют кенотроном.

Схема выпрямителя переменного тока (напряжения) на одном кенотроне показана на рис. 6 (а). График входного переменного напряжения U_{ex} , подводимого к точкам А и Б, приведен на рис. 6 (б). Через кенотрон ток протекает лишь в течение одной половины периода переменного тока, когда ток в диоде направлен от анода к катоду (на аноде — плюс, на катоде — минус). В это время на нагрузочном резисторе R возникает напряжение $U_{вых} = I_a R$, которое изменяется со временем согласно кривой (а) на рис. 7. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — напряжение на резисторе, то есть выходное напряжение. В следующий полупериод ток через диод не протекает и напряжения на резисторе R нет. Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ имеет постоянную полярность, хотя и меняется по величине. Такое напряжение или ток называют пульсирующим, а саму схему — однополупериодным выпрямителем.

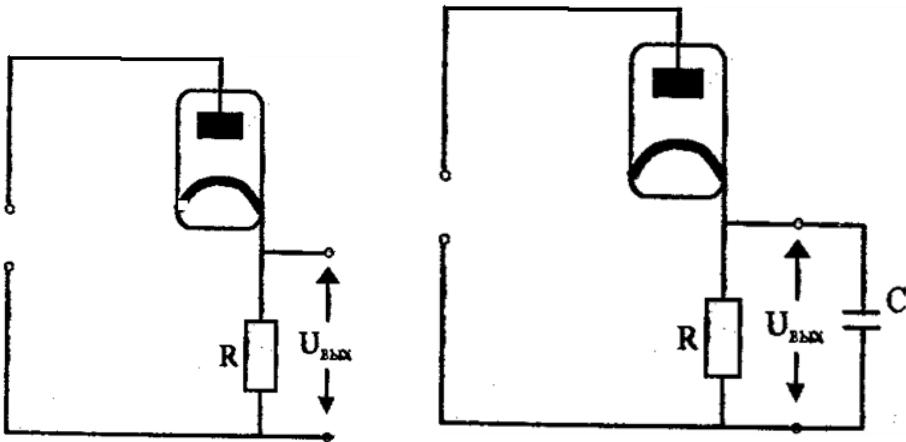


Рис. (а) – схема однополупериодного выпрямителя переменного напряжения на одном кенотроне; (б) – зависимость (график) входного напряжения от времени.

Выполнение работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

| | | | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U_a , В | | | | | | | | |
| I_a , мА | | | | | | | | |

2. Ознакомьтесь с устройством исследуемого диода и зарисуйте его.

Он имеет следующие параметры:

- напряжение накала 5 В,
- ток накала 2 А,
- напряжение анода номинальное (постоянное) – 50 В,
- ток анода номинальный – не менее 300 мА,
- обратное напряжение анода (амплитудное) - 1550 В,
- выпрямленный ток (для каждого диода) – не менее 133 мА,
- напряжение вторичной обмотки трансформатора – 2*400 В.

Катод оксидный косвенного накала. Кенотрон работает в любом положении.

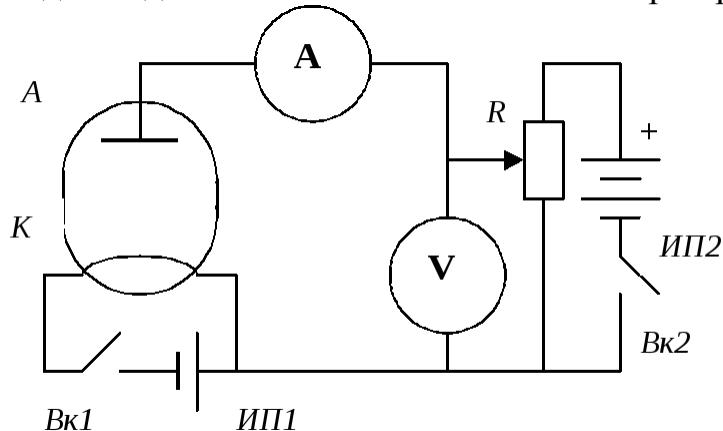


Схема измерения анодной характеристики вакуумного диода.

3. По схеме соберите электрическую цепь. Она состоит из двух цепей: накальной и анодной. Сначала соберите цепь накала. Движок реостата, включённого в цепь накала, поставьте в такое положение, чтобы реостат был полностью выключен. Затем соберите анодную цепь. Ручку потенциометра поставьте на минимум анодного напряжения.

4. После включения источника питания в сеть дайте лампе прогреться в течение 1-2 минут.

5. Снимите анодную характеристику диода при номинальном напряжении накала 5 В. Для этого с помощью потенциометра постепенно увеличивайте анодное напряжение от нуля до 200 В и через каждые 5 - 10 В снимайте показания мультиметра, работающего в режиме вольтметра, и соответствующие им показания силы тока с помощью другого мультиметра, поддерживая при этом неизменным напряжение накала катода. Результаты измерений занесите в таблицу.

6. Закончив измерения, выключите источники питания и по полученным данным постройте анодную характеристику диода. По оси абсцисс откладывайте анодное напряжение U_a в вольтах, по оси ординат – значения силы анодного тока I_a в миллиамперах.

7. По полученному графику определите внутреннее сопротивление диода при напряжениях на аноде 20 В и 80 В.

8. Подобным образом снимите вторую анодную характеристику диода при меньшем напряжении накала (например, при $U_n = 2$ или 3 В). Нужное напряжение накала устанавливается с помощью реостата в цепи накала. Далее, как и в пункте 5, постепенно увеличивайте анодное напряжение и через каждые 5 - 10 В записывайте показания приборов.

9. По полученным данным также постройте вторую анодную характеристику диода.

10. Смените полярность включения диода: анод подключите к минусу, а катод к плюсу источника тока. Увеличивая постепенно напряжение на диоде, проследите за показаниями миллиамперметра. Отметьте, идёт ли ток через диод?

11. Сделайте вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называется термоэлектронной эмиссией? Законы термоэлектронной эмиссии.
2. Что называют электронно-вакуумными приборами или электронными лампами?
3. Катоды прямого и косвенного накала. Их устройство и работа.
4. Вакуумный диод. Устройство, обозначение и принцип действия.
5. Подчиняется ли анодный ток в вакуумном диоде закону Ома? Нарисуйте график анодной характеристики диода.
6. Что называется током насыщения?
7. Определите по анодной характеристике, в каком интервале напряжений ток изменяется наиболее сильно, и в каком наиболее слабо. Как это объяснить?
8. От чего зависит сила тока насыщения вакуумного диода?
9. Как, не изменяя анодное напряжение, можно увеличить силу тока в диоде?
10. Почему при меньшем токе накала анодная характеристика диода располагается ниже, ток насыщения меньше и насыщение наступает при меньшем анодном напряжении?
11. Нарисуйте схему однополупериодного выпрямителя переменного тока на вакуумном диоде, график выпрямленного тока. Объясните работу выпрямителя

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение полупроводникового диода»

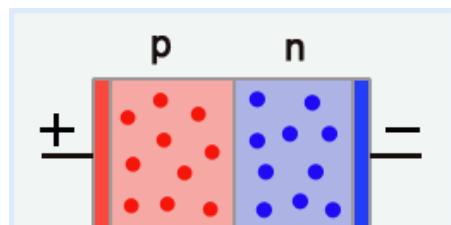
по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение полупроводникового диода.

Цель работы: Изучить устройство и принцип действия полупроводникового диода. Исследовать работу диода на ВА характеристику.

Методическая часть

Диод – это полупроводниковый прибор с одним *p-n*-переходом, имеющий два вывода (анод и катод), и предназначенный для выпрямления и преобразования электрических сигналов. По своему функциональному назначению диоды подразделяются на выпрямительные, универсальные, импульсные, СВЧ-диоды, стабилитроны, варикапы, переключающие, туннельные диоды и т.д. Схематично диод можно представить в виде кристалла состоящего из двух полупроводников (областей). Одна область кристалла обладает проводимостью *p*-типа, а другая — проводимостью *n*-типа.

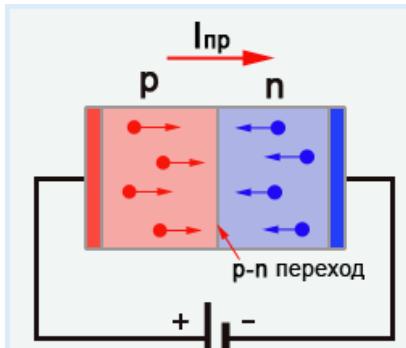


На рисунке дырки, преобладающие в области *p*-типа, а электроны, преобладающие в области *n*-типа. Эти две области являются электродами диода анодом и катодом. Анод – положительный электрод диода, в котором основными носителями заряда являются дырки. Катод – отрицательный электрод диода, в котором основными носителями заряда являются электроны. На внешние поверхности областей нанесены контактные металлические слои, к которым припаяны проволочные выводы электродов диода. Такой прибор может находиться только в одном из двух состояний:

1. Открытое – когда он хорошо проводит ток;
2. Закрытое – когда он плохо проводит ток.

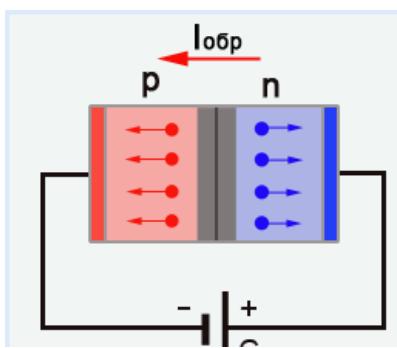
Прямое включение диода. Прямой ток.

Если к электродам диода подключить источник постоянного напряжения: на вывод анода «плюс» а на вывод катода «минус», то диод окажется в открытом состоянии и через него потечет ток, величина которого будет зависеть от приложенного напряжения и свойств диода.



При такой полярности подключения электроны из области n-типа устремляются навстречу дыркам в область p-типа, а дырки из области p-типа двинутся навстречу электронам в область n-типа. На границе раздела областей, называемой электронно-дырочным или p-n переходом, они встречаются, где происходит их взаимное поглощение или рекомбинация. Таким образом, проводимость p-n перехода станет большой и сопротивление току будет мало, а значит, через диод будет течь ток, называемый прямым током диода $I_{\text{пр}}$.

Обратное включение диода. Обратный ток. Поменяем полярность источника постоянного напряжения – диод окажется в закрытом состоянии.



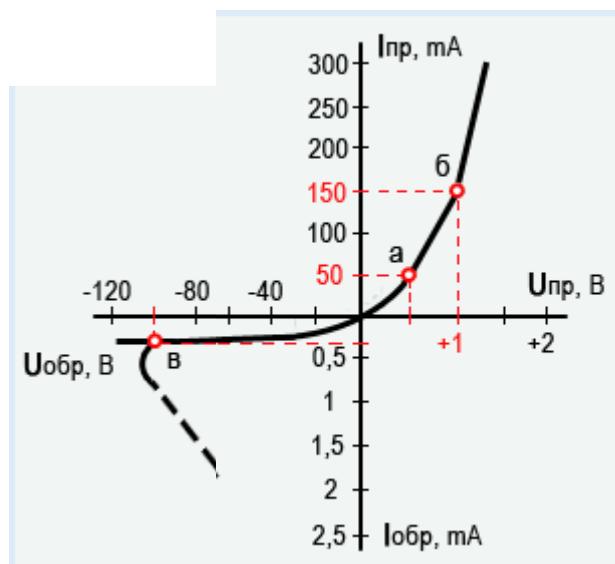
В этом случае электроны в области n-типа станут перемещаться к положительному полюсу источника питания, отдаляясь от p-n перехода, и дырки, в области p-типа, также будут отдаляться от p-n перехода, перемещаясь к отрицательному полюсу источника питания. В результате граница областей как бы расширится, отчего образуется зона обедненная дырками и электронами, которая будет оказывать току большое сопротивление. Но, так как в каждой из областей диода присутствуют неосновные носители заряда, то небольшой обмен электронами и дырками между областями происходит все же будет. Поэтому через диод будет протекать ток во много раз меньший, чем прямой, и такой ток называют обратным током диода ($I_{\text{обр}}$). Вывод, что p-n переход обладает только односторонней проводимостью.

Прямое и обратное напряжение диода.

Напряжение, при котором диод открывается и через него идет прямой ток называют прямым ($U_{\text{пр}}$), а напряжение обратной полярности, при котором диод закрывается и через него идет обратный ток называют обратным ($U_{\text{обр}}$). При прямом напряжении ($U_{\text{пр}}$) сопротивление диода не превышает и нескольких десятков Ом, зато при обратном напряжении ($U_{\text{обр}}$) сопротивление возрастает до нескольких десятков, сотен и даже тысяч кОм. Сопротивление р-п перехода диода величина не постоянная и зависит от прямого напряжения ($U_{\text{пр}}$), которое подается на диод. Чем больше это напряжение, тем меньшее сопротивление оказывает р-п переход, тем больший прямой ток $I_{\text{пр}}$ течет через диод.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.

Зависимость тока, проходящего через р-п переход, от величины и полярности приложенного к нему напряжения изображают в виде кривой, называемой вольт-амперной характеристикой диода. Вольт-амперная характеристика состоит как бы из двух ветвей: прямая ветвь, в правой верхней части, соответствует прямому (пропускному) току через диод, и обратная ветвь, в левой нижней части, соответствующая обратному (закрытому) току через диод.

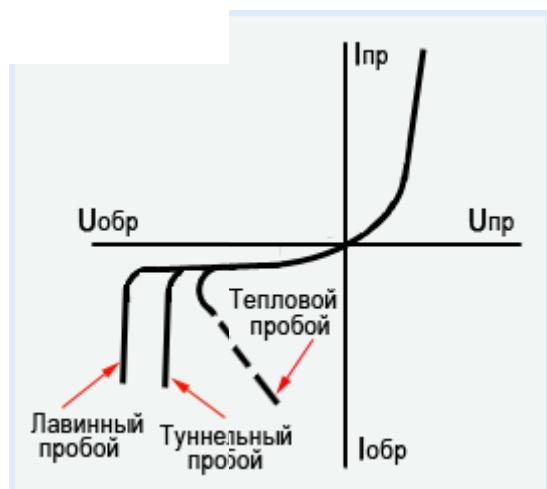


При увеличении прямого напряжения через р-п переход ток вначале возрастает медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания тока. Это объясняется тем, что германиевый диод открывается и начинает проводить ток при прямом напряжении $0,1 - 0,2$ В, а кремниевый при $0,5 - 0,6$ В. Но такое увеличение тока приводит к нагреванию молекулы полупроводника. И если количество выделяемого тепла будет больше отводимого от кристалла естественным путем, либо с помощью специальных устройств охлаждения (радиаторы), то в молекуле проводника могут произойти необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки. Поэтому прямой ток р-п перехода ограничивают на уровне, исключающем перегрев полупроводниковой структуры. Для этого используют ограничительный резистор, включенный последовательно с диодом.

У полупроводниковых диодов величина прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ при всех значениях рабочих токов не превышает: для германиевых — 1 В; для кремниевых — 1,5 В. При увеличении обратного напряжения ($U_{\text{обр}}$), приложенного к р-п переходу, ток увеличивается незначительно, о чем говорит обратная ветвь вольтамперной характеристики. При постепенном увеличении обратного напряжения до значения 100 В видно, как незначительно растет обратный ток (точка «в» на графике). Но при дальнейшем увеличении напряжения, выше максимального, на которое рассчитан р-п переход диода, происходит резкое увеличение обратного тока (пунктирная линия), нагрев кристалла полупроводника и, как следствие, наступает пробой р-п перехода.

Пробой р-п перехода.

Пробоем *r-p* перехода называется явление резкого увеличения обратного тока при достижении обратным напряжением определенного критического значения. Различают электрический и тепловой пробой *r-p* перехода. Электрический пробой разделяется на туннельный и лавинный пробоем.



Электрический пробой. Электрический пробой возникает в результате воздействия сильного электрического поля в *r-p* переходе. Такой пробой является обратимый, то есть он не приводит к повреждению перехода, и при снижении обратного напряжения свойства диода сохраняются. В таком режиме работают стабилитроны — диоды, предназначенные для стабилизации напряжения.

Туннельный пробой. Туннельный пробой происходит в результате явления туннельного эффекта, который проявляется в том, что при сильной напряженности электрического поля, действующего в *r-p* переходе малой толщины, некоторые электроны проникают (просачиваются) через переход из области р-типа в область *n*-типа без изменения своей энергии. Тонкие *r-p* переходы возможны только при высокой концентрации примесей в молекуле полупроводника. Для туннельного пробоя характерен резкий рост обратного тока при незначительном обратном напряжении — обычно несколько вольт. На основе этого эффекта работают туннельные диоды.

Лавинный пробой. Лавинный пробой заключается в том, что под действием сильного электрического поля неосновные носители зарядов под действием тепла в p-n переходе ускоряются настолько, что способны выбить из атома один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару электрон — дырка. Образовавшиеся носители зарядов тоже начнут разгоняться и сталкиваться с другими атомами, образуя следующие пары электрон — дырка. Процесс приобретает лавинообразный характер, что приводит к резкому увеличению обратного тока при практически неизменном напряжении.

Тепловой пробой. Тепловой пробой возникает в результате перегрева p-n перехода в момент протекания через него тока большого значения и при недостаточном теплоотводе, не обеспечивающем устойчивость теплового режима перехода.

Устройство и работа выпрямительных диодов.



Общие характеристики выпрямительных диодов.

В зависимости от значения максимально допустимого прямого тока выпрямительные диоды разделяются на диоды малой, средней и большой мощности:

малой мощности рассчитаны для выпрямления прямого тока до 300mA;
средней мощности – от 300mA до 10A;
большой мощности — более 10A.

По типу применяемого материала они делятся на германиевые и кремниевые, но, на сегодняшний день наибольшее применение получили кремниевые выпрямительные диоды ввиду своих физических свойств. Кремниевые диоды, по сравнению с германиевыми, имеют во много раз меньшие обратные токи при одинаковом напряжении, что позволяет получать диоды с очень высокой величиной допустимого обратного напряжения, которое может достигать 1000 – 1500В, тогда как у германиевых диодов оно находится в пределах 100 – 400В.

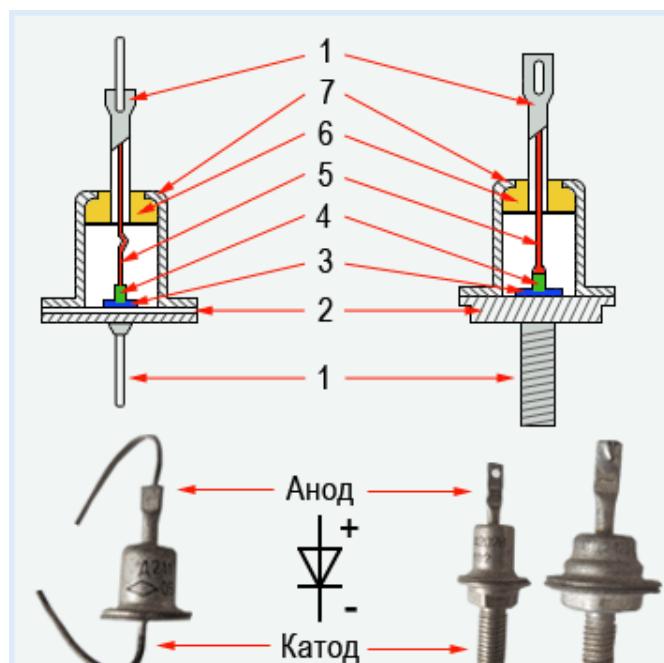
Технология изготовления и конструкция выпрямительных диодов.

Конструкция выпрямительных диодов представляет собой одну пластину кристалла полупроводника, в объеме которой созданы две области разной проводимости, поэтому такие диоды называют плоскостными. Под действием высокой температуры эти вещества крепко сплавляются с кристаллом полупроводника. При этом атомы этих веществ проникают (диффундируют) в толщу кристалла, образуя в нем область с преобладанием электронной или дырочной электропроводностью. Таким образом, получается полупроводниковый прибор с двумя областями различного типа электропроводности — а между ними *p-n* переходом. Большинство распространенных плоскостных кремниевых и германиевых диодов изготавливают именно таким способом. Для защиты от внешних воздействий и обеспечения надежного теплоотвода кристалл с *p-n* переходом монтируют в корпусе.

Диоды малой мощности изготавливают в пластмассовом корпусе с гибкими внешними выводами, диоды средней мощности — в металлокерамическом корпусе с жесткими внешними выводами, а диоды большой мощности — в металлокерамическом или металлокерамическом корпусе, т.е. со стеклянным или керамическим изолятором.

Кристаллы кремния или германия (3) с *p-n* переходом (4) припаиваются к кристаллодержателю (2), являющемуся одновременно основанием корпуса. К кристаллодержателю приваривается корпус (7) со стеклянным изолятором (6), через который проходит вывод одного из электродов (5).

Маломощные диоды, обладающие относительно малыми габаритами и весом, имеют гибкие выводы (1) с помощью которых они монтируются в схемах.



Конструкция ряда маломощных кремниевых диодов практически не отличается от конструкции маломощных германиевых диодов. Кристаллы мощных

выпрямительных диодов монтируются в массивном корпусе, который имеет стержень с резьбой для крепления диода на радиаторе, для отвода выделяющегося при работе прибора тепла.

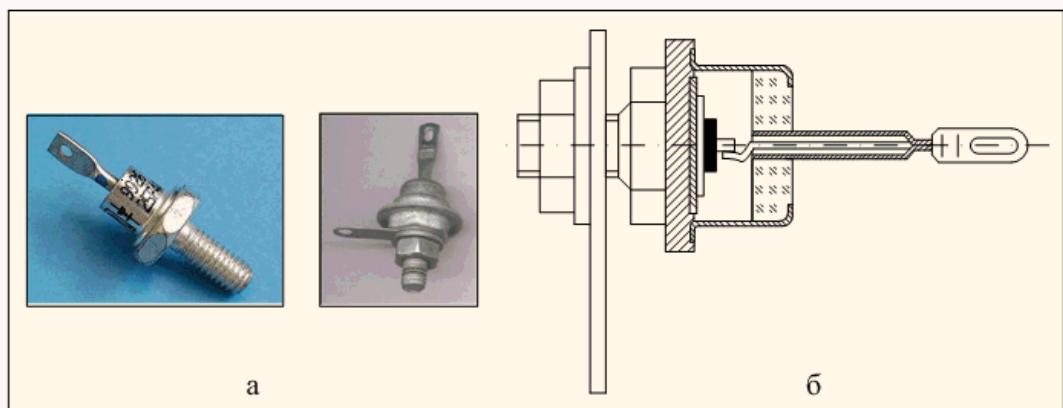
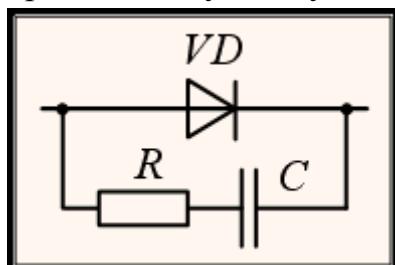


Рис. Общий вид (а) и конструкция (б) мощного кремниевого выпрямительного диода. Для получения *p-n*-переходов кремниевых выпрямительных диодов вплавляют алюминий в кристалл кремния *n*-типа или же сплава золота с сурьмой в кремний *p*-типа. Для получения переходов также используют диффузионные методы.

Для защиты силовых диодов, их шунтируют защитной цепочкой (рис. 9), причём ёмкость выбирают больше величины собственной ёмкости *p-n*-перехода. Тогда импульс обратного тока, в основном, будет проходить по защитной цепочке, не принося вреда самому диоду.



Способ уменьшения скорости нарастания обратного напряжения

Порядок выполнения работы:

- 1) Собрать для исследования диода VD1 схему.

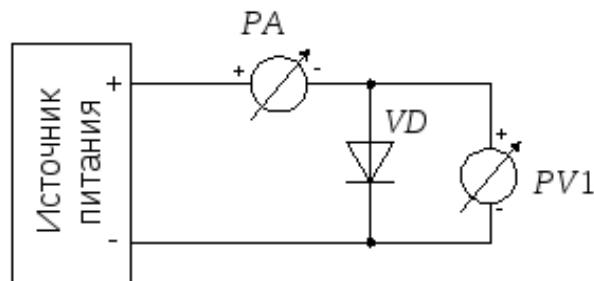


Схема для исследования прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение $U_{\text{вых.}}=0$, предел измерения вольтметра PV1 – 0,75В, а миллиамперметра PA1 – 0,1mA. Включить тумблером питание макета. Провести измерения вольтамперной характеристики открытого диода VD1. Для этого, увеличивая вращением ручки регулятора вправо напряжение на диоде, измерить его при достижении прямым током значений 0,1mA; 0,3mA; 1mA; 10mA; 30mA; 50mA; 80mA и 100mA. Занести полученные данные в таблицу:

| | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|-----|---|----|----|----|----|-----|
| $U_{\text{пр.}}, \text{В}$ | | | | | | | | |
| $I_{\text{пр.}}, \text{A}$ | 0,1 | 0,3 | 1 | 10 | 30 | 50 | 80 | 100 |

Провести аналогичные измерения для диодов VD2 – VD4.

Для ускорения процедуры измерений, пользуясь тем, что прямые падения напряжений на диодах при одном и том же токе отличаются незначительно, можно после проведения очередного измерения для диода VD1, не меняя положение ручки регулятора напряжения подключить к измерительной схеме диод VD2. Затем подключить диод VD3 и т.д.

2.2. Исследование обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

Цель исследования – определение зависимости обратного тока через диод от величины приложенного напряжения.

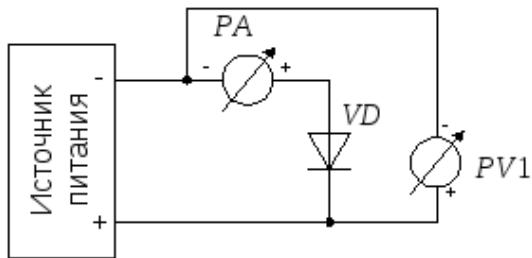


Рис. Схема для исследования обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

Собрать для исследования диода VD1 схему, приведенную на рис. Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение, предел измерения вольтметра PV1 – 3В, а миллиамперметра PA1 – 0,1mA. Включить питание макета.

Снять зависимость обратного тока через диод от величины запирающего напряжения. Для этого, устанавливая напряжения источника питания 0В, 1В, 3В, 6В, 9В, 12В, 15В, 21В и 27 В, зафиксировать по PA1 значения обратных токов и занести полученные данные в таблицу:

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| $U_{\text{пр.}}, \text{В}$ | 0 | 1 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 21 | 27 |
| $I_{\text{пр.}}, \text{А}$ | | | | | | | | | |

Провести аналогичные измерения для диодов VD2-VD3. Подключение исследуемых диодов проводить при обесточенном стенде.

Для диода Шотки (VD4) пробой перехода металл-полупроводник наступает при обратном напряжении порядка 20-25В. Наличие в источнике питания встроенного ограничительного резистора не позволяет перерастя электрическому пробою в тепловой. В режиме пробоя VD4 при увеличении напряжения источника питания напряжение на диоде сохраняется практически неизменным, будет возрастать лишь ток через него. В этой области необходимо провести измерения четырех-пяти значений обратного тока и соответствующих им величин обратного напряжения.

Обработка экспериментальных результатов пунктов 2.1 и 2.2.

Для каждого из диодов построить полную вольтамперную характеристику (совместно прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета.
3. Предварительный расчет.
4. Принципиальную схему лабораторной установки.
5. Построить график по измеренным значениям.
6. Вольтметр рассчитан до значения 3В. Почему нет возможности построить график при обратном включении?
7. Выписать из таблицы характеристики исследуемого диода
8. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
9. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
10. Краткие выводы по результатам расчета и эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Свойства $p-n$ -перехода, потенциальный барьер.
2. Виды полупроводниковых диодов, назначение, область применения, основные параметры и характеристики.
3. В чем особенность диодов Шотки, их достоинства и область применения.
4. В чем отличие идеальной ВАХ полупроводникового диода от реальной?
5. Сравнить ВАХ германиевого и кремниевого полупроводникового диода, сопоставить с полученными экспериментальными данными.
6. Что называют прямым включением диода?
7. Какой ток протекает через диод при его обратном включении, и чем он вызван?
8. Какое явление называется пробоем диода? Виды пробоя.

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение полупроводникового транзистора»

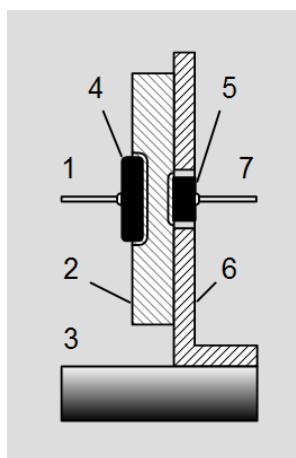
по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение полупроводникового транзистора.

Цель работы: Изучить устройство и принцип действия полупроводникового транзистора. Изучить работу диода на ВА характеристике.

Методическая часть

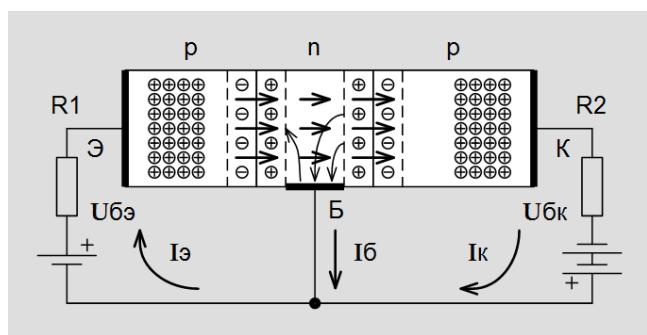
Для изготовления дискретного биполярного транзистора необходим полупроводник электронного или дырочного типов проводимости, именуемый, как и вывод от него, базой, который, например, методом сплавления или диффузии легируют акцепторными примесями так, чтобы по обе стороны от базы были выполнены зоны с противоположными типами проводимостей.



1 – коллектор; 2 – база транзистора, образованная кристаллом германия или кремния; 3 – основание компонента; 4, 5 – вплавленные в кристалл примеси индия или алюминия; 6 – кристаллодержатель; 7 – эмиттер.

Кристалл полупроводника, образующий базу транзистора, в данном случае механически прикреплён и электрически соединён с металлической пластинкой, приваренной к стенке компонента. Толщина базы обычно не превышает нескольких микрон. Между базой и коллектором лежит коллекторный переход, а между базой и эмиттером – эмиттерный переход. В области базы транзистора концентрация носителей заряда чрезвычайно низка, а, следовательно, её проводимость очень мала. В области коллектора концентрация и проводимость намного больше, чем в области базы, а в области эмиттера несколько выше, чем в области коллектора. Таким образом, концентрации носителей зарядов в областях транзисторов существенно отличаются.

Принцип действия биполярных транзисторов



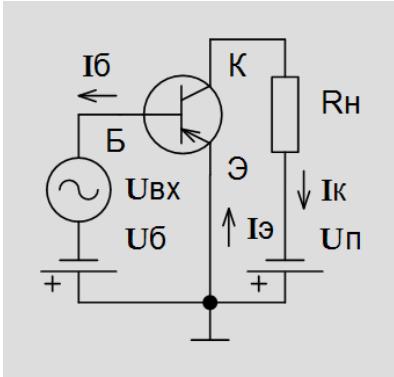
На рисунке знаком плюс, обведённого в кружок, показаны дырки, а знаком обведённого в кружок минуса – электроны. В связи с тем, что в работе компонента участвуют и электроны, и дырки, такой транзистор именуют биполярным. Благодаря включению двух источников питания переход база-коллектор закрыт, а переход база-эмиттер открыт.

Из-за этого по переходу база-эмиттер будет течь эмиттерный ток, порождённый движением преимущественно электронов. Он течёт по цепи от положительного полюса источника питания база-эмиттер, по резистору R1, от области эмиттера транзистора к области базы, а затем к отрицательному полюсу этого же источника питания. Резистор R1 символизирует внутреннее сопротивление источника сигнала. Направление протекания тока символически стрелками отражено на рисунке. В данном случае он равен отношению тока эмиттера, вызванного движением только основных носителей заряда, к полному току эмиттера, обусловленному миграцией и дырок, и электронов. Поле коллекторного перехода является ускоряющим для попавших в область базы носителей зарядов, и это поле их втягивает в коллекторный переход. Происходит их рекомбинация с основными носителями заряда области базы. Однако она незначительна в связи с тем, что толщина области базы много меньше, чем двух других областей, и электроны почти беспрепятственно преодолевают область базы и оказываются в области коллектора, в которой они вновь станут основными носителями заряда. Успевшие рекомбинировать электроны вызывают протекание небольшого тока через вывод базы транзистора, который называют рекомбинационным. Рекомбинация некоторого количества носителей заряда в области базы происходит постоянно до тех пор, пока каскад не будет обесточен, так как электроны будут всё время поступать от положительного полюса источника питания база-эмиттер. Обогащение области коллектора носителями заряда, которые в ней будут основными, приводит к протеканию коллекторного тока транзистора. Он течёт по цепи от положительного полюса источника питания база-коллектор, по области базы, затем по области коллектора, по нагрузочному резистору R2, к отрицательному полюсу источника питания. Очевидно, что даже незначительное изменение напряжения база-эмиттер вызывает существенно большее изменение напряжения база-коллектор и, отдавая небольшую мощность управляющего сигнала, поданного на базу транзистора, можно управлять многократно большей мощностью нагрузки. Следовательно, рассматриваемый каскад может осуществить усиление сигнала по напряжению.

Схемы включения биполярных транзисторов

Схема включения транзистора с общим эмиттером

Между базой и эмиттером транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, подсоединяют источник сигнала, а к коллектору – нагрузку. К эмиттеру транзистора подключают полюсы одинаковых знаков источников питания. Входным током каскада выступает ток базы транзистора, а выходным током – ток коллектора. Это показано на рис., на примере включения в электрическую цепь биполярного p-n-p транзистора.

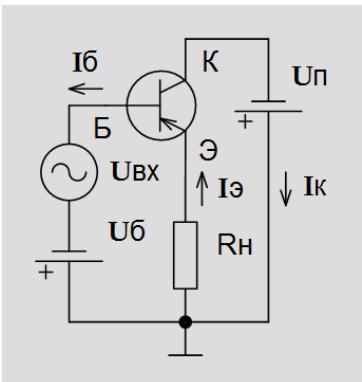


На практике обходятся одним источником питания, а не двумя. Направление протекания тока по выводам транзистора дано на рисунке. Включение п-р-п транзистора совершенно аналогично включению р-п-р транзистора, однако в данном случае придётся поменять полярность обоих источников питания. Коэффициент усиления каскада равен отношению тока коллектора к току базы и обычно может достигать от десятков до нескольких сотен.

Транзистор, включённый по схеме с общим эмиттером, теоретически может дать максимальное усиление сигнала по мощности, относительно других вариантов включения транзистора. Входное сопротивление рассматриваемого каскада, равное отношению напряжения база-эмиттер к току базы, лежит в пределах от сотен до тысяч Ом.

Схема включения транзистора с общим коллектором

К эмиттеру транзистора, включённого по схеме с общим коллектором, подсоединяют нагрузку, на базу подают входной сигнал. Входным током каскада является ток базы транзистора, а выходным током – ток эмиттера.

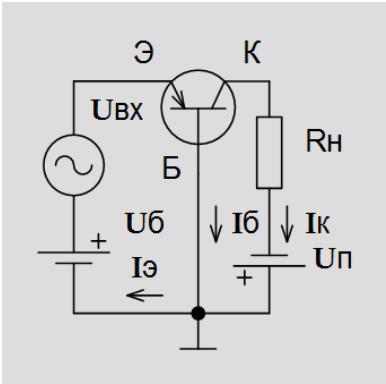


С нагрузочного резистора, включённого последовательно с выводом эмиттера, снимают выходной сигнал. Вход каскада обладает высоким сопротивлением, обычно от десятых долей мегаома до нескольких мегаом из-за того, что коллекторный переход транзистора заперт. А выходное сопротивление каскада – напротив, мало, что позволяет использовать такие каскады для согласования предшествующего каскада с нагрузкой. Каскад с транзистором, включённым по схеме с общим коллектором, не усиливает напряжение, но усиливает ток (обычно в 10 ... 100 раз). Фаза входного напряжения сигнала, подаваемого на каскад, совпадает с фазой выходного напряжения, т.е. отсутствует его инверсия. Именно из-за сохранения фазы входного и выходного сигнала каскад с общим коллектором носит другое название – эмиттерного повторителя. Температурные и частотные свойства эмиттерного повторителя хуже, чем у каскада, в котором транзистор подключен по схеме с общей базой.

Каскад с общим коллектором, не усиливая напряжение, усиливает ток (обычно в 10 ... 100 раз). Фаза входного напряжения сигнала, подаваемого на каскад, совпадает с фазой выходного напряжения, т.е. отсутствует его инверсия. Именно из-за сохранения фазы входного и выходного сигнала каскад с общим коллектором носит другое название – эмиттерного повторителя. Температурные и частотные свойства эмиттерного повторителя хуже, чем у каскада, в котором транзистор подключен по схеме с общей базой.

Схема включения транзистора с общей базой

В каскаде, собранном по схеме с общей базой, напряжение входного сигнала подают между эмиттером и базой транзистора, а выходное напряжение снимают с выводов коллектор-база.



Коэффициент усиления каскада по напряжению часто достигает от десятков до нескольких сотен раз. К достоинствам нужно отнести возможность функционирования каскада на существенно более высокой частоте по сравнению с двумя другими вариантами включения транзистора, и слабое влияние на работу каскада изменений температуры. Именно поэтому каскады с транзисторами, включёнными по схеме с общей базой, часто используют для усиления высокочастотных сигналов.

Влияние температуры на режимы работы биполярных транзисторов

Чтобы германиевый транзистор не вышел из строя, температура его кристалла должна быть меньше примерно 70°C , кремниевого транзистора – меньше $125\ldots150^{\circ}\text{C}$, а арсенид-галлиевого транзистора – меньше $150\ldots200^{\circ}\text{C}$. Введение легирующих добавок несколько корректирует максимально допустимую температуру кристалла, а некоторые специально сконструированные транзисторы выдерживают и более высокую температуру. Так, согласно справочным данным, кремниевый биполярный транзистор КТ921В был разработан для применения в геофизической аппаратуре при температуре корпуса компонента не более $+200^{\circ}\text{C}$. При существенно более высокой температуре транзистора он испортится из-за необратимой перестройки кристаллической решётки. Нагрев биполярных транзисторов вызывает увеличения проводимости области базы и обратного тока коллектора. При повышении температуры корпуса транзистора от 20°C до 60°C обратный ток коллектора обычно может возрасти до шести раз. Следовательно, изменения температуры оказывают очень существенное влияние на функционирование транзисторного каскада, вызывая значительные изменения режима его работы.

Выполнение практической работы

1. Начертить схему для исследования транзистора при включении с общей базой (в схеме подключить приборы для измерения тока и напряжения на вход и выход).
2. Начертить семейство входных характеристик $I_{\text{E}} = f(U_{\text{E}})$ для нескольких напряжений коллектора по данным в таблице № 1.

3. Начертить семейство выходных характеристик $I_k = f(U_k)$ для нескольких токов эмиттера по данным в таблице № 2.
4. Начертить семейство передаточных характеристик $I_k = f(I_\beta)$ по данным таблицы № 3.
5. Начертить семейство характеристик обратной связи по напряжению $U_\beta = f(U_k)$ для нескольких I_β по данным таблицы № 4.
6. Начертить схему для исследования транзистора при включении общим эмиттером (в схеме подключить приборы для измерения тока и напряжения на вход и выход).
7. Начертить семейство входных характеристик $I_\beta = f(U_\beta)$ для нескольких напряжений коллектора по данным в таблице № 5.
8. Начертить семейство выходных характеристик $I_k = f(U_k)$ для нескольких токов базы по данным в таблице № 6.
9. Начертить семейство передаточных характеристик $I_k = f(I_\beta)$ для нескольких U_k по данным таблицы № 7.
10. Начертить семейство характеристик обратной связи по напряжению $U_\beta = f(U_k)$ для нескольких I_β по данным таблицы № 8.

Таблица № 1.

| | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|---|---|
| I_β , мА | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 2 | 6 |
| U_β , В | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Таблица № 2.

| | | | | | |
|------------|---|---|----|-----|-----|
| I_k , мА | 2 | 5 | 6 | 6,5 | 6,8 |
| U_k , В | 3 | 6 | 12 | 15 | 18 |

Таблица № 3.

| | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I_k , мА | 2 | 5 | 6 | 6,5 | 6,8 |
| I_β , мА | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 2 | 6 |

Таблица № 4.

| | | | | | |
|--------------------|---|---|----|----|----|
| U _Э , В | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| U _К , В | 3 | 6 | 12 | 15 | 18 |

Таблица № 5.

| | | | | | |
|----------------------|---|---|---|---|----|
| I _Б , мкА | 2 | 3 | 4 | 8 | 15 |
| U _Б , В | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Таблица № 6.

| | | | | | |
|---------------------|---|----|----|----|----|
| I _К , мА | 4 | 8 | 10 | 11 | 12 |
| U _К , В | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

Таблица № 7.

| | | | | | |
|----------------------|---|---|----|----|----|
| I _К , мА | 4 | 8 | 10 | 11 | 12 |
| I _Б , мкА | 2 | 3 | 4 | 8 | 15 |

Таблица № 8.

| | | | | | |
|--------------------|---|----|----|----|----|
| U _Б , В | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| U _К , В | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

Собрать схему, содержащую:

- а) источник питания;
- б) транзистор типа П13;
- в) вольтметр постоянного тока 0,5 В;
- г) вольтметр постоянного тока 12 В;
- д) миллиамперметр постоянного тока 1 мА;
- е) миллиамперметр постоянного тока 50 мА.

Содержание работы:

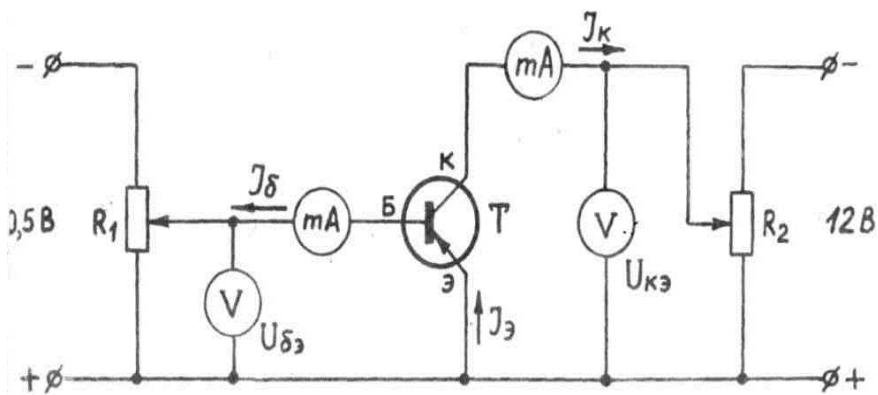
Полупроводниковым транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, разделяющими полупроводники с разным характером примесной проводимости: *n-p* или *p-n*-типа, где *n*-область с электронной проводимостью, *p*-область с дырочной проводимостью.

Смежные области, отделенные друг от друга $p-n$ -переходами, называются эмиттер Э, база Б и коллектор К.

Наиболее распространённым является транзистор типа $p-n-p$, у которого база (средняя область) обладает электронной проводимостью. Возможны три основные схемы включения транзистора: с общей базой ОБ, с общим эмиттером ОЭ и общим коллектором ОК.

Наибольшее распространение имеет схема с общим эмиттером ОЭ, как наиболее выгодная.

Схема соединения:



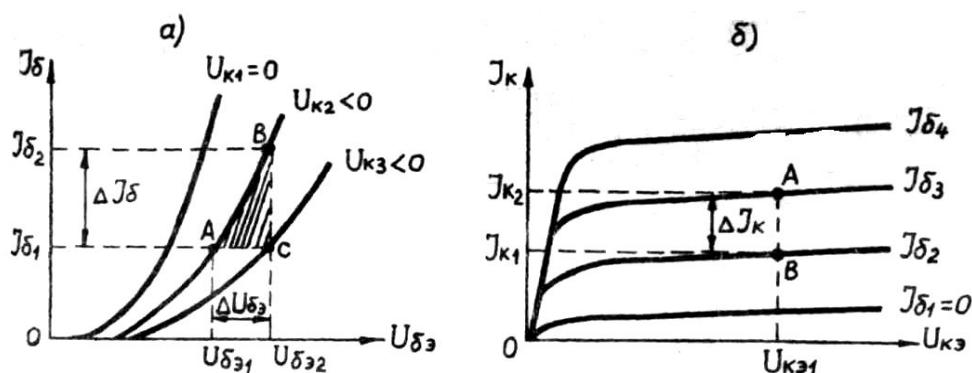
В схеме с ОЭ входным током является ток базы I_b , а выходным — ток коллектора I_c . Ток эмиттера равен сумме токов I_b и I_c : $I_e = I_b + I_c$. Зависимости между током и напряжением входной и выходной цепях транзистора определяются его входными и выходными статическими характеристиками.

Входная характеристика представляет собой зависимость тока базы I_b от напряжения между базой и эмиттером U_{be} при напряжении $U_{ce}=\text{const}$ $I_b=f(U_{be})$ при $U_{ce}=\text{const}$.

Выходной характеристика представляет собой зависимость тока коллектора I_c от напряжения между коллектором и эмиттером U_{ce} при токе базы $I_b=\text{const}$.

$$I_c=f(U_{ce}) \text{ при } I_b=\text{const.}$$

Входные (а) и выходные (б) статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ имеют вид:



По характеристикам транзистора определяются его параметры:

a) Входное сопротивление транзистора R_{bx} :

$$R_{bx} = \frac{\Delta U_{\delta_2}}{\Delta I_{\delta}} = \frac{U_{\delta_2} - U_{\delta_1}}{I_{\delta_2} - I_{\delta_1}} \quad \text{при} \quad U_{\kappa_2} = \text{const}$$

$$R_{bx} = h_{11}$$

б) коэффициент усиления по току β :

$$\beta = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} = \frac{I_{\kappa_2} - I_{\kappa_1}}{I_{\delta_2} - I_{\delta_1}}$$

при $U_{\kappa_1} = \text{const}$; $\beta = h_{21}$

Коэффициент усиления по току α этого транзистора, включенного по схеме с ОБ, определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с макетом и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные в таблицу.

Таблица:

| № п/п | Наименование | Номинальные значения или пределы измерений | Цена деления | Класс точности |
|-------|--------------|--|--------------|----------------|
| | | | | |

Контрольные вопросы:

1. Какова разница влияния температур на характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ и с ОБ?
2. Почему растет ток коллектора при увеличении напряжения между коллектором и эмиттером в схеме с ОЭ?
3. Как влияет ток базы на выходные характеристики в схеме с ОЭ?

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Определение параметров транзистора по вольт-амперным характеристикам»

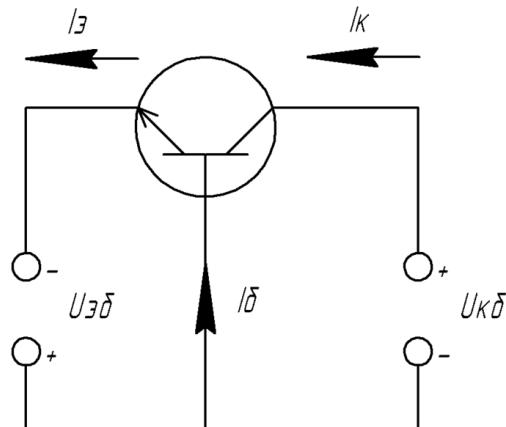
по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Определение параметров транзистора по вольт-амперным характеристикам.

Цель работы: Изучить принцип расчета усилителей.

Методические материалы

Схема включения с общей базой

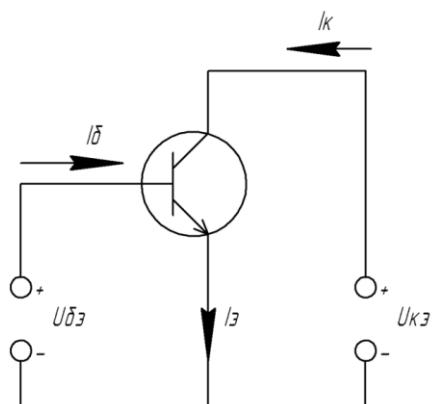


Среди всех трех конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Коэффициент усиления по току: $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_c/I_e = \alpha$ [$\alpha < 1$].

Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{e\delta}/I_e$.

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и не превышает 100 Ом для маломощных транзисторов, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Схема включения с общим эмиттером

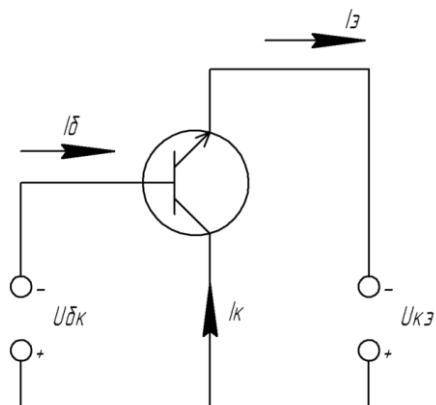


$$I_{\text{вых}} = I_c \\ U_{\text{вх}} = U_{e\delta} \\ I_{\text{вх}} = I_b \\ U_{\text{вых}} = U_{c\epsilon}$$

Коэффициент усиления по току: $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_k/I_6 = I_k/(I_\beta - I_k) = \alpha/(1-\alpha) = \beta$ [$\beta \gg 1$].

Входное сопротивление: $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}/I_6$.

Схема с общим коллектором



$$I_{\text{вых}} = I_\beta \quad I_{\text{вх}} = I_6$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}} \quad U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$$

Коэффициент усиления по току: $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_\beta/I_6 = I_\beta/(I_\beta - I_k) = 1/(1-\alpha) = \beta$ [$\beta \gg 1$].

Входное сопротивление: $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = (U_{\text{бк}} + U_{\text{кэ}})/I_6$.

ЗАДАНИЕ 1.

Начертить схему однокаскадного низкочастотного усилителя по данным варианта.

ЗАДАНИЕ 2.

Начертить входные и выходные характеристики. Отметить на характеристиках входной и выходной токи. Показать рабочие точки А и В, отметить приращения для расчета коэффициентов.

ЗАДАНИЕ 3.

По схеме однокаскадного низкочастотного усилителя рассчитать коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_u , мощности K_p , а также входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления.

По представленному типу транзистора и данным параметрам: h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} , R_h , R_g определяются:

1) Коэффициент усиления по току $K_i = h_{21} / (1 + h_{22} \cdot R_h)$

2) Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = h_{21} \cdot R_h / (h_{11} (1 + h_{22} \cdot R_h) - h_{12} \cdot h_{21} \cdot R_h) =$$

3) Коэффициент усиления по мощности $K_p = K_i \cdot K_u$

4) Входное сопротивление усилителя

$$R_{bx} = (h_{11}(h_{22} + 1/R_h) - h_{12} \cdot h_{21}) / (h_{22} + 1/R_h)$$

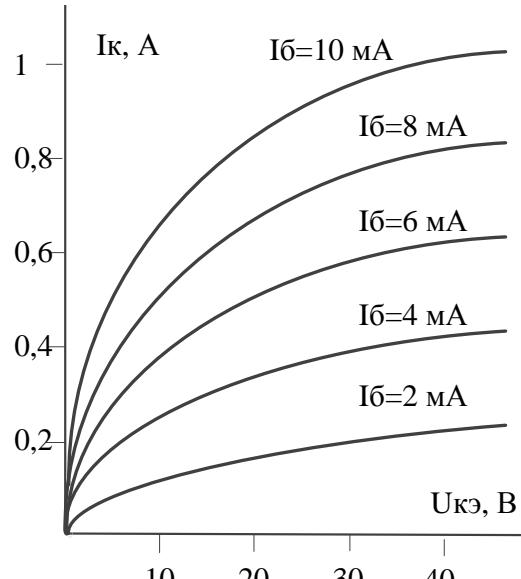
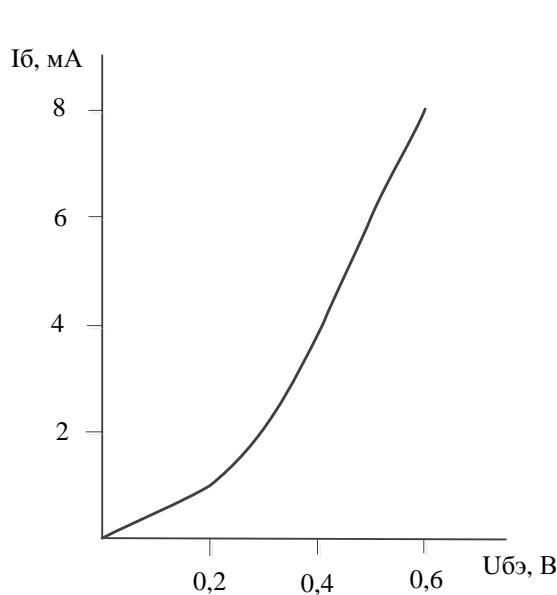
5) Выходное сопротивление усилителя

$$R_{vых} = (h_{11} + R_f) / (h_{22}(h_{11} + R_f) - h_{12} \cdot h_{21})$$

Варианты заданий

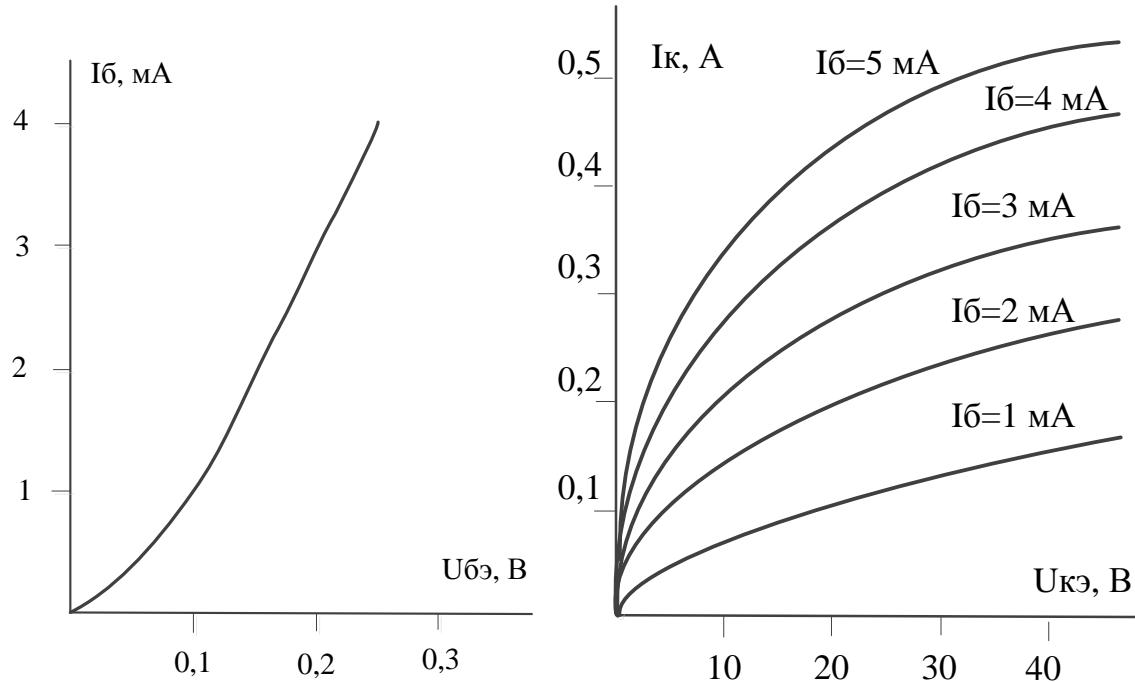
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 0,4 | 30 | 1,2 |



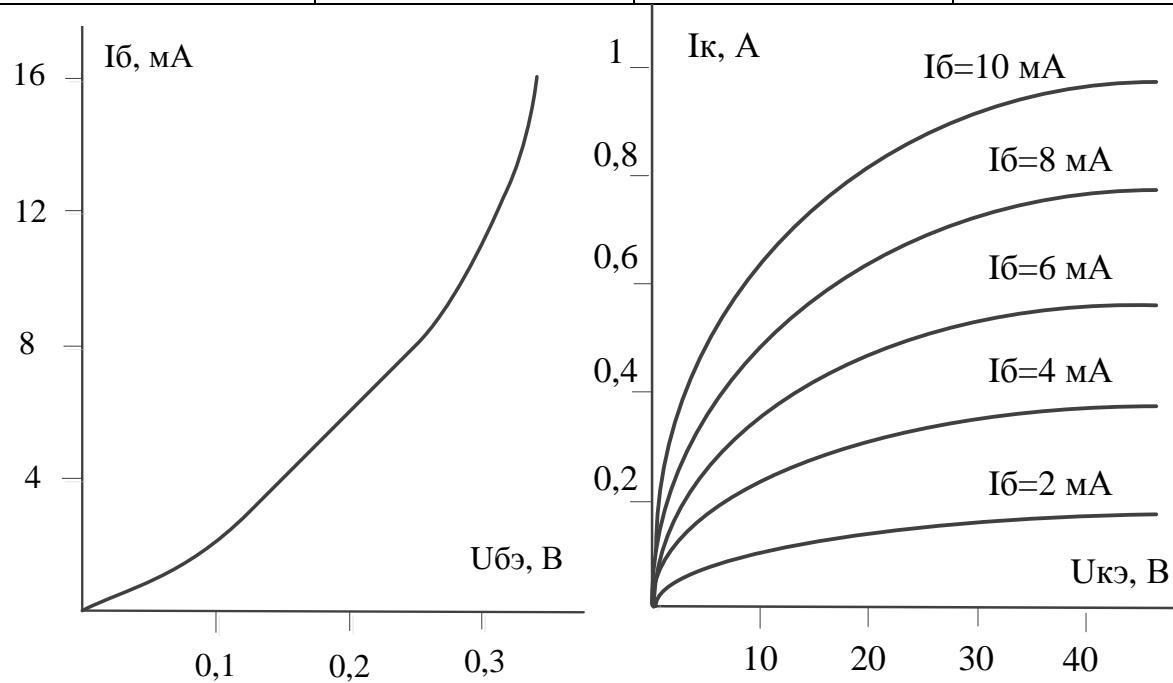
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 2 | 0,15 | 30 | 3,4 |

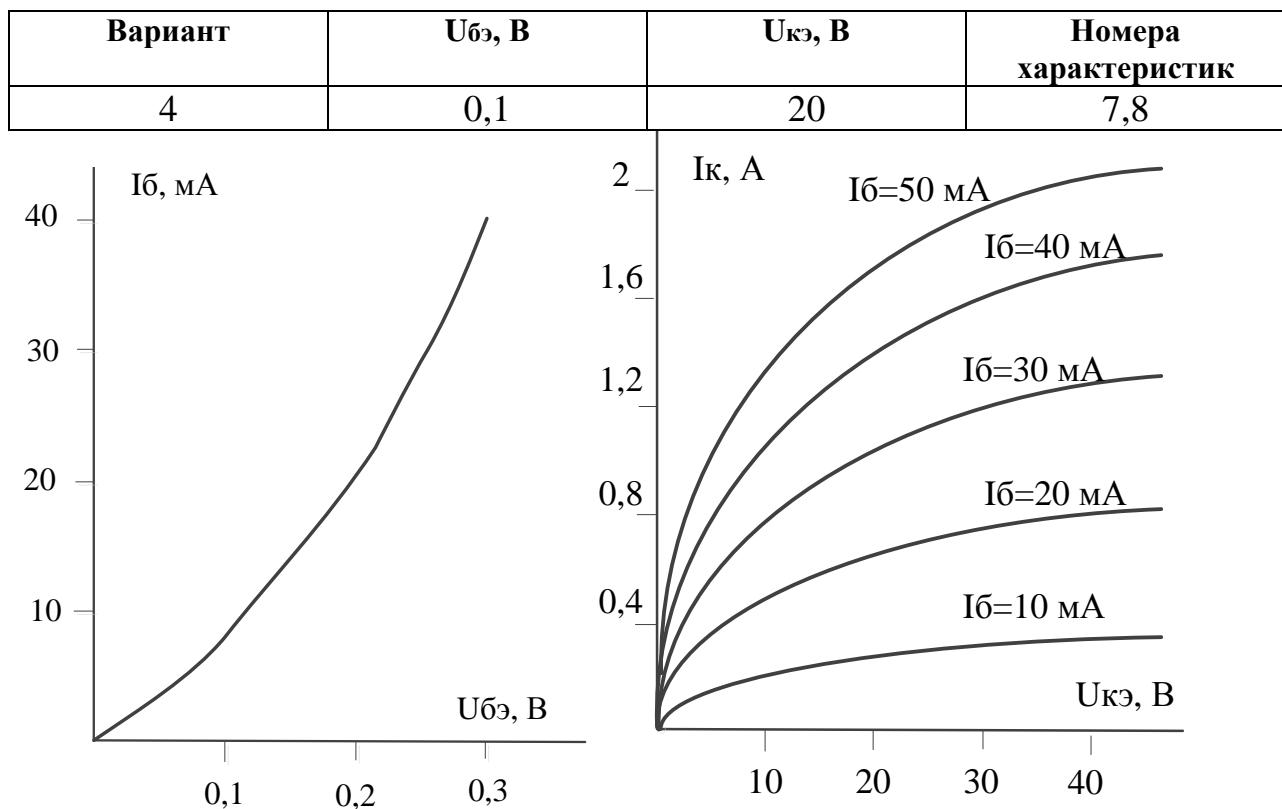


Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

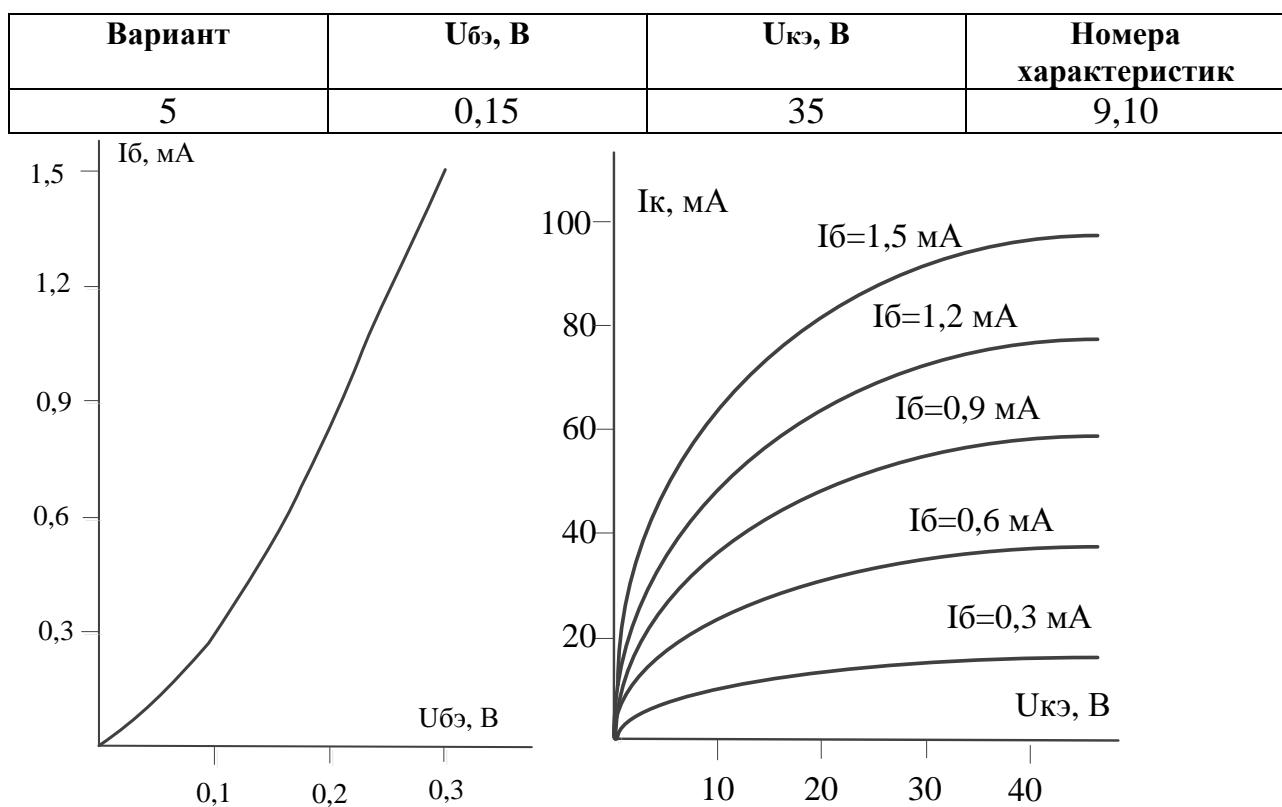
| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 3 | 0,15 | 40 | 5,6 |



Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

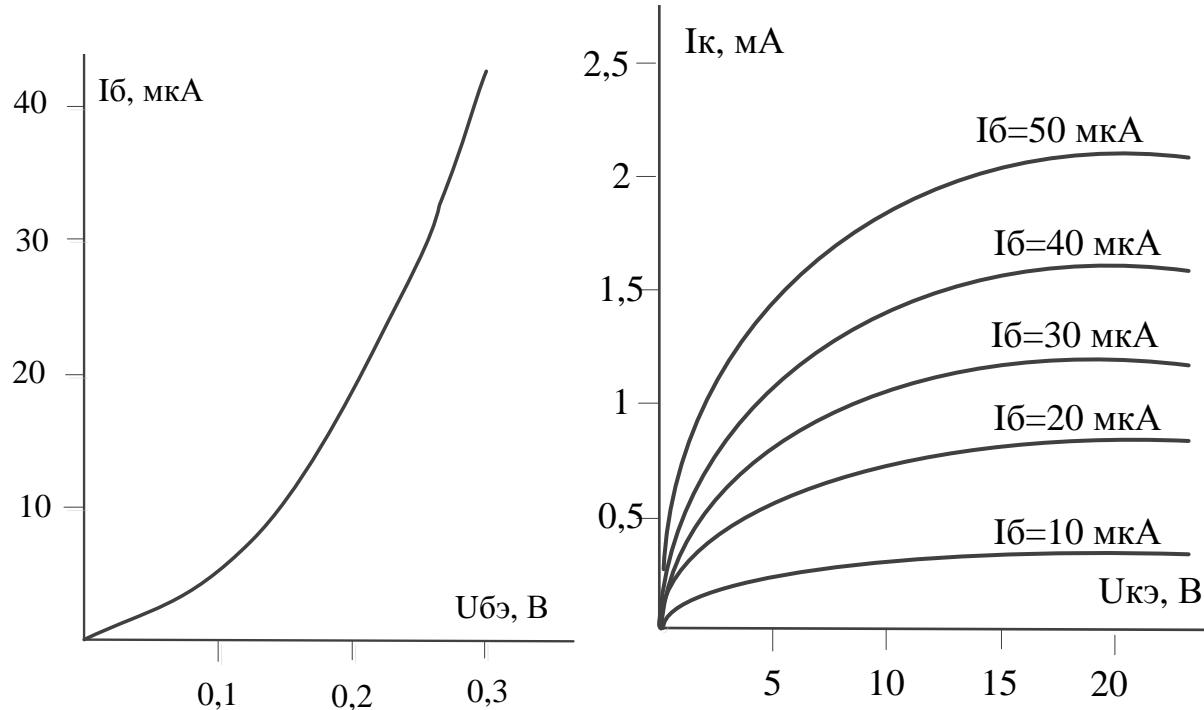


Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.



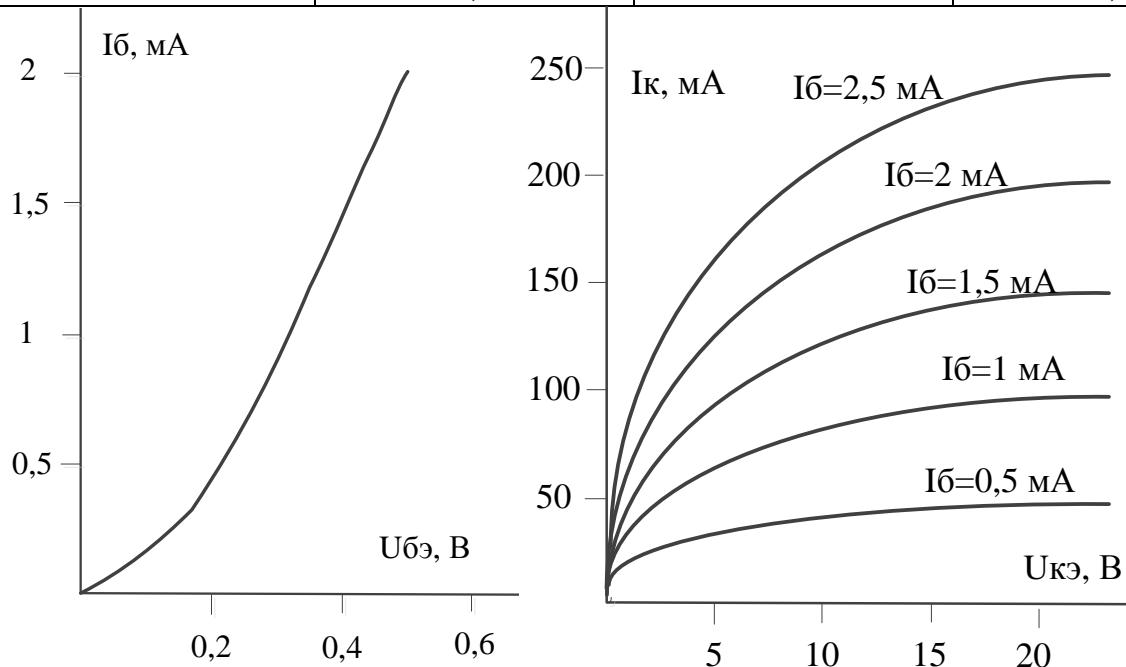
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 6 | 0,25 | 15 | 11,12 |



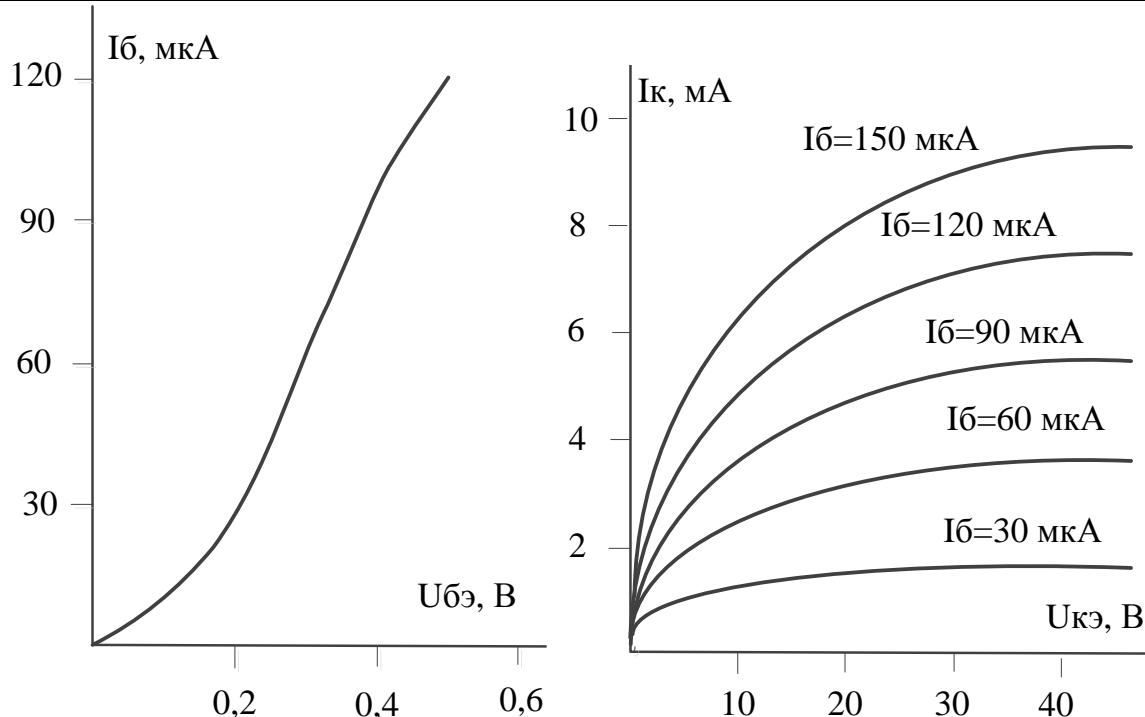
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 7 | 0,3 | 15 | 13,14 |



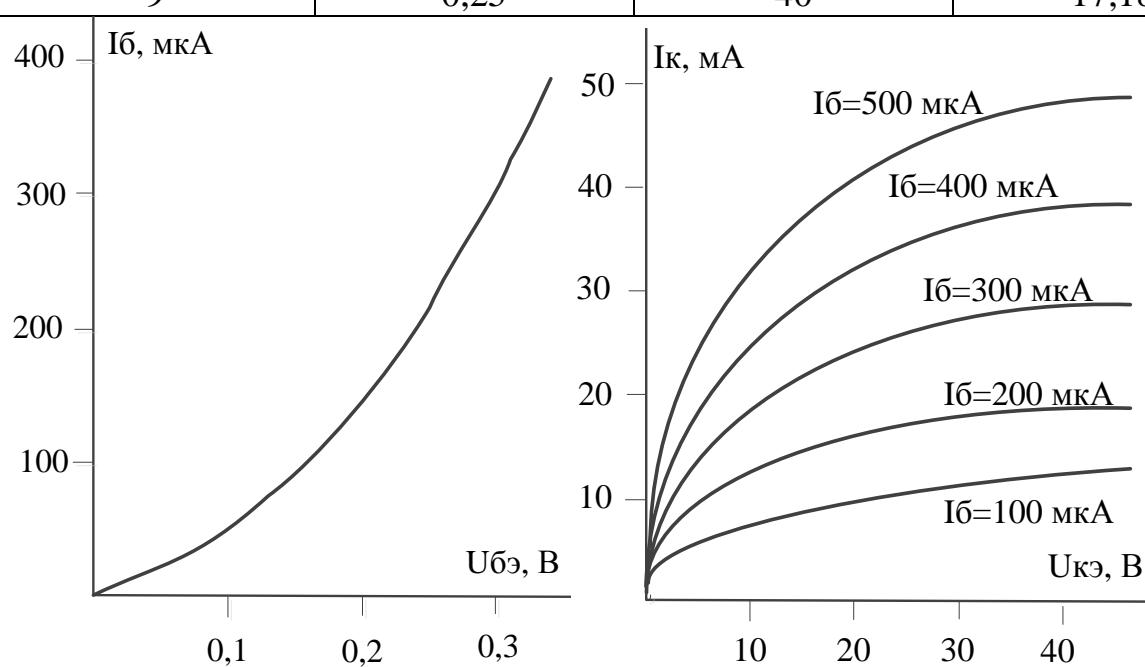
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | $U_{бЭ}$, В | $U_{кЭ}$, В | Номера характеристик |
|---------|--------------|--------------|-------------------------|
| 8 | 0,3 | 30 | 15,16 |



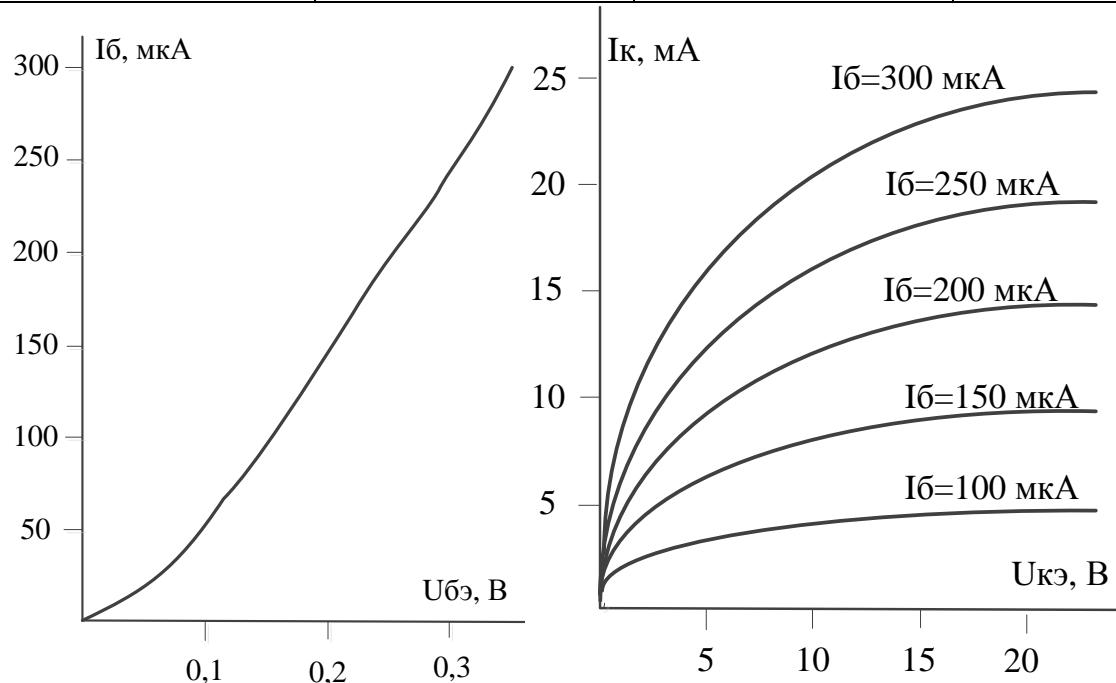
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | $U_{бЭ}$, В | $U_{кЭ}$, В | Номера характеристик |
|---------|--------------|--------------|-------------------------|
| 9 | 0,25 | 40 | 17,18 |



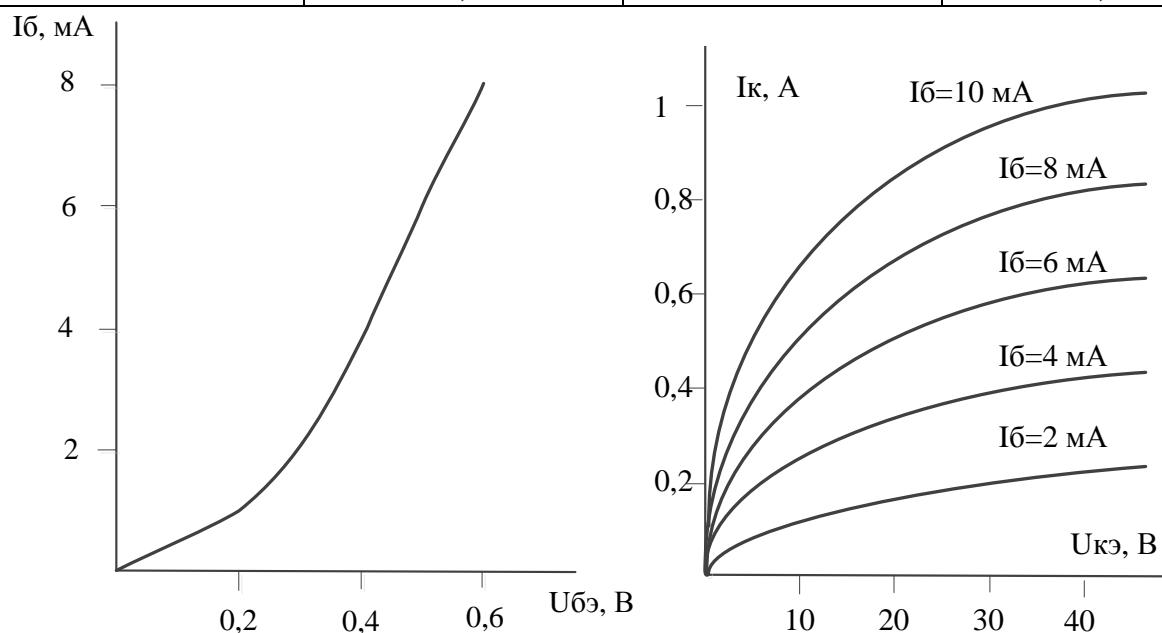
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 10 | 0,2 | 10 | 19,20 |



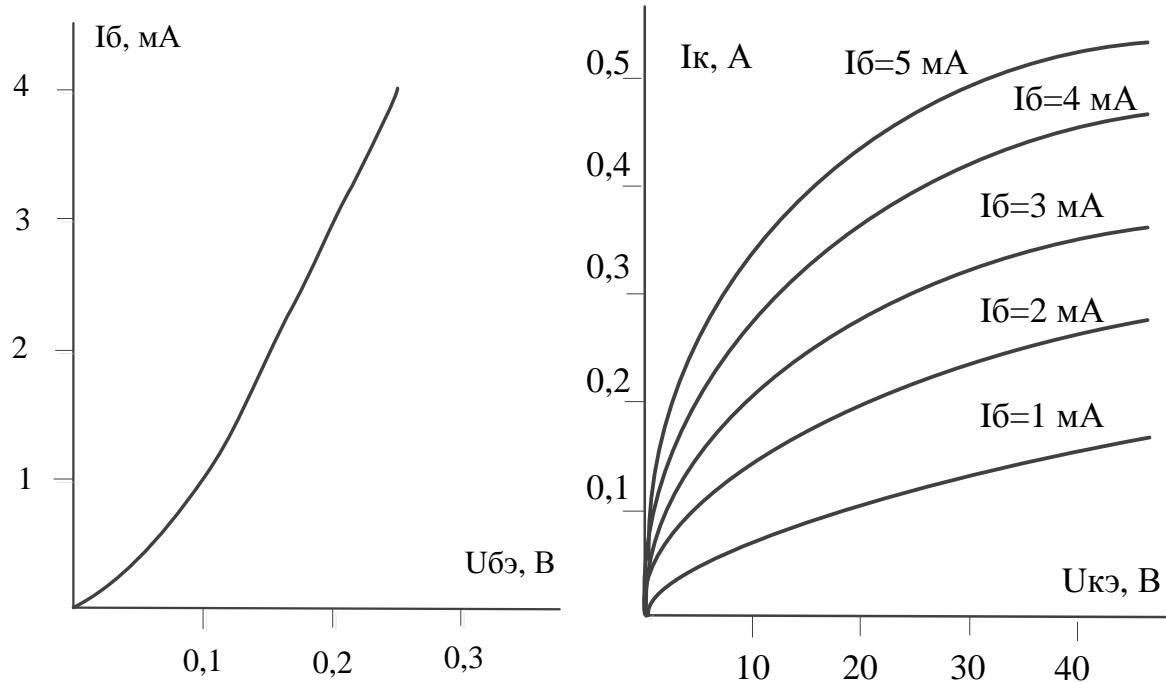
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 11 | 0,5 | 40 | 1,2 |



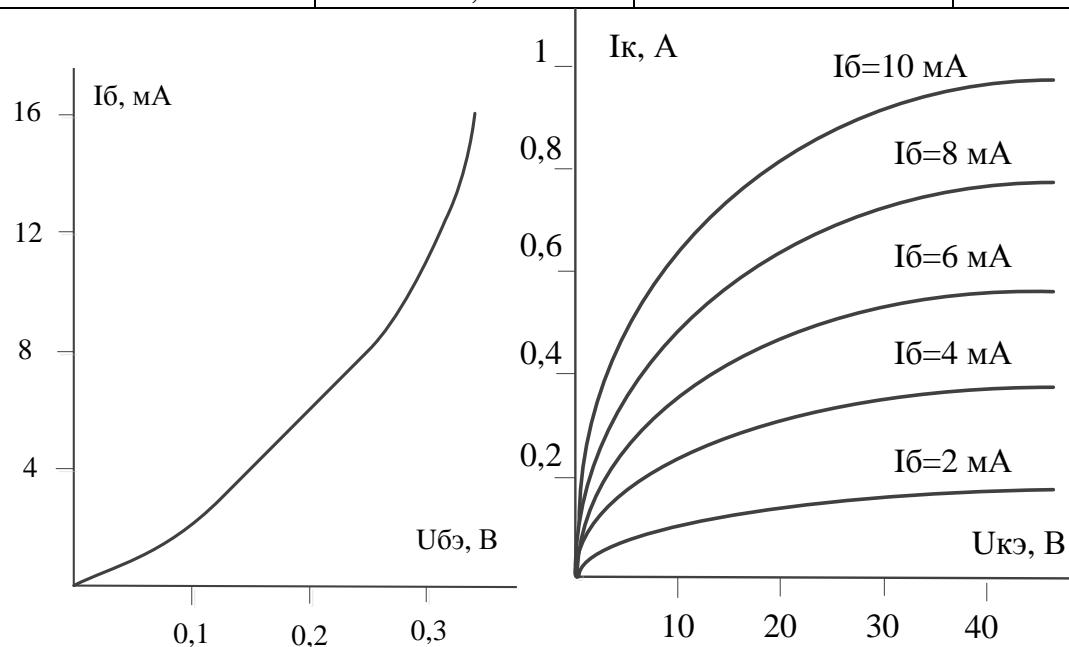
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 12 | 0,2 | 40 | 3,4 |



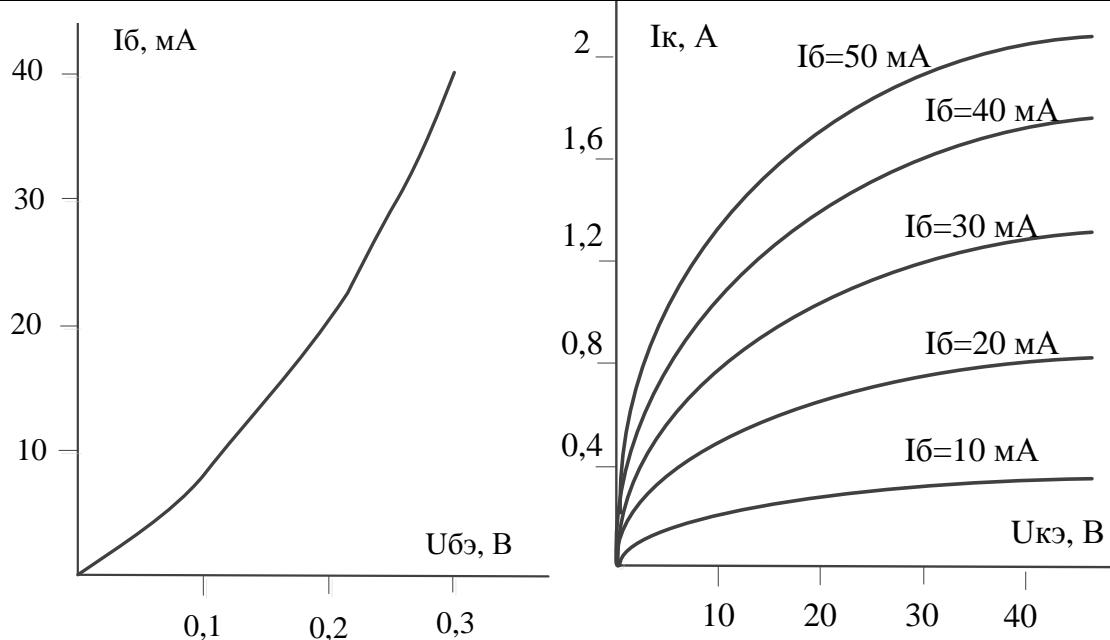
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 13 | 0,1 | 20 | 5,6 |



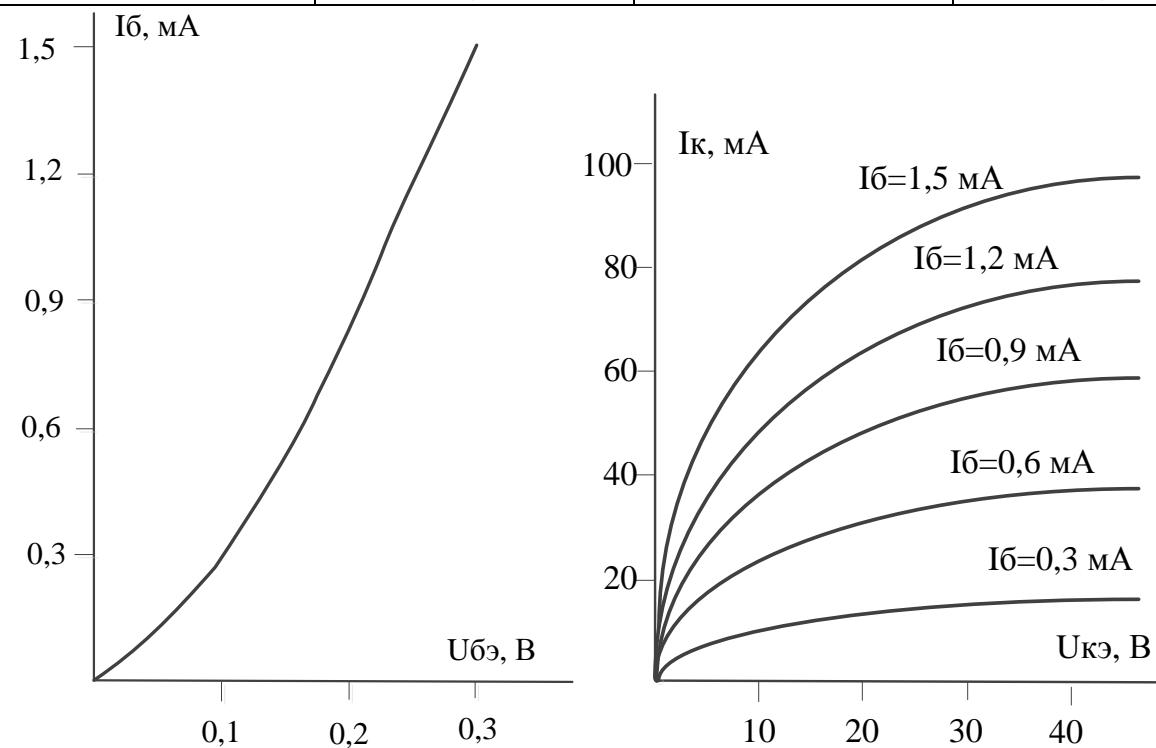
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 14 | 0,25 | 40 | 7,8 |



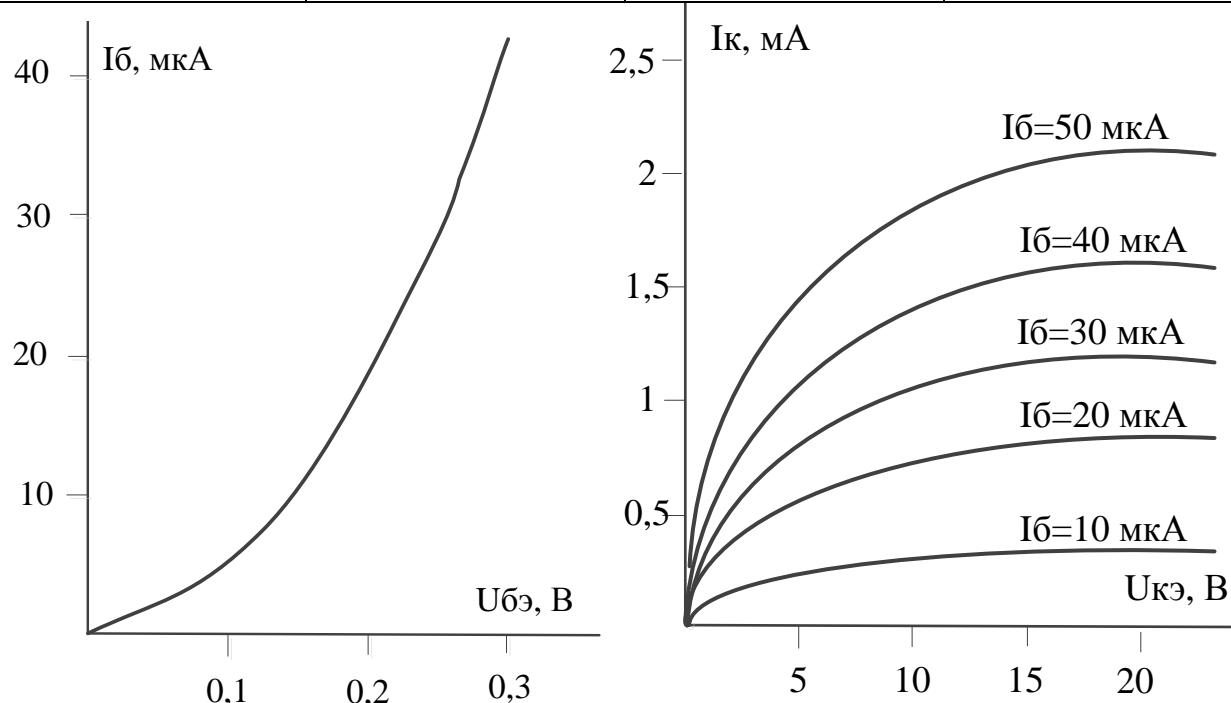
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 15 | 0,1 | 30 | 9,10 |



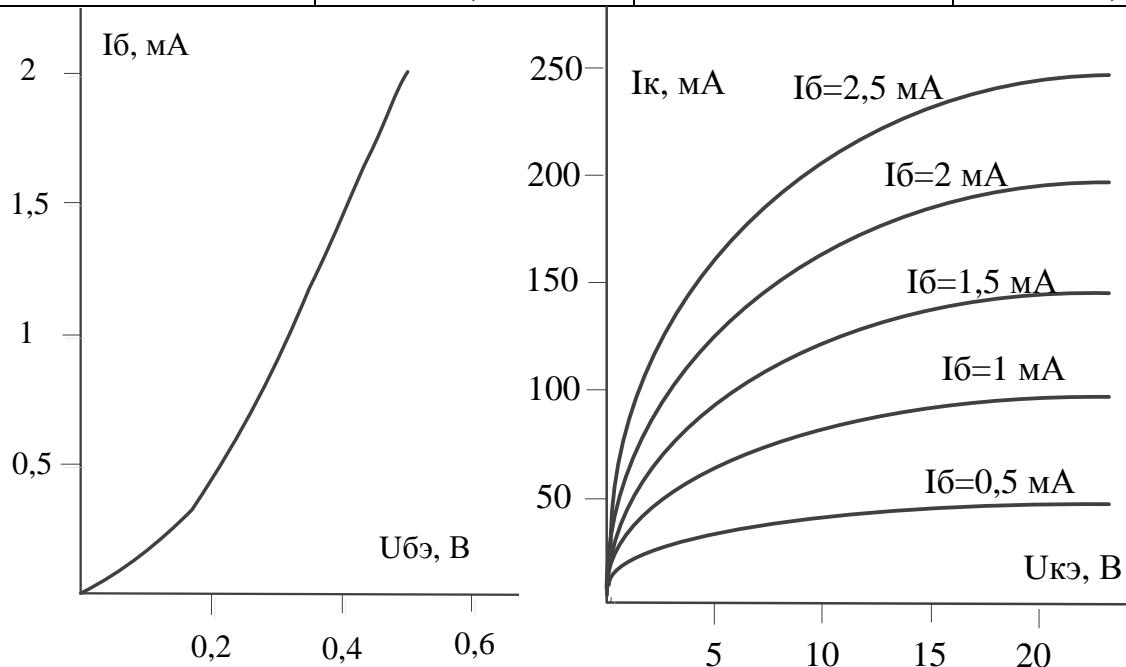
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 16 | 0,3 | 10 | 11,12 |



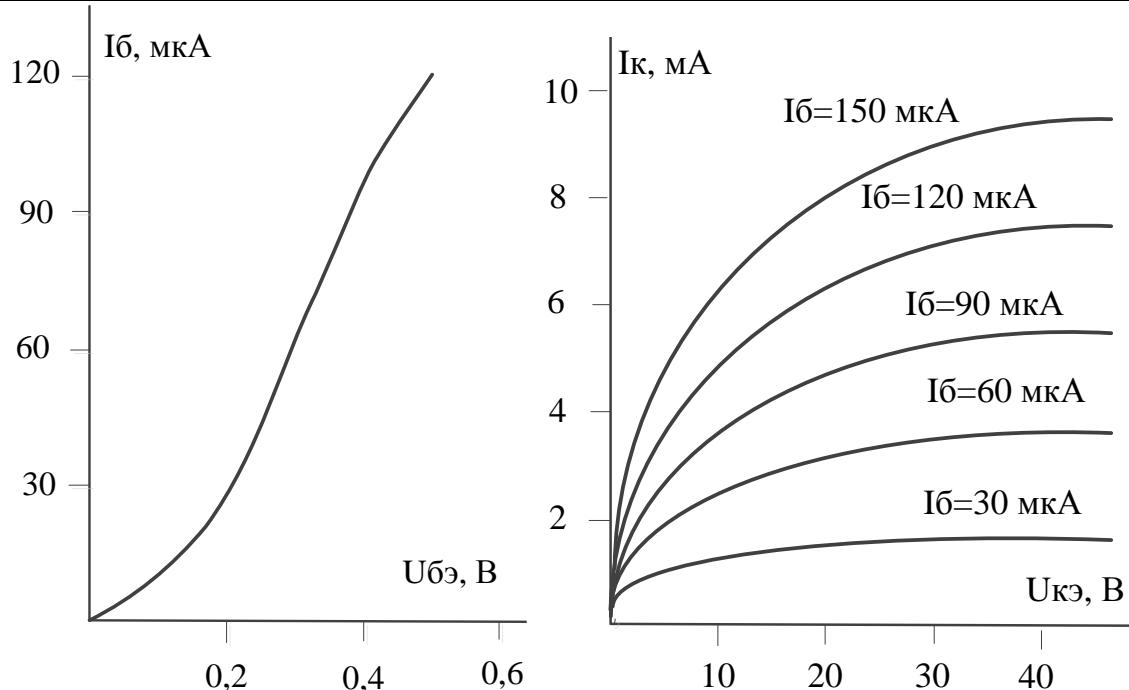
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 17 | 0,4 | 20 | 13,14 |



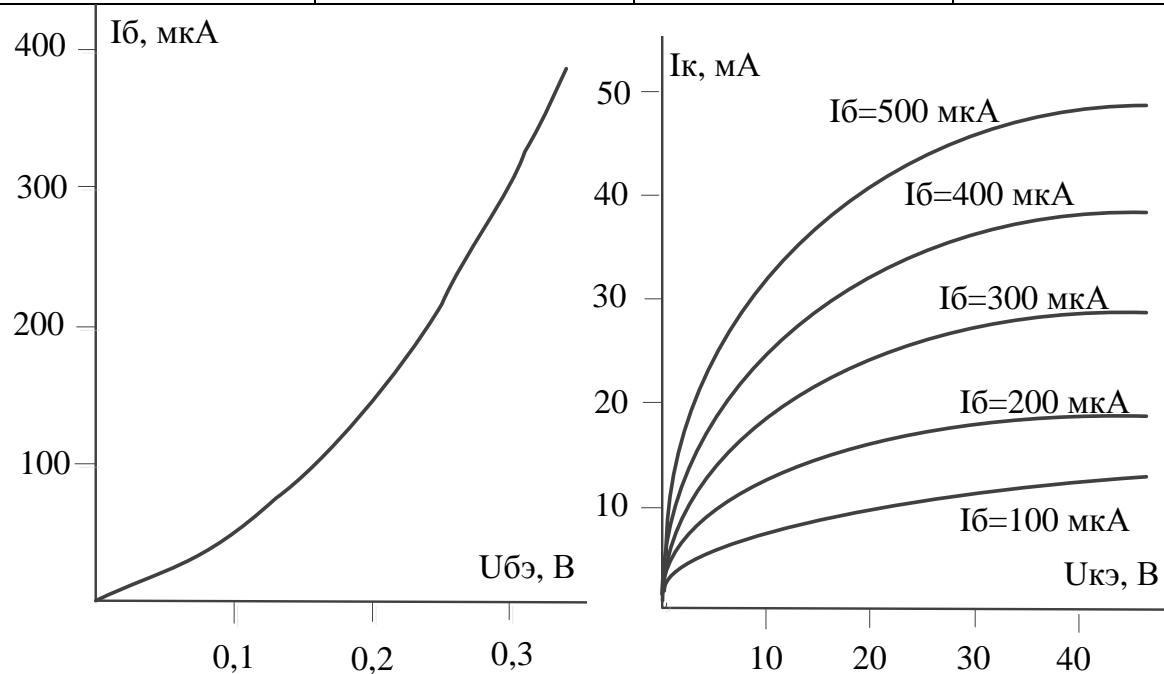
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 18 | 0,4 | 40 | 15,16 |



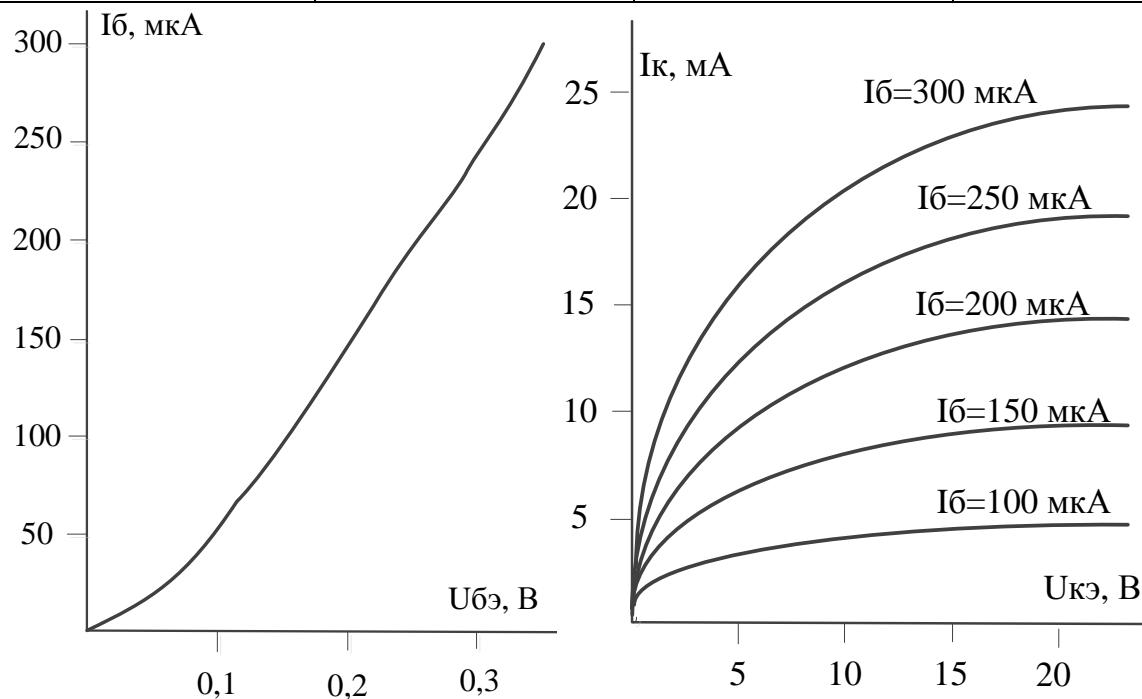
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 19 | 0,3 | 40 | 17,18 |



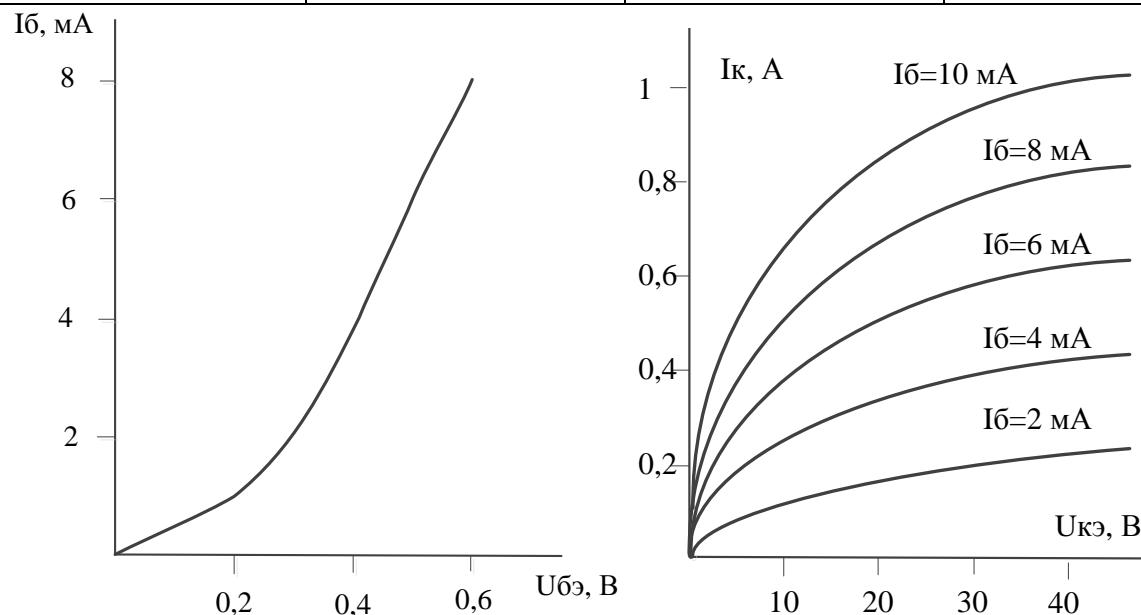
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бЭ} , В | U _{кЭ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 20 | 0,3 | 15 | 19,20 |



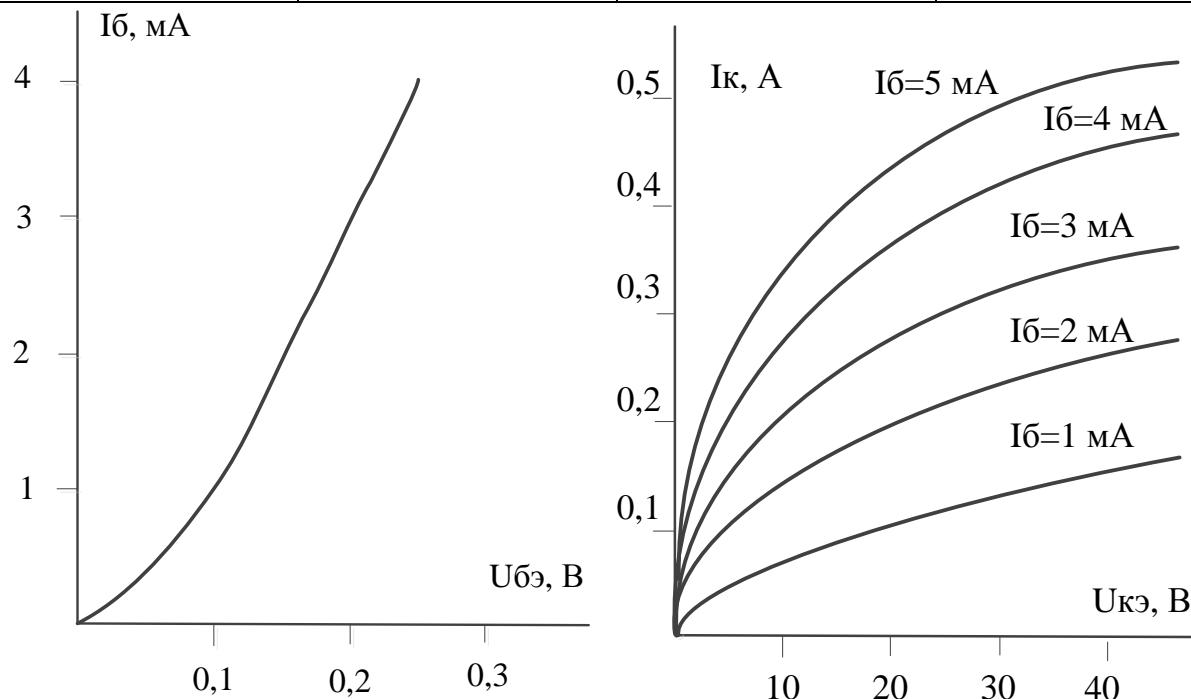
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бЭ} , В | U _{кЭ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 21 | 0,4 | 30 | 1,2 |



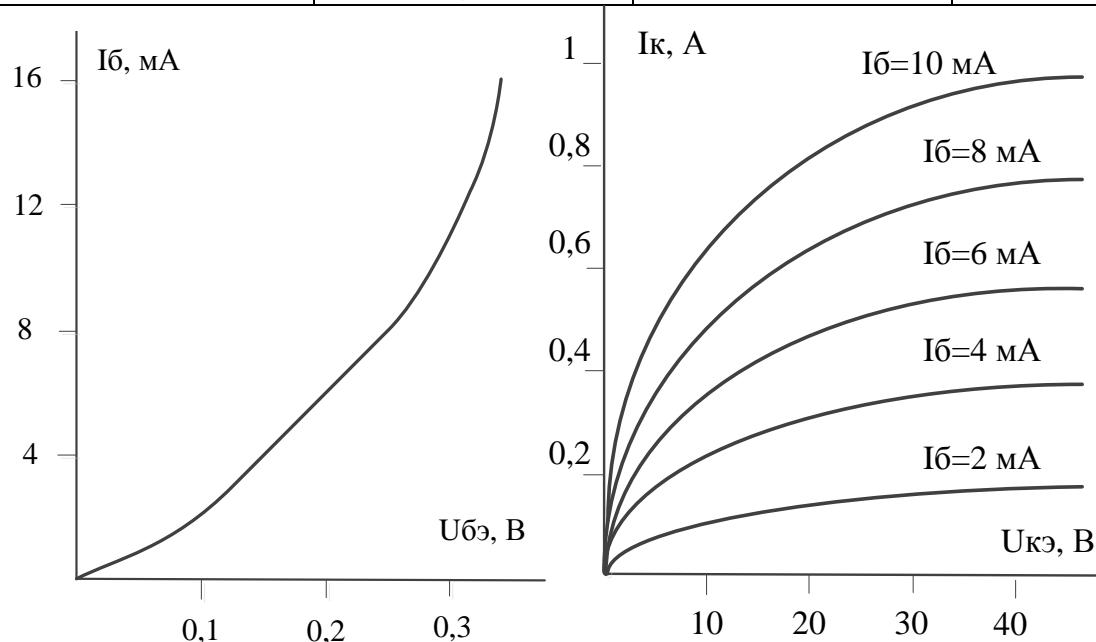
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 22 | 0,15 | 30 | 3,4 |



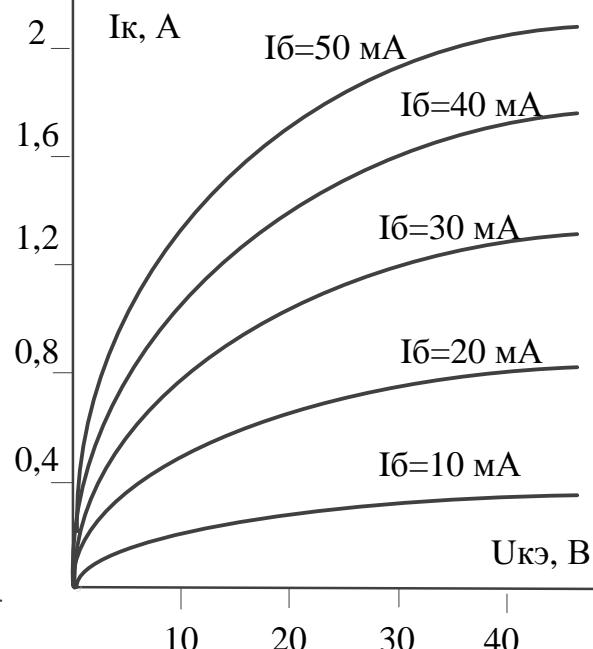
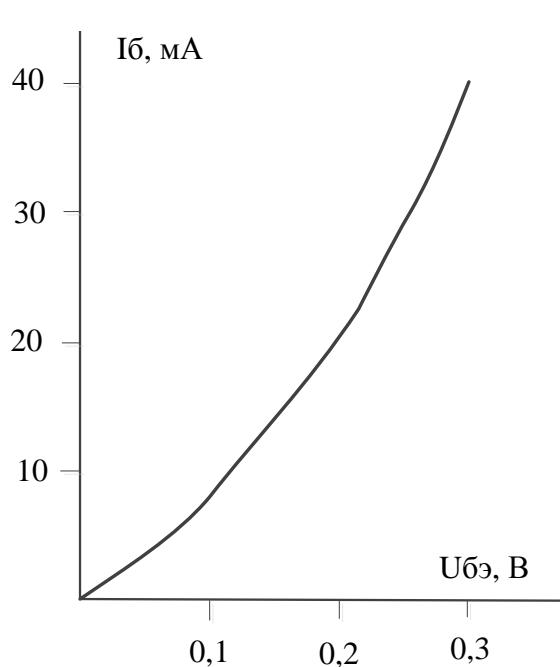
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 23 | 0,15 | 40 | 5,6 |



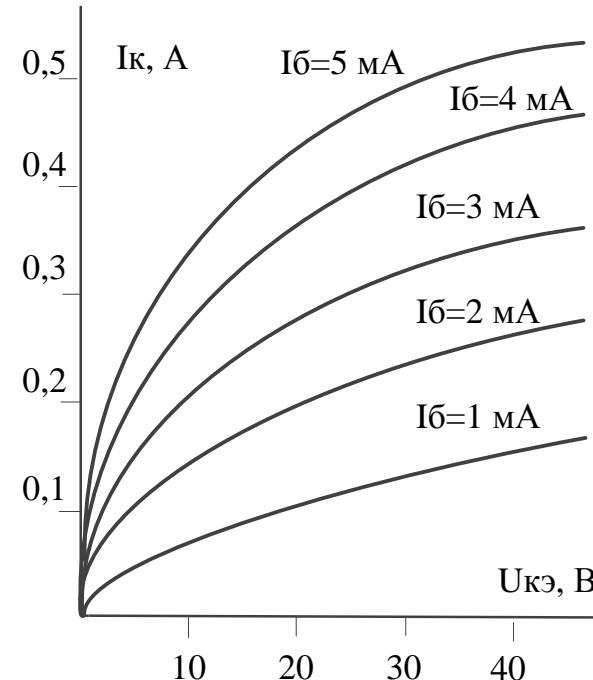
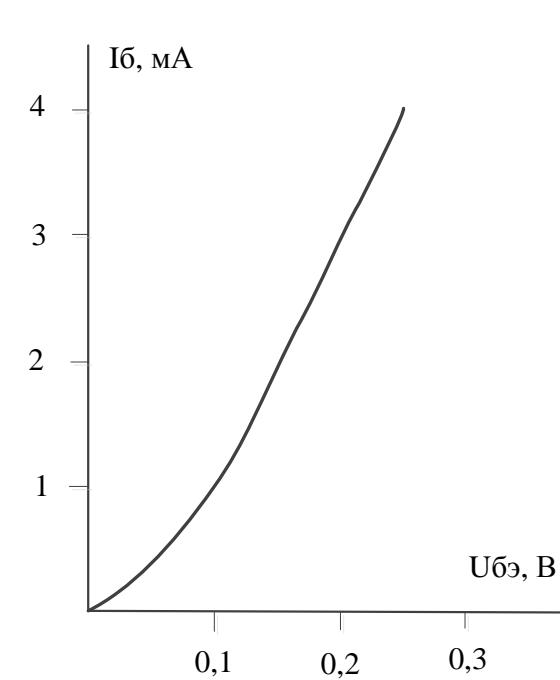
Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 24 | 0,1 | 20 | 7,8 |



Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определить коэффициент усиления. Начертить схему включения транзистора.

| Вариант | U _{бэ} , В | U _{кэ} , В | Номера характеристик |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 25 | 0,17 | 35 | 3,4 |



ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение тиристора. Снятие и анализ характеристик управляемого тиристора»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение тиристора. Снятие и анализ характеристик управляемого тиристора.

Цель работы: Измерение и изучение свойства тиристора как управляемого выпрямителя с однопереходным транзистором в цепи управления.

Тиристорами называют полупроводниковые приборы с тремя и более *p-n*-переходами, которые могут переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот.

В закрытом состоянии сопротивление тиристора составляет десятки миллионов омов, и он практически не пропускает ток при напряжениях до десятков вольт. В открытом состоянии сопротивление тиристора незначительно. Переход тиристора из одного состояния в другое происходит за очень короткое время, практически скачком.

Тиристоры выпускают двух видов: диодные (динисторы) и триодные (тринисторы). Динисторы имеют два внешних электрода – анод и катод и постоянное напряжение включения. Тринисторы кроме анода и катода имеют третий электрод, называемый управляемым. Наличие управляемого электрода позволяет, не меняя анодного напряжения, изменять напряжение включения.

Структурные обозначения тринисторов и их условные обозначения с управлением по катоду показаны на рис.1,*a*, *b*, а с управлением по аноду – на рис.1,*в*, *г*.

При полярности внешнего источника, показанной на рис.1,*а* переходы ЭП₁ и ЭП₂ смешены в прямом направлении и поэтому имеют незначительные сопротивления. Переходы ЭП₁ и ЭП₂ называют эмиттерными. Переход КП включен в обратном направлении и поэтому имеет большое сопротивление. Переход КП называют коллекторным. Типовая вольтамперная характеристика динистора приведена на рис.2.

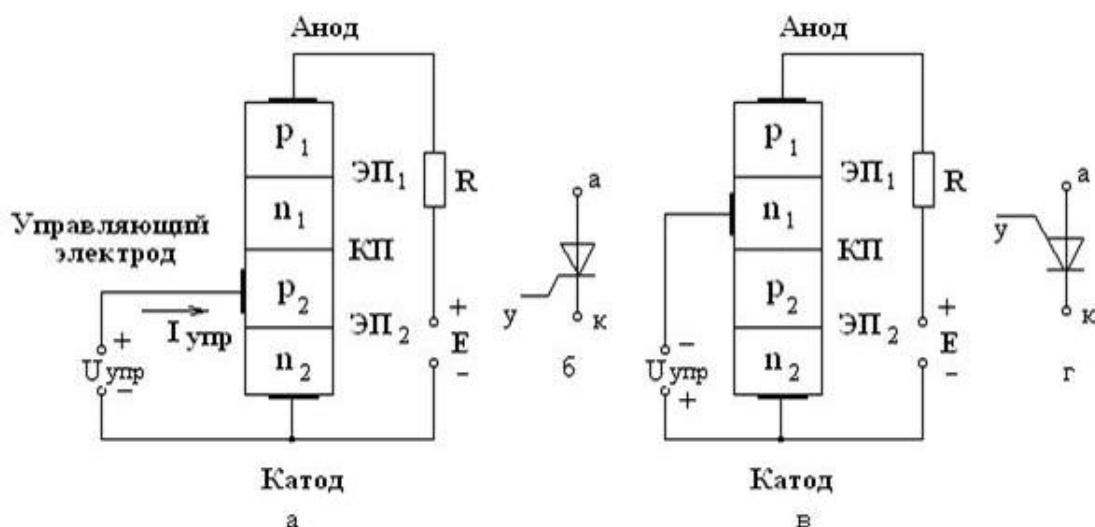


Рис.1

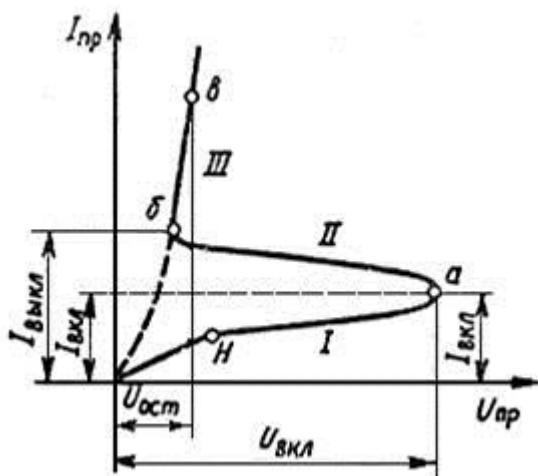


Рис.2

Из графика видно, что на участке I кривой через динистор протекает небольшой ток. Работа динистора в пределах этого участка соответствует его закрытому состоянию. Переход динистора из закрытого состояния в открытое происходит благодаря лавинному размножению носителей электрических зарядов (дырок и электронов). Сущность лавинного размножения сводится к следующим физическим процессам, происходящих с ростом прямого напряжения. Из эмиттерной области p_1 (см. рис.1) дырки, преодолевая потенциальный барьер эмиттерного перехода ЭП₁, инжеектируются в базовую область n_1 . Дырки, прошедшие базу и коллекторный переход КП, входят в базовую область p_2 . Потенциальный барьер эмиттерного перехода ЭП₂ задерживает некоторую часть дырок в базовой области p_2 , тем самым образуя в ней нескомпенсированный положительный заряд, снижающий высоту потенциального барьера перехода ЭП₂. Снижение потенциального барьера способствует увеличению инжекции электронов из эмиттерной области n_2 в базовую область p_2 . Инжектируемые электроны, проходя коллекторный переход, поступают в базовую область n_1 .

В базовой области n_1 , как и в базовой области p_2 , создается избыточный заряд электронов, что приводит к еще большей инжекции дырок из эмиттерной области p_2 . Таким образом, в динисторе при некотором прямом напряжении, называемом напряжением включения динистора $U_{вкл}$, наблюдается лавинный рост тока с одновременным уменьшением падения напряжения на тиристоре в результате встречных инжекций эмиттеров. Лавинный рост тока до нужного значения ограничивается: падением напряжения на резисторе R , включаемом в анодную цепь тиристора. Лавинному росту тока динистора соответствуют два участка кривой вольтамперной характеристики тиристора — участок II и участок III (см рис.2).

Участок II с одной стороны ограничен напряжением включения $U_{вкл}$, а с другой — током выключения $I_{выкл}$ динистора. Данный участок является

ниспадающим, поэтому обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением. Он является также переходным участком между участками I и III. Участок III соответствует открытому состоянию динистора, ему соответствуют большие токи и малое падение напряжения, называемое остаточным $U_{ост}$. На участках II и III все переходы находятся в открытом состоянии, что обуславливает малое внутреннее сопротивление динистора.

Переход КП в открытое состояние обусловлен наличием больших зарядов в базовых областях, созданных лавинным процессом и поддерживаемых в процессе работы динистора его током. При уменьшении тока динистора до $I_{выкл}$ тиристор переходит в закрытое состояние.

Таким образом, динистор может находиться в закрытом и открытом состояниях.

Если полярность внешнего источника сменить на противоположную, то переходы ЭП₁ и ЭП₂ окажутся смещенными в обратном направлении, а переход КП – впрямом. При этом вольтамперная характеристика динистора принимает вид обратной ветви кривой вольтамперной характеристики обычного полупроводникового диода.

Динисторы применяются в основном в схемах с ключевым режимом работы. Наличие на кривой вольтамперной характеристики ниспадающего участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением расширяет практическое использование динисторов.

Существенным недостатком динистора является невозможность управлять напряжением включения без изменения внешнего напряжения. Этот недостаток устранен в управляемом тиристоре (триисторе), в котором один из эмиттеров сделан управляющим. Возможность управлять напряжением переключения в триисторе осуществляется с помощью подачи напряжения на третий, управляющий, электрод. Управляющий электрод может быть подключен к любой из баз триистора. Использование той или иной базы приводит лишь к изменению полярности источника управляющего напряжения. Полярность управляющего напряжения должна быть такой, чтобы облегчалось включение триистора. С ростом управляющего тока уменьшается потенциальный барьер, что приводит к увеличению числа инжектированных зарядов, следовательно, к росту тока и снижению напряжения переключения.

При некотором управляющем токе $I_{упр}$, называемом током сопрямления, вольтамперная характеристика триистора аналогична прямой ветви кривой вольтамперной характеристики обычного диода.

При отсутствии управляющего тока триистор превращается в динистор. Управляющий ток переводит триистор только из закрытого состояния в открытое. Для включения достаточно ввести в цепь эмиттера кратковременный импульс тока,

причем значительно меньший, чем ток в нагрузке тиристора. После перехода тиристора в открытое состояние управляющий электрод теряет свои управляющие свойства.

Тиристоры характеризуются следующими параметрами:

1. Напряжение включения $U_{вкл}$ – прямое напряжение, при котором тиристор переходит из закрытого в открытое состояние. Напряжение включения в зависимости от типа тиристора может колебаться от единиц до нескольких тысяч вольт.
2. Ток включения $I_{вкл}$ – прямой ток, при котором тиристор переходит в открытое состояние.
3. Ток управления $I_{упр}$ – наименьший ток в цепи управляющего электрода, обеспечивающий переход триистора из закрытого состояния в открытое при данном напряжении на его аноде. Ток управления обусловливается управляющим напряжением $U_{упр}$ между управляющим электродом и эмиттером. Он значительно меньше тока, протекающего через триистор.
4. Ток выключения $I_{выкл}$ – ток, ниже которого тиристор переходит из открытого в закрытое состояние. В триисторе $I_{выкл}$ уменьшается с ростом током управления.
5. Остаточное напряжение $U_{ост}$ – напряжение, соответствующее открытому состоянию тиристора, оно не превышает 1...2 В.
6. Время включения $t_{вкл}$ – время, в течение которого ток через тиристор возрастает до 0,9 его установившегося значения, с момента подачи управляющего напряжения. Время включения не превышает 1 мкс.
7. Время выключения $t_{выкл}$ – время, в течение которого тиристор успевает перейти из открытого в закрытое состояние. Оно необходимо для освобождения базовых областей от неравновесных носителей и не превышает 10...20 мкс.

Если к аноду тиристора подключить положительный полюс источника анодного напряжения U_A , а к катоду – отрицательный, то крайние электронно-дырочные переходы П1 и П3 будут смещены в прямом направлении, а средний переход П2 – в обратном. Такое включение тиристора называется прямым. Типичный вид прямой ветви ВАХ тиристора в динисторном включении (без подключения управляющего электрода, ключ S разомкнут) представлен на рис. 3

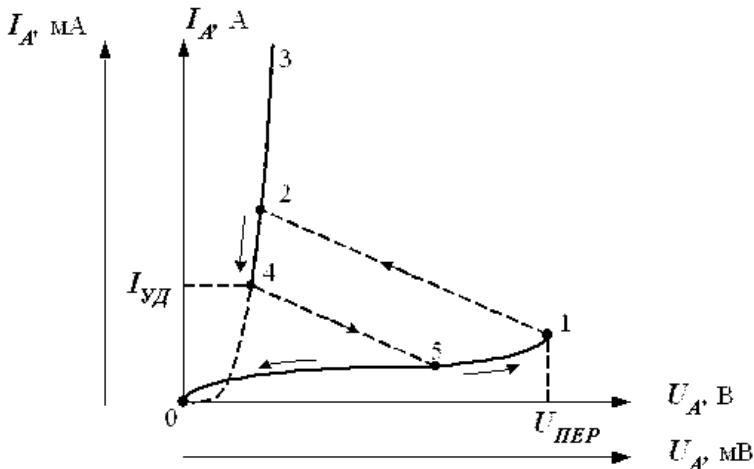


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика тиристора при $I_y=0$

Поскольку переход П2мещен в обратном направлении, то участок 0-1 ВАХ тиристора соответствует обратной ветви ВАХ электронно-дырочного перехода. Тиристор при этом обладает высоким сопротивлением, почти не проводит ток, т.е. находится в выключенном состоянии. Увеличение U_A усиливает инжецию через П1 и П3 носителей заряда в области, примыкающие к П2, где они становятся неосновными. Эти заряды диффундируют к переходу П2 и в результате экстракции преодолевают его, частично накапливаясь в областях p1 (дырки) и n2 (электроны). Накопившиеся заряды дополнительно усиливают инжецию через П1 и П3, вызывая дальнейшее накопление избыточных зарядов около перехода П2. Такое взаимоусиливающее влияние называется положительной обратной связью.

При некотором анодном напряжении переключения U_{PER} (точка 1 на рис. 3) накопившиеся в областях p1 дырки и n2 электроны дополнительной разностью потенциалов настолько снижают потенциальный барьер перехода П2, что ток через него резко возрастает и тиристор переключается в проводящее состояние с низким сопротивлением (точка 2 на рис. 3). Участок 2-3 при увеличении тока I_A и участок 3-4 при уменьшении тока соответствуют прямой ветви ВАХ электронно-дырочного перехода. Максимальный ток на участке 2-3 ограничивается анодным резистором R_A (рис. 3). При снижении тока до величины тока удержания $I_{уд}$ тиристор переключается в закрытое состояние с высоким сопротивлением (точка 5 на рис. 3).

Поскольку численные значения токов и напряжений на разных участках ВАХ тиристора могут сильно различаться, их строят в разных масштабах на одном графике. На рис. 3 участок 0-1 соответствует верхней шкале напряжений (вольты) и левой шкале токов (миллиамперы или микроамперы), а участок 3-4 соответствует нижней шкале напряжений (милливольты) и правой шкале токов (амперы).

При смене полярности приложенного к тиристору напряжения его переходы П1 и П3 будут смешены в обратном направлении. Такое включение называется обратным. Обратная ветвь ВАХ тиристора повторяет обратную ветвь ВАХ электронно-дырочного перехода и здесь не рассматривается.

При подключении к управляющему электроду (ключ S замкнут) источника электроэнергии ток управляющего электрода I_y дополнительно инжектирует основные носители заряда в область p1, дополнительно смещается в прямом направлении переход П1, а вследствие положительной обратной связи – и переход П3. Чем больше ток управляющего электрода I_y , тем при меньшем анодном напряжении тиристор переключается в открытое состояние. При некотором токе управляющего электрода, который называется током спрямления $I_{УСПР}$, прямая ветвь ВАХ тиристора повторяет прямую ветвь ВАХ диода. Семейство ВАХ тиристора при различных токах I_y приведены на рис. 4.

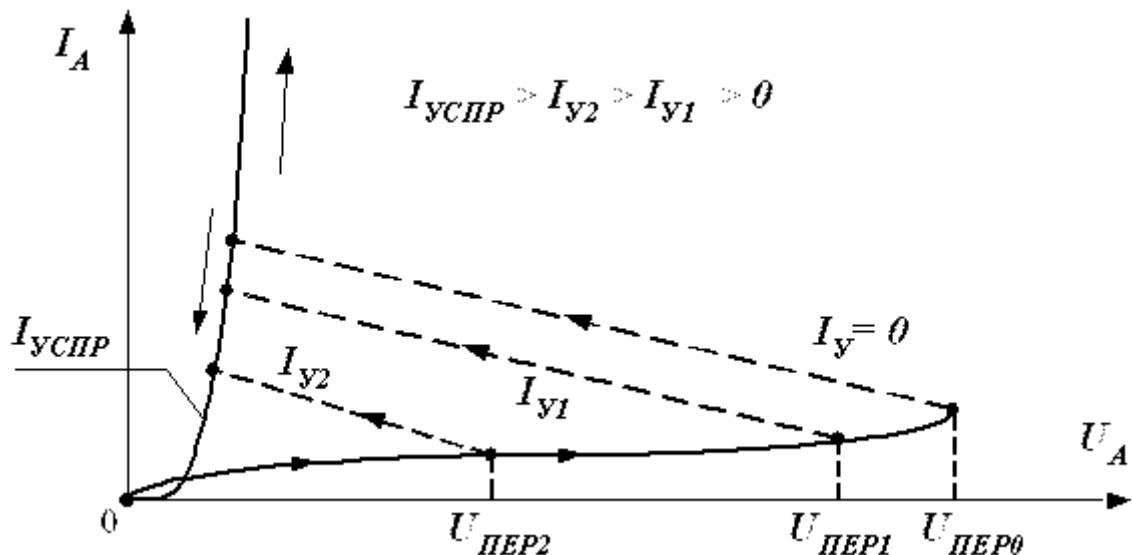


Рис. 4. Семейство ВАХ тиристора при различных токах управления.
Порядок выполнения работы

- Собрать схему экспериментальной установки по рис. 5.4.

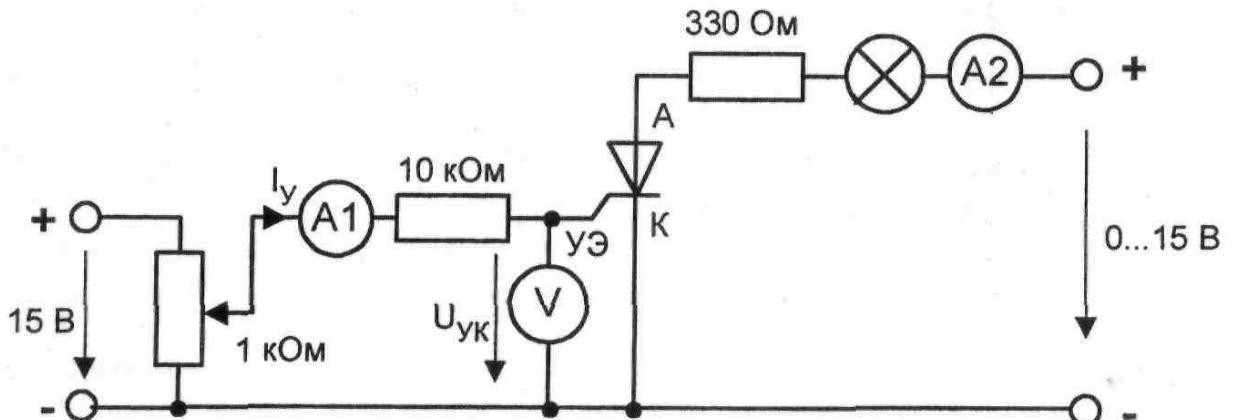


Рис. 5. Схема измерения ВАХ и параметров тиристора

На схеме источник анодного напряжения позволяет регулировать его в пределах от 0 до 15 В. Грубое регулирование осуществляется с шагом 5 В нажатием на клавишу «U». Вольтметр V позволяет контролировать напряжение этого источника. Вольтметр V измеряет анодное напряжение, а амперметр A2 – анодный ток тиристора.

Источник тока позволяет регулировать ток управляющего электрода от 0 до 20 мА с шагом 0,2 мА нажатием на клавишу «I».

Амперметр A1 показывает амплитуду импульсов тока управления.

2. Измерить напряжения и токи прямой ветви ВАХ-характеристики при увеличении анодного тока тиристора и отключенном управляющем электроде ($I_y = 0$), записать показания вольтметра V1 и амперметра A2 в таблицу. Всего произвести 8-10 измерений. Зафиксировать напряжение переключения $U_{\text{ПЕР}}$, незначительное превышение которого приводит к резкому увеличению анодного тока тиристора.

Таблица: ВАХ при увеличении анодного тока тиристора ($I_y = 0$)

| | | | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U_A , В | | | | | | | | |
| I_A , мА | | | | | | | | |

3. Измерить напряжения и токи прямой ветви ВАХ при уменьшении анодного тока тиристора и отключенном управляющем электроде ($I_y=0$). Для этого тиристор должен быть в проводящем состоянии предыдущего эксперимента. Регулируя напряжение источника «RegU505B» от 500 В до нуля, записать показания вольтметра V1 и амперметра A2 в таблицу. Всего произвести 8-10 измерений. Зафиксировать ток удержания $I_{\text{уд}}$, ниже которого резко увеличивается анодное напряжение тиристора.

Таблица: ВАХ при уменьшении анодного тока тиристора ($I_y = 0$)

| | | | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U_A , В | | | | | | | | |
| I_A , мА | | | | | | | | |

4. Определить ток спрямления $I_{\text{УСПР}}$. Для этого тиристор должен быть исходно в запертом состоянии. Установить ток источника равным нулю, а напряжение источника - 5 В. Увеличивая ток управления, отметить по амперметру A1.

5. Измерить напряжения и токи для прямых ветвей ВАХ при увеличении анодного тока тиристора и различных значениях тока управления. Значения токов управления выбрать равными $I_{\text{УСПР}}$; $0,5I_{\text{УСПР}}$; $0,25I_{\text{УСПР}}$. Для каждой ВАХ семейства провести 8-10 измерений. Перед каждым экспериментом тиристор необходимо перевести в закрытое состояние. Зафиксировать напряжение переключения $U_{\text{ПЕР}}$ для каждого значения тока управления. Результаты занести в таблицу.

Таблица: ВАХ при увеличении анодного тока тиристора и различных токах управления:

| $I_y=I_{\text{УСПР}}$ | $I_y=0,5I_{\text{УСПР}}$ | $I_y=0,25I_{\text{УСПР}}$ | | | |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----------|------------|
| U_A , В | I_A , мА | U_A , В | I_A , мА | U_A , В | I_A , мА |
| | | | | | |

6. По значениям таблиц 1 и 2 построить совместно ВА-характеристики при увеличении и уменьшении анодного тока тиристора. По значениям таблиц 1 и табл. 3 построить совместно семейство ВАХ тиристора при увеличении анодного тока и различных токах управления.

7. Записать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как устроен тиристор, какие существуют типы тиристоров?
2. Как происходит процесс включения и выключения динистора?
3. Что такое напряжение переключения тиристора, ток удержания?
4. Как включается триистор с помощью управляющего электрода?
5. Что такое ток спрямления тиристора?
6. Как устроен и работает симистор?

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение интегральных микросхем»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение интегральных микросхем.

Цель работы: Изучение принципа работы и характеристик интегральных микросхем.

Интегральной микросхемой, или сокращённо ИМС, называют монолитное изделие, предназначенное для исполнения функций заданного каскада или целой системы, компоненты которого соединены между собой определённым образом, и которые нельзя отделить один от другого демонтажными операциями. Различают **аналоговые микросхемы**, которые непрерывно отслеживают и воздействуют на сигнал, и **цифровые микросхемы**, которые дискретно преобразуют и обрабатывают информацию. Микросхемы классифицируют по степени интеграции, которая равна логарифму от числа деталей n , размещенных в одной ИМС: $k = \ln n$. По методу получения различают три вида ИМС: **плёночные, полупроводниковые и гибридные**.

В **плёночных ИМС** детали и соединения осуществляют путём получения плёнок малой толщины с различными свойствами, выполненных на подложке из не проводящего электрический ток материала. Плёночные микросхемы разделяют на две группы: на **тонкоплёночные** с толщиной плёнки менее 1 мкм и **толстоплёночные** с большей толщиной, часто составляющей порядка 20 мкм. Различие тонкоплёночных и толстоплёночных ИМС заключено не только в количественной толщине плёнок, но прежде всего в технологии их нанесения.

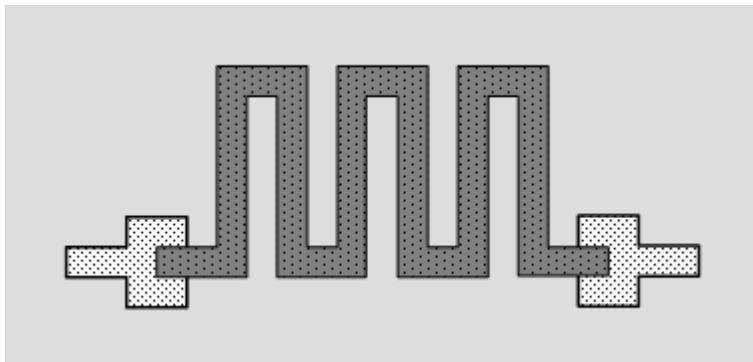
В **полупроводниковых ИМС** детали и соединения образованы специальными технологическими методами в кристалле полупроводника. **Гибридной** называют такую полупроводниковую ИМС, в которой одна часть деталей выполнена методом тонкоплёночной, а другая часть – методом полупроводниковой технологии.

В **гибридных ИМС**, сокращённо называемых ГИС, резисторы и некоторые другие пассивные компоненты получают на диэлектрической подложке методом тонкоплёночной технологии, а дискретные бескорпусные активные компоненты располагают рядом на подложке и соединяют проволокой с контактными площадками.

Плёночные микросхемы

Подложки плёночных микросхем, которые изготавливают из сапфира, ситаллов, керамики и прочего, всегда обладают прямоугольной конфигурацией и толщиной порядка от 0,2 мм до 1 мм. Подложки не должны вступать в химические реакции с материалами плёнок, обязаны обладать низкой степенью шероховатости поверхности, должны обладать высоким электрическим сопротивлением. Нанесение плёнок на подложку осуществляют через *трафарет*, называемый *маской*. Выполнение плёночных конденсаторов и особенно катушек индуктивности по очень весомым причинам не рекомендуют, однако в отдельных случаях без них всё же не обойтись.

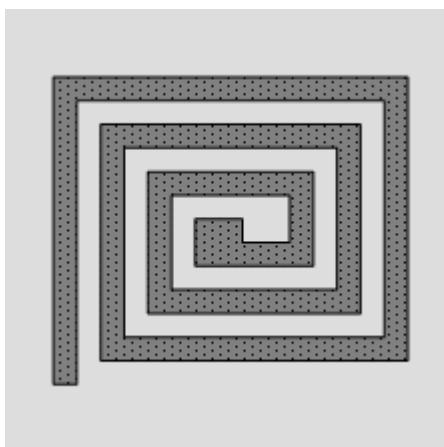
Плёночные резисторы, которые выполняют нанесением на подложку паст, содержащих никель, керметы, tantal, хром и т.д. со связующим веществом, имеют прямоугольную конфигурацию. С целью повышения сопротивления резистора его выполняют в виде соединённых друг с другом многочисленных элементарных одинаковых участков Г-образной или П-образной конфигурации, которые повторяют до тех пор, пока не будет получено необходимое сопротивление, что показано на рис.1.



Обычно сопротивление такого плёночного резистора может составлять **от 0,05 кОм до 50 кОм**, а получить много большее или много меньшее сопротивление затруднительно.

Плёночные конденсаторы имеют многослойную структуру и в общем случае образованы двумя электропроводящими плёнками, между которыми выполняют слой диэлектрической плёнки. Обкладки плёночных конденсаторов изготавливают из электропроводящих плёнок, содержащих алюминий, tantal, серебро, медь и подобные материалы. Диэлектрическую плёнку обычно получают из различных оксидов: окиси tantalа, трёхсернистой сурьмы, двуокиси кремния, моноокиси германия и пр. Ёмкость плёночных конденсаторов обычно составляет от 10 пФ до 20 нФ.

Плёночные катушки индуктивности имеют спиралевидную форму, что изображено на рис.2, и образованы нанесением токопроводящих плёнок на поверхность подложки.



Технология изготовления гибридных ИМС, БИС и МСБ

Гибридная технология микроэлектронных устройств развивается и совершенствуется в направлении создания конструкций, обеспечивающих высокую плотность и точность монтажа полупроводниковых БИС и хороший теплоотвод от компонентов. Для этих целей используют целый ряд новых материалов, в частности стальные эмалированные подложки в толстопленочной технологии, алюминиевые подложки с нанесенной на них многоуровневой тонкопленочной коммутацией и полимерной межуровневой изоляцией. Определенные преимущества дает сочетание в одном изделии тонкопленочной и толстопленочной технологии, получившей название дигибридной.

Пленочная и гибридная технология. С помощью пленочной технологии изготавливают пассивные элементы: резисторы, конденсаторы, элементы индуктивности, а также соединительные проводники и контактные площадки. Таким образом, чисто пленочные ИС обычно являются пассивными. Пленочные интегральные элементы часто используют совместно с миниатюрными навесными компонентами в составе гибридных ИС. Последние, уступая полупроводниковым ИС по надежности, плотности упаковки и себестоимости, имеют во многих случаях лучшие технические показатели за счет применения навесных компонентов (транзисторов, конденсаторов и элементов индуктивности). Элементы пленочных и гибридных ИС выполняются на поверхности диэлектрической подложки.

Гибридные ИМС обладают следующими основными свойствами:

1. Наиболее предпочтительными элементами являются пассивные компоненты (резисторы и конденсаторы), число навесных элементов в ИМС должно быть небольшим, так как их установка и монтаж требуют больших затрат труда.
2. Точность воспроизведения параметров в гибридных ИМС значительно выше, чем полупроводниковых. Возможна подгонка номиналов резисторов и конденсаторов (например, путем соскабливания части пленки).
3. Технология гибридных ИМС значительно проще технологии полупроводниковых. Гибридные ИМС делятся на тонкопленочные, в которых пленки создаются методом термовакуумного напыления, и толстопленочные, в которых пленки получают путем нанесения пасты через трафарет с последующим спеканием в печи. Технология толстопленочных ИМС сравнительно проста, и их выпуск может быть наложен в стенах лаборатории или производственного участка.
4. Стоимость подготовки к выпуску нового типа гибридных ИМС меньше, чем полупроводниковых, поэтому экономически оправдан выпуск гибридных ИМС малыми сериями (сотни и даже десятки экземпляров).
5. Массогабаритные показатели гибридных ИМС хуже, чем у полупроводниковых, и число компонентов в одной схеме обычно не больше нескольких десятков.

Число компонентов, заключенных в одном корпусе ИМС, называют степенью интеграции N . При увеличении N стоимость также возрастает по двум причинам. Во-первых, более сложные ИМС выполняют более сложную, а значит, и более специализированную функцию, а это приводит к снижению тиража ИМС и увеличению ее стоимости. Во-вторых, при большом значении N ИМС занимают значительную площадь на пластине полупроводника. При $N>W$ ИМС называется большой интегральной схемой (БИС).

Большим достижением современной электроники в последние годы стало преодоление упомянутого препятствия на пути увеличения N : найдены способы создания сложных БИС, которые при этом не теряют своей универсальности. Это программируемые ИМС.

Выход годных ИМС, в первую очередь зависит от сложности технологического процесса. Чем меньше технологических операций в типовом технологическом процессе, тем выше будет ожидаемый процент выхода годных ИМС. Поэтому выход годных гибридных ИМС всегда выше полупроводниковых, так как гибридная технология проще. По той же причине выход годных полупроводниковых ИМС на МДП-транзисторах выше, чем ИМС на биполярных транзисторах.

Проводники в гибридной интегральной микросхеме обеспечивают необходимое соединение элементов между собой, и их подключение к выводным зажимам обычно выполняют в виде тонкой пленки золота, меди или алюминия с подслоем никеля, хрома или титана. Подслой обеспечивает высокую адгезию к изоляционному основанию, а слой золота, меди или алюминия — высокую электрическую проводимость.

Плотность пассивных и активных компонентов при их многослойном расположении в гибридной интегральной микросхеме, выполненной по тонкопленочной технологии, может достигать 300—500 эл/см². Собранный гибридный интегральный микросхему помещают в жесткий металлический или пластмассовый корпус, предназначенный для повышения механической прочности и герметизации схемы.

Подложки микросхем обычно имеют прямоугольную форму пластины и делятся на два основных типа: диэлектрические и полупроводниковые. На **диэлектрические подложки** при изготовлении гибридных микросхем наносят вакуумным испарением, катодным распылением, трафаретной печатью или другими методами. На такой же подложке при изготовлении гибридных микросхем, кроме пленочных схемотехнических элементов, монтируют и закрепляют отдельные активные элементы — диоды, триоды или полупроводниковые микросхемы в виде отдельных кристаллов, изготовленных по полупроводниковой технологии.

Часть гибридной интегральной микросхемы, которая может быть выделена как самостоятельное изделие, называют компонентом интегральной микросхемы. В состав гибридной интегральной микросхемы могут входить в качестве компонентов

не только транзисторы или диоды, но и целые полупроводниковые интегральные микросхемы.

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. Подложки ГИС

Подложки ГИС являются диэлектрическим и механическим основанием для пленочных и навесных элементов и служат теплоотводом. Материал подложки должен обладать следующими свойствами и характеристиками: 1) высоким сопротивлением изоляции и электрической прочностью; 2) большим коэффициентом теплопроводности для эффективной передачи теплоты от тепловыделяющих элементов (резисторов, диодов, транзисторов) к корпусу микросхемы; 3) достаточной механической прочностью; 4) устойчивостью к воздействию химических реагентов в процессе подготовки поверхности подложки перед нанесением пленок; 5) стойкостью к воздействию нагрева в процессе нанесения тонких пленок и термообработки толстых пленок; 6) способностью к механической обработке (резке и т.д.).

2. Элементы ГИС

Пленочный резистор располагают на поверхности диэлектрической подложки, конструктивно он состоит из резистивной пленки определенной конфигурации и контактных площадок. Размеры контактной области должны выбираться такими, чтобы при наихудших сочетаниях геометрических размеров резистивного слоя и контактных площадок резистивная и проводящая пленки перекрывались, обеспечивая малое переходное сопротивление контакта в низкоомных резисторах. В качестве резистивных материалов тонкопленочных резисторов используют чистые металлы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением, а также специальные материалы – керметы, которые состоят из частиц металла и диэлектрика (например, Cr и SiO). Широко распространены пленки хрома и тантала. На основе керметов, в состав которых входят хром и монооксид кремния, получают высоомные резисторы. Для изготовления толстопленочных резисторов применяют пасты, состоящие из порошка стекла, наполнителя и органической связки. Наиболее широко используют свинцовые и цинковые боросиликатные стекла. В качестве наполнителя резистивных паст применяют серебро, палладий и их сплавы.

Подгоняемые резисторы. Применяют плавную и ступенчатую подгонку сопротивления резисторов. Плавная подгонка обеспечивает точность до сотых долей процента, ступенчатая – до единиц процентов. *Плавную подгонку* сопротивления тонкопленочных резисторов осуществляют, изменяя или удельное поверхностное сопротивление, или форму резистивной пленки. Удельное поверхностное сопротивление изменяют путем термического, химического или механического воздействия на материал пленки. Форму резистивной пленки корректируют путем удаления части резистивного материала. *Ступенчатая подгонка* сопротивления осуществляется удалением металлических перемычек в подгоночных секциях. Наиболее распространен способ *плавной подгонки*, связанный с изменением

геометрии резистора лазерным лучом. В процессе подгонки часть пленки удаляется и сопротивление увеличивается. При лазерной подгонке сначала производят грубую подгонку выжиганием пленки поперек, затем точную – вдоль резистора; выжигание резистивной пленки под углом позволяет совместить грубую и точную подгонку.

Пленочные конденсаторы. Такие конденсаторы относятся к числу наиболее распространенных элементов ГИС. Конструктивно эти конденсаторы представляют собой трехслойную структуру металл – диэлектрик – металл (МДМ) и состоят из нижней и верхней обкладок, разделенных слоем диэлектрического материала.

К конструкции конденсаторов предъявляются следующие конструктивно-технологические требования: минимальные габариты; воспроизводимость характеристик в процессе производства; совместимость технических процессов изготовления конденсаторов с технологическими процессами изготовления других элементов ГИС.

Характеристики конденсаторов определяются свойствами применяемых материалов. К диэлектрику конденсаторов предъявляются следующие требования: высокие – диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность и сопротивление изоляции; малые – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости и диэлектрические потери, хорошая адгезия, совместимость с технологическими процессами изготовления других элементов микросхем.

Диэлектрик конденсатора формируется методами термического напыления, ионно-плазменного и реактивного распыления.

Для изготовления диэлектрических тонких пленок применяют монооксиды кремния SiO и германия GeO, оксиды алюминия Al₂O₃, tantalа Ta₂O₅, титана TiO₂ и редкоземельных металлов. Высокие удельные емкости имеют титанаты бария и кальция. При изготовлении диэлектрических слоев толстопленочных конденсаторов используют пасты, которые содержат титанат бария или диоксид титана, имеющие высокую диэлектрическую проницаемость.

Материал обкладок конденсатора должен удовлетворять следующим требованиям: иметь низкое электрическое сопротивление обкладок, хорошую адгезию, обладать низкой миграционной подвижностью атомов, высокой коррозионной стойкостью.

Подгоняемые конденсаторы. Иногда возникает необходимость конструирования пленочных конденсаторов с повышенной точностью воспроизведения емкости, превосходящей технологические возможности способа их изготовления, а также конденсаторы, емкость которых может изменяться в определенных пределах. Подгонка может осуществляться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения емкости. Конструкция подгоняемого конденсатора имеет подгоночные секции. Подгоночные секции можно произвольно размещать по сторонам верхней обкладки. При подгонке возможно увеличение емкости

конденсатора с помощью проволочных перемычек. Добавочная емкость определяется площадью обкладки дополнительно подключаемой секции.

Пленочные индуктивные элементы. Такие элементы широко распространены в аналоговых ИМС. Индуктивные элементы входят в состав колебательных контуров автогенераторов, полосовых фильтров, цепей коррекции частотных характеристик и т.д. Толщина пленочной спирали зависит от рабочей частоты и определяется глубиной проникновения электромагнитной волны в материал пленочного проводника. Для изготовления пленочных спиралей применяют материалы с высокой электропроводностью.

Элементы коммутации. Такие элементы (проводники и контактные площадки) служат для электрического соединения компонентов и элементов ГИС между собой, а также для присоединения к выводам корпуса.

Электрофизические свойства коммутационных проводников и контактных площадок определяются свойствами применяемых материалов, к которым предъявляются следующие требования: высокая электропроводность; хорошая адгезия к подложке; высокая коррозионная стойкость; обеспечение низкого и воспроизводимого переходного сопротивления контактов; возможность пайки или сварки выводов навесных компонентов; совместимость технологии нанесения пленочных коммутационных проводников и контактных площадок с технологией изготовления других элементов микросхем. Самым распространенным материалом тонкопленочных проводников и контактных площадок в ГИС повышенной надежности является золото с подслоем хрома, никрома или титана. Подслой обеспечивает высокую адгезию, а золото – нужную электропроводность, высокую коррозионную стойкость, возможность пайки и сварки.

Пленочные переходные контакты. Контактный узел двух пленочных элементов ГИС обладает определенным сопротивлением, зависящим от геометрии и размеров контакта, электропроводности контактирующих материалов, удельного переходного сопротивления контакта.

Под удельным переходным сопротивлением понимают сопротивление единицы площади контактного перехода току, протекающему по нормали к слоям контакта. Это сопротивление обусловлено рассеянием носителей тока на неоднородностях в месте соприкосновения двух металлических материалов; скачкообразным изменением атомной и электронной структуры, а также наличием инородных включений в месте контакта. Следовательно, значение удельного переходного сопротивления существенно зависит от природы контактирующих материалов, а также условий и способа их формирования.

3. Компоненты ГИС

Компоненты ГИС могут иметь жесткие и гибкие выводы. Недостатком компонентов с гибкими выводами является трудность автоматизации процессов их монтажа и сборки. Применение компонентов с шариковыми выводами затрудняет контроль процесса сборки. Приборы с балочными выводами дороги, но позволяют автоматизировать сборку, контролировать ее качество, увеличить плотность монтажа.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. Технологические маршруты производства тонкопленочных ГИС

Совокупность технологических операций, составляющих технологический маршрут производства тонкопленочных ГИС, включает в себя подготовку поверхности подложки, нанесение пленок на подложку и формирование конфигураций тонкопленочных элементов, монтаж и сборку навесных компонентов, защиту и герметизацию ГИС от внешних воздействий. Важное значение при создании ГИС имеют контрольные операции, а также подготовка производства: изготовление комплекта масок и фотошаблонов, контроль компонентов ГИС и исходных материалов.

Нанесение пленок на подложку ГИС осуществляется:

- а) термическим испарением материалов в вакууме с конденсацией паров этих материалов на поверхность подложки;
- б) ионным распылением мишени из наносимых материалов с переносом атомов мишени на поверхность подложки;
- в) химическим осаждением пленок в результате протекания химических реакций в газовой фазе над поверхностью подложки с образованием пленкообразующего вещества с последующим его осаждением на подложку.

Для формирования конфигураций проводящего, резистивного и диэлектрического слоев используют различные методы: масочный (соответствующие материалы напыляют на подложку через съемные маски); фотолитографический (пленку наносят на всю поверхность подложки, после чего вытравливают с определенных участков); электронно-лучевой (некоторые участки пленки удаляют по заданной программе с подложки путем испарения под воздействием электронного луча); лазерный (аналогичен электронно-лучевому, только вместо электронного применяют луч лазера). Наибольшее распространение получили два первых способа, а также их сочетания.

Масочный метод. Самым простым методом получения заданной конфигурации пленочных элементов является масочный, при котором нанесение каждого слоя тонкопленочной структуры осуществляется через специальный трафарет. При масочном методе рекомендуется такая последовательность формирования слоев ГИС: напыление резисторов, проводников и контактных площадок; межслойной изоляции; второго слоя для пересечения проводников; нижних обкладок конденсаторов; диэлектрика; верхних обкладок конденсаторов; защитного слоя. Пленка из напыляемого материала осаждается на подложке в местах,

соответствующих рисунку окон в маске. В качестве материала съемной маски используют ленки бериллиевой бронзы толщиной 0,1-0,2 миллиметра, покрытую слоем никеля толщиной около 10 мкм.

Нанесение пленок через съемные маски осуществляют термическим испарением в вакууме либо ионно-плазменным распылением.

В результате коробления маски в процессе напыления пленки между маской и подложкой образуется зазор, приводящий к подпылу. Кроме того, размеры окон в маске при многократном напылении уменьшаются. Все это обуславливает меньшую точность данного метода по сравнению с фотолитографическим.

Несмотря на недостатки масочный метод является самым простым, технологичным и высокопроизводительным.

Метод фотолитографии. Этот метод позволяет получить конфигурацию элементов любой сложности и имеет большую точность по сравнению с масочным, однако он более сложен.

Существует несколько разновидностей фотолитографии. Метод прямой фотолитографии предусматривает нанесение сплошной пленки материала тонкопленочного элемента, формирования на ее поверхности фоторезистивной контактной маски, вытравливание через окна в фоторезисте лишних участков пленки. Контактная маска из фоторезиста или другого материала, более стойкого к последующим технологическим воздействиям, воспроизводит рисунок фотошаблона из пленки.

Экспонированный фоторезист удаляется (растворяется) после чего пленка резистивного материала стравливается с участков, не защищенных фоторезистом. Далее на подложке в вакууме наносится сплошная пленка алюминия. После фотолитографии и травления алюминия проводящая пленка остается в областях контактных площадок и проводников. При этом сформированные на предыдущем этапе резисторы не повреждаются. После нанесения поверх проводящих элементов и резисторов защитного слоя стекла проводится еще одна, третья фотолитографическая обработка, в результате которой стекло удаляется из областей над контактными площадками, а также по периметру платы.

Метод обратной (взрывной) фотолитографии отличается от предыдущего тем, что сначала на подложке формируется контактная маска, затем наносится материал пленочного элемента, после чего производится удаление контактной маски.

При фотолитографическом методе для изготовления ГИС, содержащих резисторы и проводники, используют два технологических маршрута. Первый вариант – напыление материала резистивной и проводящей пленок; фотолитография проводящего слоя; фотолитография резистивного слоя; нанесение защитного слоя. Второй вариант – после проведения первых двух операций, тех же что и в предыдущем варианте, сначала осуществляют фотолитографию и травление одновременно проводящего и резистивного слоев, затем вторую фотолитографию для

стравливания проводящего слоя в местах формирования резистивных элементов, после чего следует нанесение защитного слоя и фотолитография для вскрытия окон в нем над контактными площадками.

При производстве пленочных микросхем, содержащих проводники и резисторы из двух различных (высокоомного и низкоомного) резистивных материалов, рекомендуется такая последовательность операций: поочередное напыление пленок сначала высокоомного, затем низкоомного резистивных материалов; напыление материала проводящей пленки; фотолитография проводящего слоя; фотолитография низкоомного резистивного слоя; фотолитография высокоомного резистивного слоя; нанесение защитного слоя.

Комбинированный метод. При совмещении масочного и фотолитографического методов для микросхем, содержащих резисторы, проводники и конденсаторы, используют два варианта:

1) напыление резисторов через маску, напыление проводящей пленки на резистивную; фотолитография проводящего слоя; поочередное напыление через маску нижних обкладок, диэлектрика и верхних обкладок конденсатора; нанесение защитного слоя;

2) напыление резистивной пленки и проводящей пленки на резистивную; фотолитография проводящего и резистивного слоев; фотолитография проводящего слоя; напыление через маску нижних обкладок, диэлектрика и верхних обкладок конденсатора; нанесение защитного слоя.

Для схем, не содержащих конденсаторов, применяют один из трех вариантов:

1) напыление через маску резисторов и проводящей пленки; фотолитография проводящего слоя; нанесение защитного слоя;

2) напыление резистивной пленки; фотолитография резистивного слоя; напыление через маску проводников и контактных площадок; нанесение защитного слоя;

3) напыление резистивной пленки, а также контактных площадок и проводников через маску; фотолитография резистивного слоя; нанесение защитного слоя.

2. Технологические маршруты производства толстопленочных ГИС

После очистки и отжига платы на нее наносят и вжигают с обеих сторон проводниковую пасту для формирования проводников, контактных площадок и нижних обкладок конденсаторов, после чего формируют диэлектрик для конденсаторов и пересечений проводников. Верхние обкладки и пленочные перемычки изготавливают из одной пасты. Последними формируют резисторы, имеющие самую низкую температуру вжигания. После обслуживания контактных площадок производят лазерную подгонку резисторов. Заключительные сборочные операции: установка выводов, монтаж навесных компонентов и герметизация

опрессовкой с использованием пластмассы, после чего производят обрезание рамки и разъединение выводов.

3. Нанесение тонких пленок в вакууме

Наиболее распространенными методами получения тонких пленок различных материалов в вакууме являются методы термического испарения и ионного распыления.

К процессам термического испарения относится испарение: а) из резистивных испарителей, включая взрывное испарение с применением вибропитателей; б) из тиглей с радиационным и высокочастотным индукционным нагревом; в) с помощью электронно-лучевых испарителей (за счет сфокусированного луча). К процессам ионного распыления относится: а) катодное (диодная система); б) ионно-плазменное (триодная система); в) с помощью сфокусированных ионных пучков; г) магнетронное.

Достоинствами метода термического испарения материалов и их конденсации в вакууме являются: реализация высоких скоростей осаждения материалов в высоком вакууме, простота, отработанность технологических операций и наличие современного высокопроизводительного оборудования.

Основными достоинствами методов ионного распыления материалов являются: возможность распыления практически всех материалов современной микроэлектроники, в том числе различных соединений (нитридов, оксидов и т.д.) при введении в газоразрядную плазму реакционно-способных газов (реактивное распыление); высокая адгезия получаемых пленок к подложкам; однородность пленок по толщине; очистка поверхности подложек с помощью ионной бомбардировки как перед, так и в процессе осаждения пленки.

Метод термовакуумного напыления. Метод основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсации его на поверхности подложек, имеющих температуру ниже температуры источника пара. Пленка при конденсации формируется из отдельных атомов или молекул пара вещества. Процесс термовакуумного напыления состоит из четырех этапов: 1) образование пара вещества; 2) перемещение частиц пара от источника к подложкам; 3) конденсация пара на подложках; 4) образование зародышей и рост пленки.

В данном случае равномерность толщины пленок по площади подложек будет неудовлетворительной. Толщина пленки максимальна в центре подложки, то есть на участке, расположенном непосредственно над испарителем и убывает к периферии подложки. Равномерность можно повысить за счет увеличения расстояния между испарителем и подложкой, но при этом уменьшается скорость напыления. Высокой равномерности толщины пленок на больших поверхностях добиваются, применяя приемные устройства сферической формы или динамические системы приемных устройств, врачающиеся относительно неподвижных испарителей. Равномерность толщины пленок в большой партии подложек достигается в установках с

подколпачными устройствами, обеспечивающими равномерное вращение подложек, закрепленных вертикально на образующих цилиндрах, вокруг испарителей, расположенных по центральной оси цилиндра. Применяются также динамические системы, в которых испарители и подложки располагаются с внешней стороны барабана. Преимуществами динамических систем являются: высокая равномерность толщины распыляемых пленок, качественное нанесение пленок на подложки, имеющие сложный вертикальный профиль, ступеньки и узкие канавки; уменьшение расстояния между испарителем и подложками и увеличение за счет этого скорости осаждения пленок.

Метод ионного распыления. Источником иона служит самостоятельный тлеющий разряд либо плазма несамостоятельного разряда (дугового или высокочастотного) инертных газов (обычно высокой чистоты аргона). Существует большое разнообразие процессов ионного распыления, отличающихся характером напряжения питания (постоянное, переменное, высокочастотное), способом возбуждения и поддержания разряда, числом и конструкцией электродов и т.д.

При бомбардировке положительными ионами инертного газа поверхность катода одновременно подвергается воздействию молекул остаточных активных газов. Это приводит к образованию оксидных пленок на катоде, которые резко снижают скорость распыления (часть оксида переносится на подложку). На поверхности подложки вместе с распыленными атомами присутствуют и отрицательно заряженные активные ионы остаточных газов, которые также способствуют формированию оксидных пленок.

Нанесение толстых пленок

Толстопленочные ГИС выполняют методом трафаретной печати последовательным нанесением на керамическую подложку различных по составу паст и их последующим вжиганием, в результате образуется прочная монолитная структура с толщиной пленки 10-70 мкм.

Функциональные материалы придают пленкам необходимые физические свойства. В процессе вжигания эти частицы должны оставаться в твердой фазе и равномерно распределяться в стекле по объему формируемого элемента.

В зависимости от состава функциональной составляющей различают проводниковые, резистивные и диэлектрические пасты.

Проводниковые пасты содержат порошок благородных металлов (серебро, смесь серебро-палладий, золото), который составляет 70-80 % от общей массы твердой фазы пасты. Палладий вводят для снижения коррозии и миграции, а также уменьшения стоимости пасты. Проводниковые пасты должны обеспечить низкое электрическое сопротивление проводников, способность их к пайке.

В резистивных пастах количество функционального материала определяется удельным сопротивлением. Наибольшее применение нашли резистивные пасты на

основе палладия и соединений рутения. В первой из них свойства резистора определяются оксидом палладия, образующимся во время вжигания.

Более высокой стабильностью сопротивления, меньшей чувствительность к колебаниям температуры вжигания обладают резисторы, выполненные на основе диоксида рутения. Поэтому резистивные пасты на основе соединений рутения становятся преобладающими в толстопленочной технологии.

Диэлектрические пасты применяют для изготовления конденсаторов.

Нанесение паст производится на установке трафаретной печати продавливанием пасты через отверстие сетчатого трафарета.

Для изготовления толстопленочных ГИС требуется комплект трафаретов для нанесения определенного пленочного слоя: проводникового, одного или нескольких резистивных, изолирующих и т.д. Каждому трафарету соответствует определенный фотошаблон.

Основным элементом трафарета является сетка из нейлона или нержавеющей стали с размером ячейки 80-240 мкм. Выбор размера ячейки определяется требованиями толщины и ширины пленочных элементов. Сетка натягивается на держатель – алюминиевую рамку, зажимается и обрезается по краям. Размер рамки должен обеспечить расстояние 25-50 мм от краев рисунка схемы до краев трафарета. На натянутую сетку наносится слой фоточувствительной эмульсии. Методом фотолитографии формируется необходимый рисунок. После травления образуются окна в эмульсионном слое, обнажающие сетку, через которые при нанесении будет продавливаться паста.

Очищенная подложка устанавливается в держатель подложки установки трафаретной печати, сверху помещают держатель трафарета с требуемым трафаретом. На него подают соответствующую пасту и с помощью ракеля наносят ее на подложку. Ракель заполняет пастой отверстия в трафарете, прогибает его до соприкосновения с подложкой и продавливает пасту через отверстия в трафарете. Благодаря свойству тиксотропности слой нанесенной пасты не расплывается по подложке, сохраняя рисунок, заданный трафаретом. От материала и формы рабочей части ракеля зависит качество трафаретной печати. Рабочую часть ракеля изготавливают из уретана или полиуретана. В течение рабочего хода ракель должен плотно прилегать к трафарету, обеспечивая постоянство давления, оказываемого на пасту, что достигается благодаря держателю ракеля.

Кроме трафаретной печати можно наносить резистивные пасты под давлением с помощью пневматического дозатора.

После нанесения производится сушка и вжигание пасты. При сушке (120-2000°C) происходит удаление летучих органических растворителей. Лучше использовать инфракрасную сушку. При других методах сушки на поверхности слоя пасты может образоваться корка, препятствующая выходу летучих веществ, вследствие чего после вжигания пленка может быть пористой и содержать раковины.

Сборка ГИС заключается в установке на подложку навесных компонентов и их электрическом присоединении к пленочным проводникам. В качестве навесных компонентов используют полупроводниковые бескорпусные ИМС и БИС, а также различные электрорадиоэлементы.

Пленочные конденсаторы занимают большую площадь на подложке, требуют нескольких циклов нанесения и вжигания. Трудоемкость изготовления толстопленочных конденсаторов ограничивает их применение, поэтому в толстопленочных ГИС чаще применяют навесные конденсаторы. В толстопленочных ГИС обычно используют пленочные резисторы.

Дискретные полупроводниковые компоненты толстопленочных ГИС имеют балочные, гибкие проволочные и жесткие выводы. Монтаж навесных компонентов на подложку производят методом пайки мягким припоем или с помощью токопроводящих клеев.

Изготовленную толстопленочную ГИС устанавливают в корпус и герметизируют. Надежность ГИС, стабильность ее параметров обеспечиваются на всех этапах изготовления.

Применение ГИС микросхем в микроэлектронной аппаратуре

В аналоговой аппаратуре ГИС по сравнению с полупроводниковыми ИМС имеют более широкие схемотехнические возможности благодаря использованию различных навесных компонентов (полупроводниковых ИМС, транзисторов, конденсаторов, индуктивных катушек и т.д.). ГИС позволяют реализовать широкий класс функциональных электронных схем – усилителей, преобразователей, коммутаторов, вторичных источников питания, являясь при этом экономически целесообразными в условиях серийного и даже мелкосерийного производства.

Полупроводниковые микросхемы

Подложки полупроводниковых микросхем обычно выполняют из монокристаллического кремния р-типа. Изготовление электронно-дырочных переходов полупроводниковых ИМС осуществляют обычно посредством эпитаксиального наращивания или способом диффузионно-планарной технологии. Планарная технология подразумевает создание деталей и электрических соединений в подложке в одной плоскости. Эпитаксиальное наращивание заключено в напылении разогретого полупроводника на некоторые участки поверхности подложки. Диффузионная технология состоит в проникновении разогретых газообразных примесей в отведённые для этого участки подложки. В результате возникают многослойные образования, каждый слой которых обладает заданным типом проводимости. Резисторы, конденсаторы и прочие пассивные компоненты полупроводниковых ИМС обладают много большими габаритами, чем активные компоненты, такие как транзисторы.

1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя:

1. Лабораторный стенд БИС-ЭР с комплектом электроизмерительных приборов (микроамперметров, многопредельных миллиамперметров, и вольтметров) и регулируемых источников питания БП-5, БП-15, БП-30 с различными величинами напряжений.
 2. Испытательный макет с набором различных гнезд для подключения микросхем и измерительных приборов.
 3. Исследуемые интегральные микросхемы (ИМС).

Измерительная схема для снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) интегральных микросхем представлена на рисунке 1. Схема содержит исследуемую ИМС, резисторы R_1, R_4 и R_5 , которые служат для создания напряжений, соответствующих уровню логической единицы «1» на входах 3, 4 и 5 логической микросхемы, резистор R_6, R_7 и R_8 , образующие сопротивление нагрузки, и переменный резистор R_2 , необходимый для плавной регулировки входного напряжения.

Миллиамперметр РА1 служит для измерения входного тока ИМС, вольтметры РУ1 и РУ2 служат для измерения входного и выходного напряжений, соответственно. Источником питания исследуемой ИМС служит БП-15. Питание подается на клеммы «+5В» и «-5В» макета. Клеммы макета 3-5 «являются входами исследуемой микросхемы, а 6 – ее выходом.

Соединения элементов схемы производится изолированными проводами минимально необходимой длины.

Справочные данные о номинальных и предельно допустимых значениях параметров режимов некоторых типов ИМС приведены в приложении.

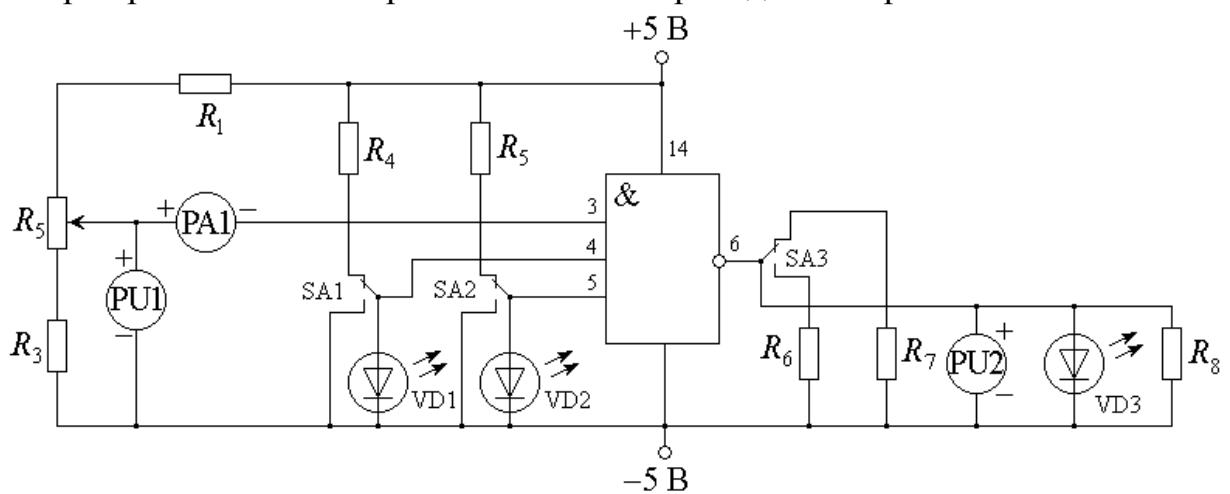


Рисунок 1 - Измерительная схема для снятия вольт-амперных характеристик интегральных микросхем

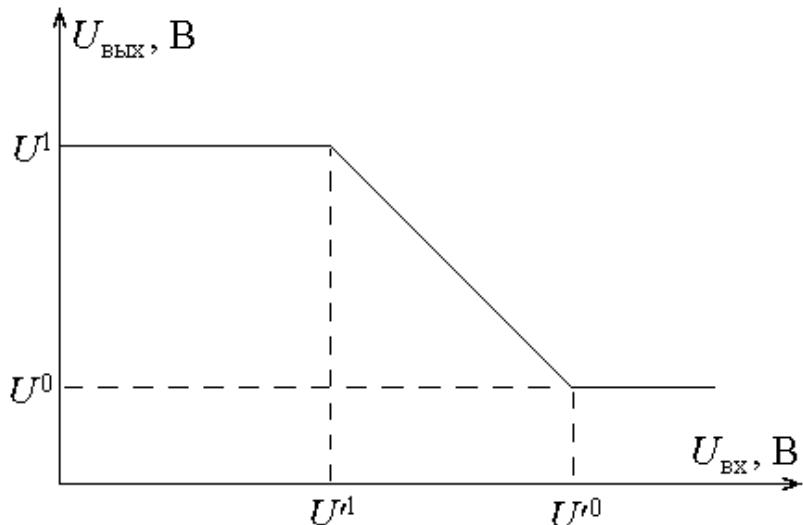


Рисунок 2 – Передаточная характеристика ИМС

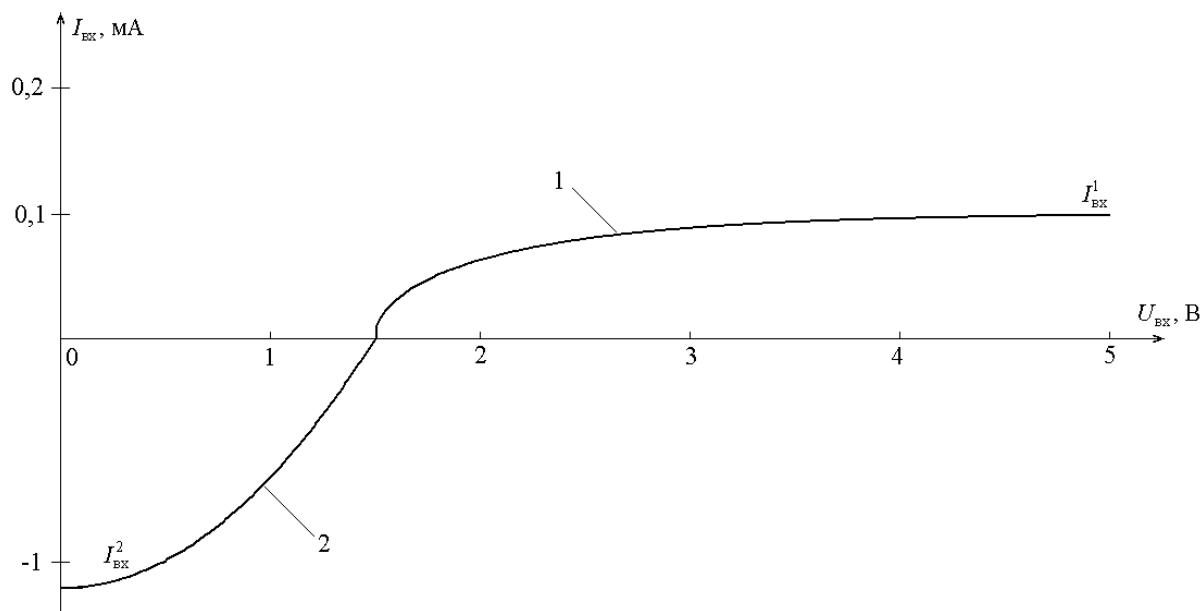


Рисунок 3 – Входная ВАХ ИМС

1. Привести графическое изображение и таблицы истинности для позитивной логики микросхемы К155ЛА4.

1. Снять передаточную характеристику ИМС $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$:

- определите диапазон изменения входного напряжения ($U_{\text{вх}1}, U_{\text{вх}2}$), при котором происходит изменение напряжения на выходе микросхемы;
- разбейте диапазон на 8 – 10 точек и произведите измерение выходного напряжения в каждой точке;
- измерьте выходное напряжение в 1 – 2 точках слева и справа от границ данного диапазона;
- результаты измерений занесите в таблицу 1.

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}, \text{В}$ | | | | | | | | |
| $U_{\text{вых}}, \text{В}$ | | | | | | | | |

- изобразите график передаточной характеристики.
2. По графику передаточной характеристики определить следующие параметры:

- Напряжения;
 - коэффициент передачи по напряжению на переходном участке K_U ;
3. Снять входную ВА-характеристику $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$:

Таблица – Результаты измерения входной характеристики

| | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}, \text{В}$ | | | | | | | | |
| $I_{\text{вх}}, \text{В}$ | | | | | | | | |

3. Сделать выводы по результатам измерений:
- сравнить уровни логического «0» и логической «1» на выходе микросхемы,
 - объясните вид входной характеристики микросхемы.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Измерительная схема с указанием типа исследуемых ИМС, а также их паспортные данные.
4. Таблицы с результатами измерений по каждому пункту.
5. Графики снятых характеристик.
6. Результаты расчета параметров по снятым характеристикам.
7. Краткие выводы с анализом полученных результатов.

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

**«Изучение фотоэлементов с внешним
фотоэффектом. Изучение конструкции и
характеристик фотоэлектронных приборов»**

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Изучение конструкции и характеристик фотоэлектронных приборов.

Цель работы: Изучить принцип действия усилителя, влияние напряжения питания на коэффициент усиления.

Методические материалы

Фотоэлектрическими называют приборы, в которых энергия оптического излучения преобразуется в электрическую. В зависимости *от длины волн* оптическое излучение подразделяется на *ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное*. Действие фотоэлектрических приборов основано на *явлении фотоэлектрического эффекта*, которым называется процесс полного или частичного освобождения заряженных частиц в веществе в результате поглощения фотонов. Различают внутренний и внешний фотоэффект.

Внутренним фотоэффектом называются перераспределение электронов по энергетическим состояниям в результате поглощения фотонов, которое сопровождается образованием дополнительных носителей зарядов или возникновением внутренней фото-ЭДС.

Фото-ЭДС – электродвижущая сила, возникающая в полупроводнике на *p-n*-переходе под действием оптического излучения.

Внешним фотоэффектом называется явлением фотоэлектронной эмиссии, т. е. процесс электронной эмиссии, обусловленный энергией падающего оптического излучения.

Фотоэлектрические приборы классифицируют по виду рабочей среды, типу фотоэлектрического эффекта, функциональному назначению и др.

По виду рабочей среды фотоэлектрические приборы подразделяют на электровакуумные и полупроводниковые.

В зависимости от типа фотоэффекта, лежащего в основе действия прибора, различают фотоэлектрические приборы с внешним фотоэффектом (электровакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители), фотоэлектрические приборы, действие которых основано на внутреннем фотоэффекте (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, полупроводниковые фотоэлементы).

В зависимости от функционального назначения фотоэлектрические приборы подразделяются на фотоприёмники, фотодатчики и фотоэлектрические преобразователи энергии оптического излучения в электрическую.

Фотоприёмники преобразуют световой сигнал в электрический и *применяются*, например, в аппаратуре факсимильной связи, устройствах считывания информации в вычислительной технике, киноаппаратуре. К особой группе фотоприёмников относят

телеизионные передающие трубы. Фотодатчики предназначены для преобразования измеряемой величины (деформации, давления и т. д.) в электрический сигнал.

Простейший фотодиод представляет собой обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на *p-n*-переход.



В равновесном состоянии, когда поток излучения полностью отсутствует, концентрация носителей, распределение потенциала фотодиода полностью соответствуют обычной *p-n*-структуре.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном плоскости *p-n*-перехода, в результате поглощения фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещенной зоны, в *n*-области возникают электронно-дырочные пары. Эти электроны и дырки называют *фотоносителями*.

При диффузии фотоносителей в глубь *n*-области основная доля электронов и дырок не успевает рекомбинировать и доходит до границы *p-n*-перехода. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем *p-n*-перехода, причем дырки переходят в *p*-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы *p-n*-перехода и *n*-области. Таким образом, ток через *p-n*-переход обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется **фототоком**.

Фотоносители – дырки заряжают *p*-область положительно относительно *n*-области, а фотоносители – электроны – *n*-область отрицательно по отношению к *p*-области. Возникающая разность потенциалов называется *фото-ЭДС* (*Е_ф*).

Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов – без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора) или с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя).

Фотодиоды, работающие в режиме **фотогенератора**, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются солнечными элементами и входят в состав солнечных батарей, используемых на космических кораблях.

При работе фотодиода в **фотопреобразовательном режиме** источник питания Е включается в цепь в запирающем направлении (рис.1, а). Используются обратные ветви ВАХ фотодиода при различных освещенностях (рис.1,б).

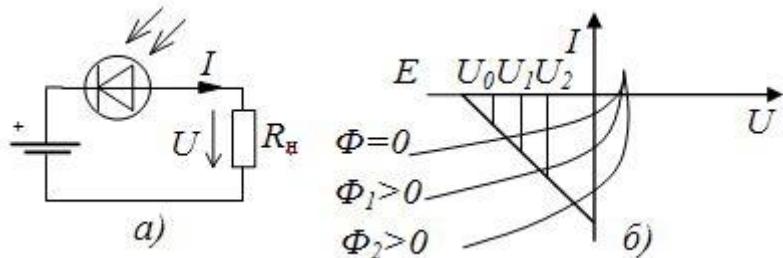


Рис. 1. Схема включения фотодиода в фотопреобразовательном режиме: а - схема включения, б - ВАХ фотодиода.

При отсутствии освещенности фотодиод работает в режиме обычного диода. **Ток**, проходящий в цепи фотоэлемента при отсутствии оптического излучения, называется **темновым**. Темновой ток у германиевых фотодиодов равен 10 - 30 мкА, у кремниевых 1 - 3 мкА.

Кроме фотодиодов, применяются **фоторезисторы** (рис 2), фототранзисторы и фототиристоры, в которых используется внутренний фотоэффект.

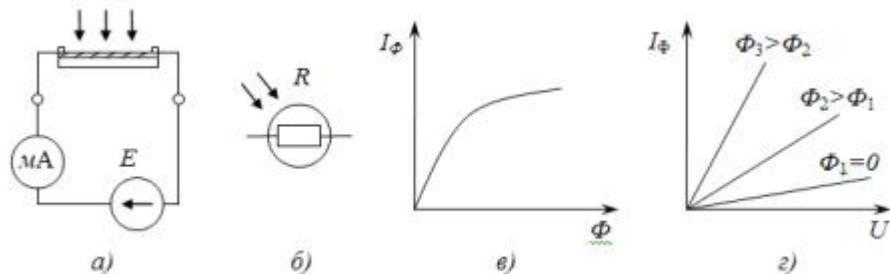


Рис. 2. Схема включения фоторезистора (а), УГО (б), энергетическая (в) и вольт-амперная (г) характеристики фоторезистора.

Конструкция **фототранзистора** подобна обычному транзистору, у которого в корпусе имеется окошко, через которое может освещаться база. УГО фототранзистора – транзистор с двумя стрелками, направленными к нему.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие пары «светодиод – фотодиод», называются **оптронами** (рис. 3).

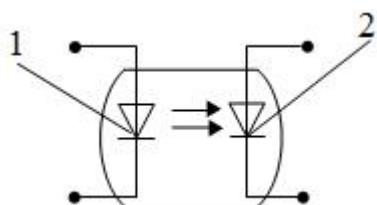


Рис. 3. Оптрон: 1 – светодиод, 2 – фотодиод

Электровакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.

Электровакуумные фотоэлементы. Принцип действия электровакуумных фотоэлементов основан на внешнем фотоэффекте. Для того чтобы электрон покинул поверхность катода, ему необходимо сообщить дополнительную энергию, достаточную для совершения работы выхода $A_{\text{вых}}$.

Фотоэлектронные умножители. Фотоэлектронным умножителем называется электровакуумный прибор, преобразующий энергию оптического излучения в электрические сигналы и содержащий фотокатод, анод и вторично-электронный умножитель, в котором поток электронов умножается вследствие вторичной электронной эмиссии. Между фотокатодом и анодом расположены эмиттеры вторичных электродов – *диноды*. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) представляет собой электровакуумный прибор, в котором электронный фотоэлемент дополнен устройством для усиления фототока за счет второйной электронной эмиссии.

Световой поток Φ , падающий на фотокатод, вызывает фотоэлектронную эмиссию, пропорциональную интенсивности потока. Так как электроны покидают фотокатод под различными углами, для их фокусировки необходима электронно-оптическая система, состоящая из фокусирующего электрода и диафрагмы. Попав на первый динод, электроны вызывают вторичную эмиссию, характеризуемую коэффициентом второйной эмиссии Q .

Основными параметрами фотоэлектронных умножителей являются световая анодная чувствительность, анодное напряжение и напряжение между динодами. **Световая анодная чувствительность** (А/лм) – это отношение выходного (анодного) тока к световому потоку, излучаемому в направлении фотокатода эталонной лампой: $K_a = I_a / \Phi$. Фотоэлектронные умножители применяют для измерения слабых световых потоков в ядерной физике, установках для излучения кратковременных процессов, устройствах телевизионной и лазерной техники.

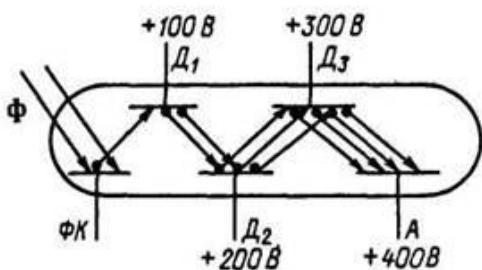


Рис. Принцип устройства и работы ФЭУ

Принцип работы ФЭУ иллюстрирован на рисунке. Световой поток Φ вызывает электронную эмиссию из фотокатода ФК. Фотоэлектроны под действием ускоряющего электрического поля направляются на электрод Д1 называемый динодом. Он является анодом по отношению к фотокатоду и одновременно играет роль вторично-электронного эмиттера. Динод делается из металла с сильной и устойчивой вторичной электронной эмиссией. Поэтому первичные электроны (ток I_Φ), идущие с фотокатода,

выбиваются из динода D_1 вторичные электроны, число которых в σ раз больше числа первичных электронов (σ -коэффициент вторичной эмиссии динода D_1 обычно равный нескольким единицам). Таким образом, ток вторичных электронов с первого динода $I_1 = \sigma I_\phi$. Ток I_1 направляется на второй динод D_2 , имеющий более высокий положительный потенциал. Тогда от динода D_2 за счет вторичной эмиссии начинается ток электронов I_2 , который в σ раз больше тока I_1 (для упрощения считается, что у всех динодов коэффициент вторичной эмиссии один и тот же), т. е. $I_2 = \sigma I_1 = \sigma^2 I_\phi$. В свою очередь, ток I_2 направляется на третий динод D_3 , у которого положительный потенциал еще выше, и от этого динода течет ток электронов $I_3 = \sigma I_2 = \sigma^3 I_\phi$, и т. д.

С последнего, n -го, динода D_n электронный ток I_n направляется на анод A , и тогда ток анода $I_a = I_n = \sigma_n I_\phi$. Таким образом, коэффициент усиления тока $k_i = \sigma_n$.

Например, если $\sigma = 10$ и $n = 8$, то $k_i = 108$.

Поскольку на каждом следующем диноде напряжение выше, чем на предыдущем, то анодное напряжение должно быть высоким (1-2 кВ), что является недостатком ФЭУ. Обычно питание ФЭУ осуществляется через делитель, на который подается полное анодное напряжение. В цепь анода включается нагрузочный резистор R_H , с которого снимается выходное напряжение.

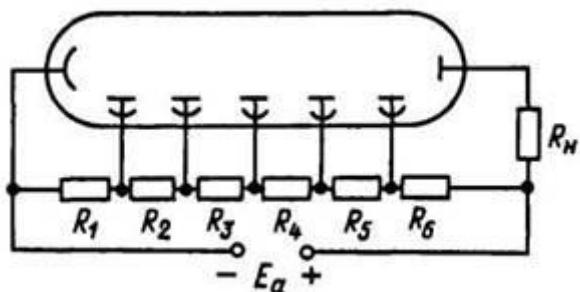
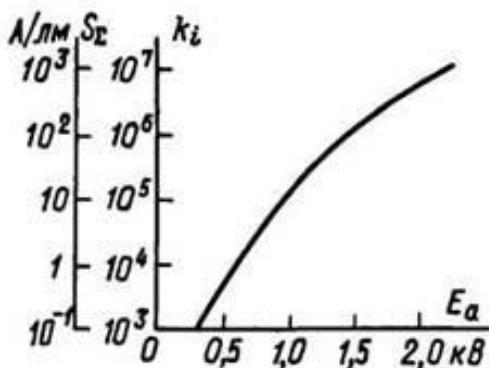


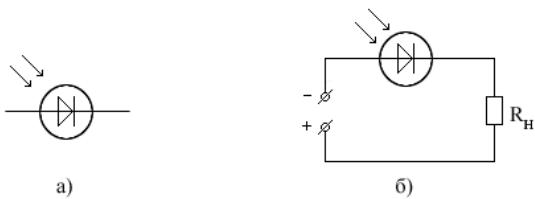
Схема включения ФЭУ.

Для ФЭУ, как и для обычных фотоэлементов, характерен темновой ток, обусловленный термоэлектронной эмиссией фотокатода и динодов. Он составляет малые доли микроампера. Этот ток может быть уменьшен охлаждением прибора.

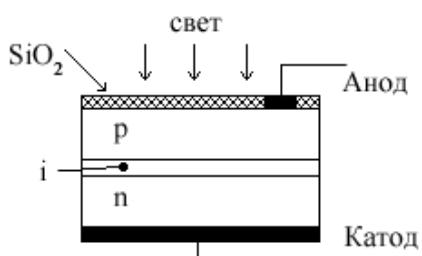


Зависимость коэффициента усиления тока и интегральной чувствительности от напряжения питания ФЭУ.

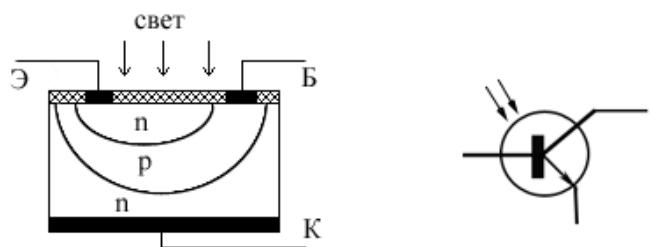
При освещении перехода увеличивается число «выбитых» квантами света электронов и образовавшихся на их месте дырок. Увеличивается обратный ток перехода, причем его величина зависит от освещенности перехода: $I_{\text{обр}}=f(\Phi)$, где Φ – световой поток. На этом основана работа фотодиода, к которому подключается источник обратного напряжения через сопротивление нагрузки. При увеличении светового потока увеличивается обратный ток и растет падение напряжения на нагрузке. Обозначение фотодиода на схемах и схема с фотодиодом приведены на рисунке.



Технология изготовления фотодиодов почти не отличается от технологии изготовления обычных полупроводниковых диодов. На кристалле полупроводника создают слои с p и n проводимостями. Один вывод образует контакт с подложкой, а другой – тонкий, прозрачный слой металла. Разработаны более чувствительные и быстродействующие фотодиоды с четырехслойными гетеропереходами, с барьером Шотки, кремниевые $p-i-n$ -диоды, которые все более вытесняют фотодиоды с $p-n$ -переходом. Структура $p-i-n$ -диода содержит слои полупроводника с p и n проводимостями, разделенные очень тонким i -слоем окиси кремния – изолятором. Обратный ток перехода в $p-i-n$ -структуре чрезвычайно мал, что увеличивает чувствительность к слабым световым потокам. Энергия носителей заряда, возбужденных квантами падающего света, оказывается вполне достаточной, чтобы преодолеть тонкий слой изолятора и создать фототок.

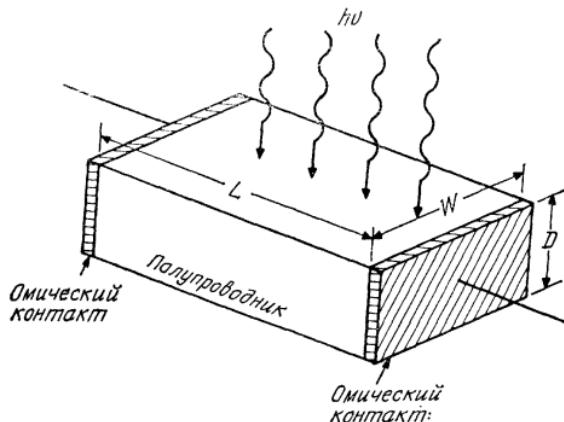


Работа **фототранзистора** также основана на фотопроводимости. Примерная структурная схема и обозначение фототранзистора приведены на рисунке.



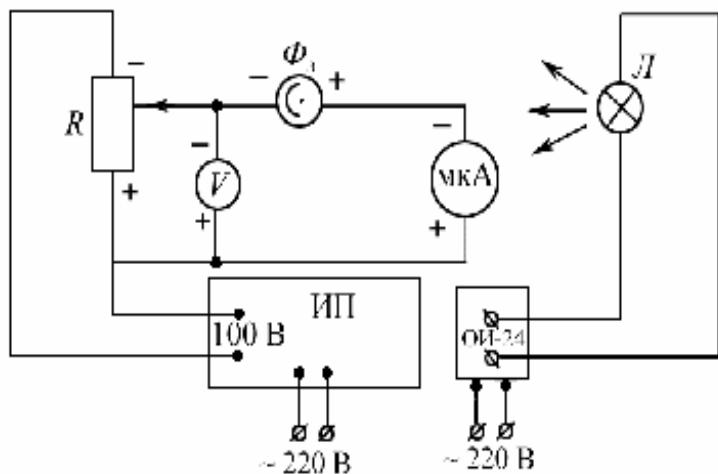
От обычного биполярного транзистора фототранзистор отличается только тем, что у него в области эмиттерного перехода имеется прозрачное окно, пройдя которое свет попадает в базу. Образовавшиеся благодаря квантам света носители заряда создают ток базы.

К пассивным типам фотоприемников можно отнести **фоторезисторы**. Они изготавливаются из полупроводника, но без *p-n*-перехода, то есть фоторезисторы ведут себя как обычные омические сопротивления. Под действием света в толще полупроводника появляются свободные носители заряда, резко снижающие сопротивление фоторезистора.



Описание экспериментальной установки

Фотоэлемент включается в электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 2.



На электроды фотоэлемента подается постоянное напряжение от источника питания. В источник питания встроен потенциометр (R), позволяющий менять напряжение. Сила тока измеряется миллиамперметром. Напряжение измеряется вольтметром. Источник света – лампа L включается в осветительную сеть 220 В. Для увеличения срока службы и улучшения работы фотоэлемент помещен в специальный футляр-оправу с открывающимся окошечком, которое должно быть закрытым, если измерения в данный момент не проводятся. Сила света I источника (L) известна. Световой поток, излучаемый источником в пределах телесного угла Ω , определяется по формуле $\Phi = \Omega I$.

Величина телесного угла может быть найдена, если известно расстояние от источника света r до освещаемой поверхности S

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

Сила света I указана на футляре осветителя, площадь открытого участка фотокатода измеряется в процессе работы: расстояние между фотоэлементом и лампой-осветителем изменяют в процессе работы, для изменения величины светового потока. Величину r определяют по шкале оптической скамьи, на которой устанавливаются приборы.

Задание

1. Измерьте световую характеристику фотоэлемента.
2. Определите интегральную чувствительность фотоэлемента.
3. Измерьте вольтамперную характеристику фотоэлемента.
4. Оцените наименьшее и наибольшее значения скорости электронов, вырываемых из катода фотоэлемента.

Порядок выполнения работы:

1. Включите в электрическую сеть (220 В) источник питания и с помощью потенциометра R установите на электродах фотоэлемента напряжение 50 В, которое при дальнейшей работе должно оставаться неизменным.
2. Откройте окошечко фотоэлемента и измерьте фототок. Запишите его значение и расстояние r в табл. 1.

| U , В | Увеличение расстояния r , м | Уменьшение расстояния r , м | Фототок, i_Φ | мкА | Среднее значение i_Φ | Φ , лм | K , мкА/лм |
|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|
| | | | увеличение r | уменьшение r | | | |
| | | | | | | | |

3. Уменьшая расстояние фотоэлемента до осветителя, вновь измерьте расстояние и соответствующий фототок. Вновь уменьшите расстояние его и фототок. Измерение фототока проведите для пяти-семи различных расстояний r , сначала при уменьшении, а затем при увеличении, в обратной последовательности.
4. Рассчитайте по формуле величину светового потока при различных расстояниях r .
5. Постройте по данным табл. 1 график зависимости $i_\Phi = f(\Phi)$; вычислите по формуле (2) интегральную чувствительность K и постройте график зависимости $K = f(\Phi)$ при постоянном напряжении.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. В каких единицах измеряется световой поток?
2. Как влияют на величину фототока частота и интенсивность света?
3. Нарисуйте график зависимости кинетической энергии фотоэлектрона от частоты падающего света. Какие величины можно вычислить, используя такой график?
4. В каком случае вырываемые фотоэлектроны попадают на анод?
5. Каков характер распределения по энергиям фотоэлектронов, вырываемых с поверхности фотокатода?
6. Что называют спектральной чувствительностью фотоэлемента?
7. Какое явление называют многофотонным фотоэффектом?
8. В чем состоит отличие внутреннего и внешнего фотоэффекта?

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение неуправляемых однофазных выпрямителей. Изучение выпрямителей и сглаживающих фильтров»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение неуправляемых однофазных выпрямителей. Изучение выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Цель работы: Изучить принцип действия выпрямителя.

Однофазные неуправляемые выпрямители широко используются в качестве источников питания различных электротехнических устройств. Нагрузка таких выпрямителей чаще всего имеет активный и активно-индуктивный характер. Выпрямительный блок ВБ состоит из следующих элементов: трансформатор ТР, выпрямитель В и нагрузка Н (рис. 1).

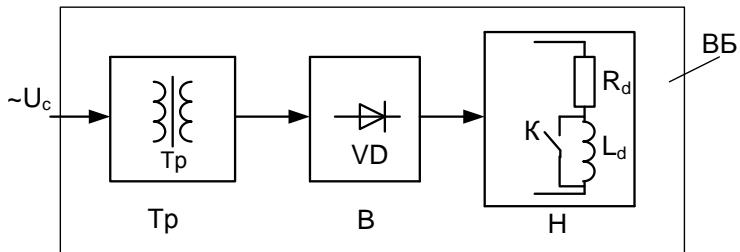


Рис. 1. Блоковая схема выпрямления переменного тока в постоянный.

Существует несколько схем однофазных неуправляемых выпрямителей:

- однополупериодная схема (рис. 2, а);
- двухполупериодная схема со средней точкой (нулевым выводом) трансформатора (рис. 2, б);
- двухполупериодная мостовая схема (рис. 2, в).

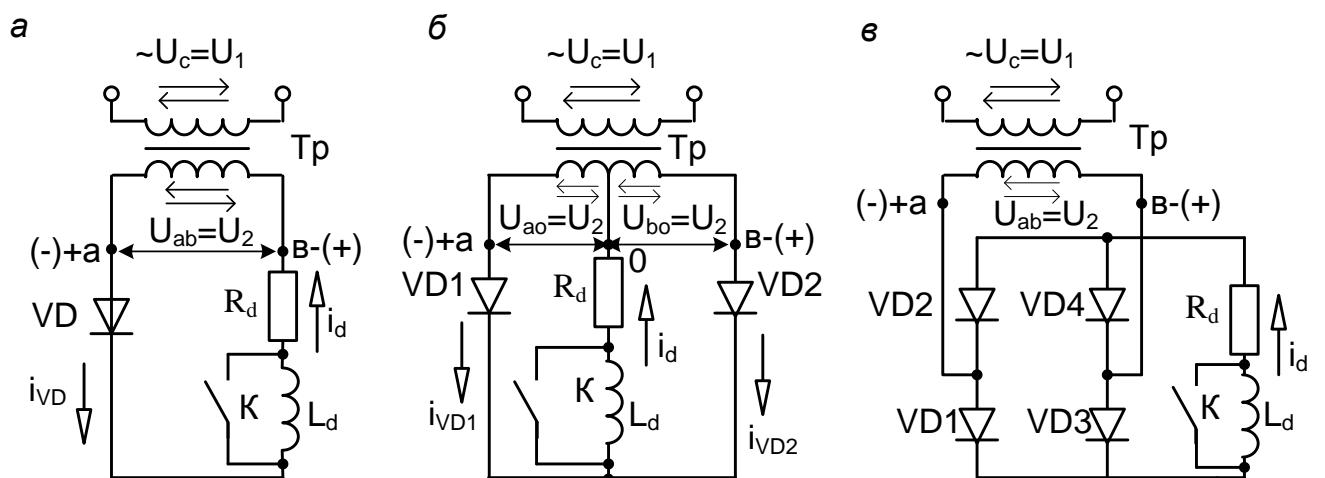


Рис. 2. Принципиальные схемы однофазных неуправляемых выпрямителей:

а – однополупериодная схема; б – двухполупериодная схема со средней точкой; в – двухполупериодная мостовая схема

Сглаживающие фильтры

Рассмотренные схемы выпрямителей имеют относительно большие значения коэффициента пульсаций. Между тем для питания электронной аппаратуры часто требуется выпрямленное напряжение с коэффициентом пульсаций, не

превышающим нескольких процентов. Для уменьшения пульсаций используют специальные устройства – сглаживающие фильтры.

Сглаживающий фильтр - это устройство, позволяющее уменьшить пульсации напряжения, получаемые на выходе выпрямителя. **Сглаживающими** считают фильтры, пропускающие с малым ослаблением постоянную составляющую и с большим ослаблением переменную составляющую. Основным из параметров сглаживающих фильтров является **коэффициент сглаживания** (фильтрации), который определяется отношением коэффициента пульсации на входе фильтра к коэффициенту пульсации на его выходе. $S = K_{\text{п.вх}} / K_{\text{п.вых}}$

где S - коэффициент сглаживания,

$K_{\text{п.вх}}$ - коэффициент пульсации на входе,

$K_{\text{п.вых}}$ - коэффициент пульсации на выходе.

Коэффициент сглаживания учитывает подавление пульсаций и передачу постоянной составляющей U . Для устройств, беспрепятственно передающих постоянную составляющую, коэффициент сглаживания – это деление пульсаций между нагрузкой и фильтром (при этом считается, что $U_{\text{вх}}$ приблизительно равно $U_{\text{н}}$).

Фильтры можно **классифицировать** следующим образом:

1. *По частотному составу различают:*

- низкочастотную пульсацию ($<300\text{Гц}$)
- высокочастотную пульсацию ($>300\text{Гц}$).

2. *По принципу действия:*

- a) пассивные
- б) активные

3. *По степени сложности:*

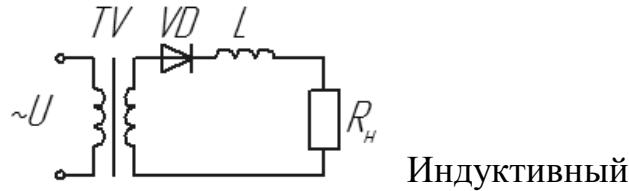
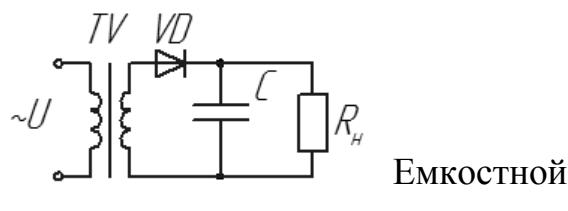
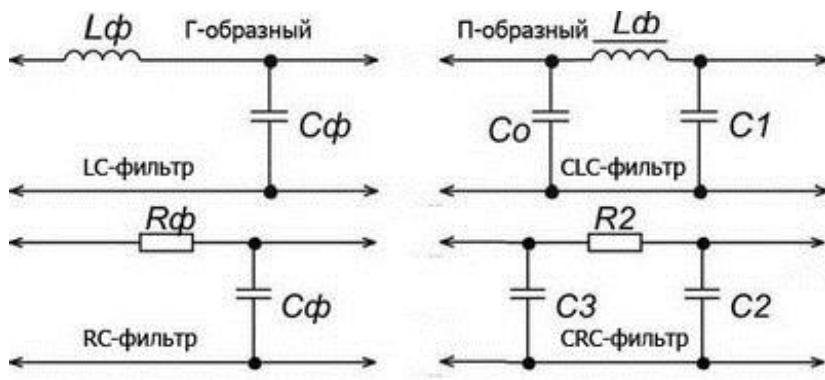
- a) простые (однозвенные)
- б) сложные (многозвенные или резонансные);

4. *По виду элементов:*

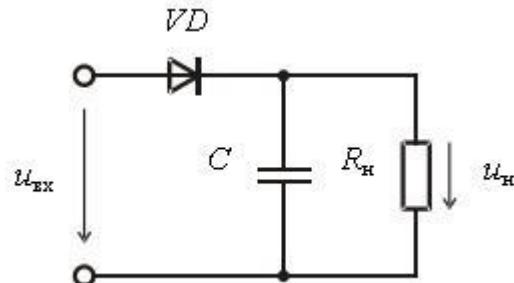
- a) LC-фильтры
- б) RC-фильтры.

Простейшим сглаживающим фильтром является конденсатор, включенный параллельно нагрузке (*емкостный фильтр*). Или можно включить дроссель, но уже последовательно с сопротивлением нагрузки (*индуктивный фильтр*).

При этом дроссель можно заменить на волновое сопротивление. Комбинация этих элементов дает еще больший эффект сглаживания. Варианты построения различных типов фильтров приведены ниже:



Простейшим является емкостный фильтр (C -фильтр). Рассмотрим его работу на примере однополупериодного выпрямителя (рис. 2).



Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора C (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.

Временные диаграммы напряжений и токов выпрямителя показаны на рис. 3. На интервале времени $t_1 - t_2$ диод открыт и конденсатор заряжается. На интервале $t_2 - t_3$ диод закрыт и конденсатор разряжается через сопротивление R_H . Для уменьшения пульсаций емкость конденсатора должна быть большой, чтобы постоянная времени разряда $R_H C$ была намного больше периода выпрямленного напряжения.

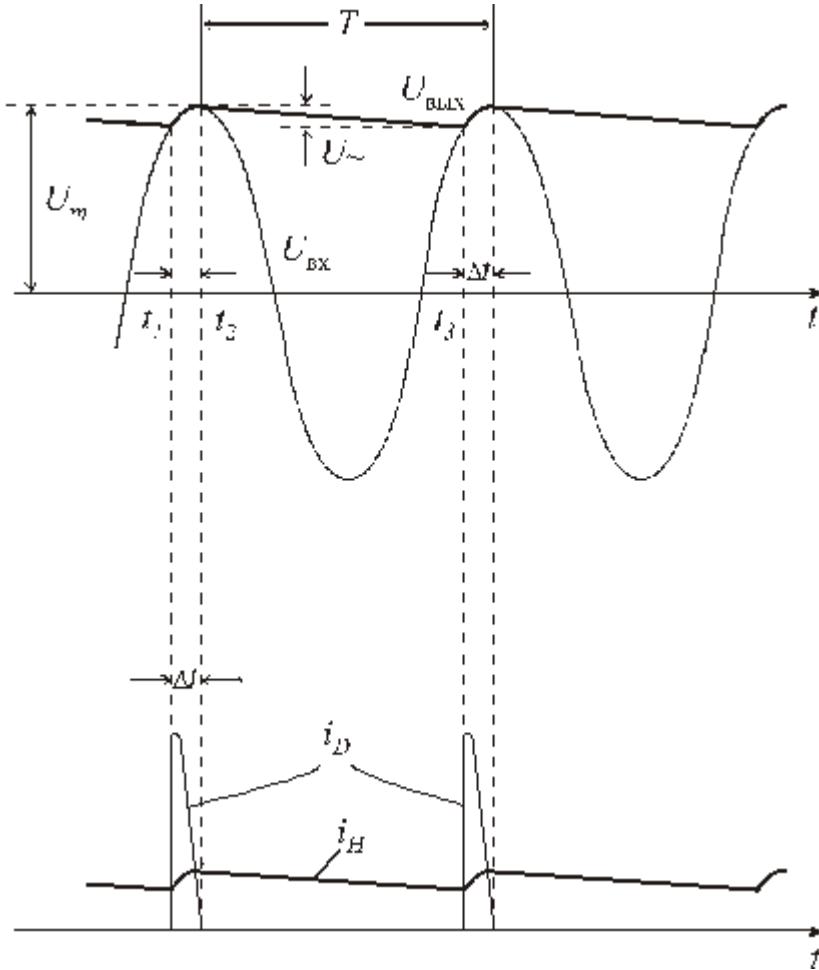


Рис. 3.

Как следует из рис. 3, диод открыт только на интервале $t_1 - t_2$. Чем короче этот интервал, тем больше амплитуда тока через диод. Режим работы диода в схеме выпрямителя с фильтром оказывается достаточно тяжелым.

На практике используют и более сложные схемы сглаживающих фильтров, содержащих конденсаторы и индуктивные катушки. Они обеспечивают лучшее сглаживание. Основной недостаток таких фильтров – большие габариты и вес.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Рассмотрим кратко сущность процесса выпрямления на активную нагрузку R_d (ключ К замкнут) в однополупериодной схеме выпрямления (а), представленной на рис. 2, а. На первичную обмотку трансформатора ТР от питания сети подается переменное синусоидальное напряжение. На вторичной обмотке трансформатора наведется также синусоидальное напряжение

$$u_{ab} = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t,$$

где U_{2m} и U_2 – максимальное и действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора; ω – угловая частота напряжения питающей

сети. В первый полупериод, обозначенный стрелкой справа – налево «←», когда потенциал точки **a** становится выше потенциала точки **b**, к аноду диода VD подаётся прямое (отпирающее положительное) напряжение относительно катода и диод включается. В результате напряжение U_{ab} оказывается приложенным к нагрузке (резистор R_d), через которую начнет протекать ток нагрузки i_d . Диод будет находиться в проводящем состоянии до тех пор, пока проходящий через него ток i_d не снизится до нуля. Для активной нагрузки, когда ток по фазе совпадает с напряжением, диод VD будет выключаться в моменты спадания напряжения U_{ab} до нуля (в моменты времени $\omega t = \pi; 3\pi$ и т.д.). В эти моменты времени ток i_d в нагрузке прекращается до последующего включения диода. Во втором полупериоде, обозначенном стрелой слева – направо «→», потенциал точки **b** вторичной обмотки будет выше потенциала точки **a**, к диоду VD приложено обратное (запирающее отрицательное) напряжение и ток через диод не протекает. В результате на резистор R_d будет выделяться пульсирующее напряжение только одной полярности, т. е. будет возникать выпрямленное напряжение U_d (рис. 3).

Среднее значение U_d , равное постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_d , определяется через интеграл функции изменения этого напряжения во времени в течение периода $T = 2\pi$, деленному на этот период. Так как на половине периода ($\frac{1}{2}T = \pi$) мгновенное значение выпрямленного напряжения U_d в данной схеме равно нулю, то интегрирование следует производить в пределах полупериода, π , когда диод проводит ток. Таким образом, в данной схеме среднее значение U_d выпрямленного напряжения равно

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} U_2 = 0,45 U_2.$$

Среднее значение I_d выпрямленного тока i_d , повторяющего вследствие активной нагрузки форму напряжения U_d , можно выразить следующей формулой

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R_d} = 0,45 \frac{U_2}{R_d}.$$

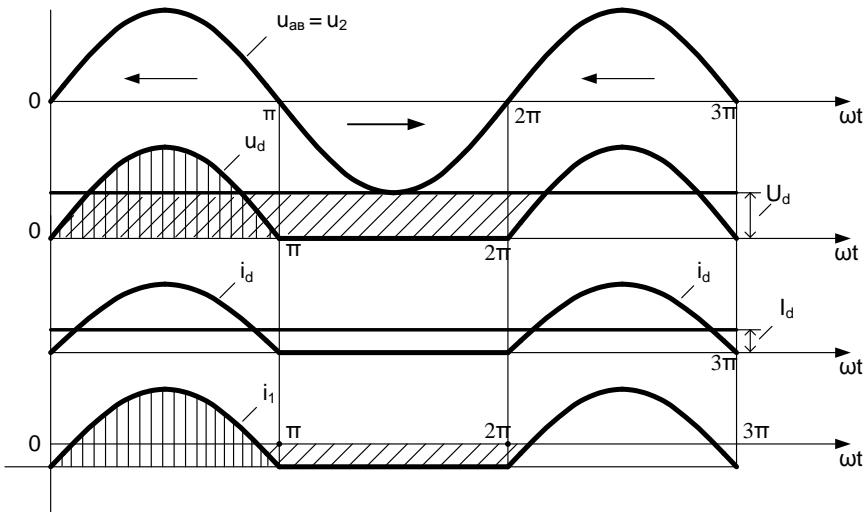


Рис. 3. Диаграмма процессов работы однополупериодного выпрямителя

Напряжение питающее сеть считается синусоидальным. Из принципа действия схемы (рис. 2, а) следует, что во вторичной обмотке трансформатора ТР вследствие односторонней проводимости диода VD будет протекать однонаправленный пульсирующий ток i_d (рис. 3), содержащий постоянную составляющую I_d , равную среднему значению выпрямленного тока i_d . Известно, что магнитный поток в магнитопроводе трансформатора возникает под воздействием МДС, образующейся от суммы всех протекающих в его обмотках токов. Поэтому результирующий магнитный поток можно рассматривать состоящим из переменной и постоянной составляющих. Наличие постоянной составляющей магнитного потока вызывает смещение рабочих значений индукции на петле гистерезиса магнитопровода трансформатора на некоторое постоянное значение, в результате которой степень насыщения трансформатора увеличивается. Это явление вызывает возрастание тока намагничивания (тока холостого хода), что увеличивает расчетную мощность трансформатора, а значит и его массогабаритные показатели.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ СО СРЕДНЕЙ ТОЧКОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрим сущность процесса выпрямителя на активную (ключ К замкнут) и активно-индуктивную (ключ К разомкнут) нагрузки в двухполупериодной схеме со средней точкой, представленной на рис. 2, б. Особенностью схемы является то, что две равные вторичные полуобмотки а-0 и б-0 трансформатора относительно его средней точки 0 создают систему напряжений U_{ao} и U_{bo} , сдвинутых относительно друг друга на π .

Работа схемы выпрямления (рис. 4) на активную нагрузку R_d (ключ K замкнут) При подаче на первичную обмотку трансформатора от питающей сети переменного синусоидального напряжения в каждой вторичной полуобмотке наведется также синусоидальное напряжение

$$u_{ao} = u_{bo} = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t.$$

В первый полупериод, обозначенный стрелкой справа – налево «←», когда потенциал точки **a** становится выше потенциала средней точки **o** (на схеме рис. 2, б это соответствует знаку + без скобок), к аноду диода VD1 подаётся прямое (запирающее положительное) напряжение относительно его катода и диод включается в момент времени $\omega t = 0$. Вторичная обмотка трансформатора выполнена таким образом, что точка **a** соответствует началу обмотки, а точка **b** её концу. Поэтому в первый полупериод потенциал точки **b** становится отрицательным по отношению к средней точке **o**. В результате включения диода VD1 напряжение u_{ao} оказывается приложенным к нагрузке R_d , по которой начинает протекать ток i_d , совпадающий по времени с током диода i_{VD1} (см. рис. 4). Благодаря включению VD1 положительный потенциал точки **a** оказывается приложенным к катоду диода VD2, в результате чего на VD2 подается обратное (запирающее отрицательное) напряжение всей вторичной обмотки u_{ba} и диод VD2 находится в запертом состоянии.

Диод VD1 будет находиться во включенном состоянии до тех пор, пока ток i_{VD1} протекающий через него, не станет равным нулю. Так как нагрузка R_d является активной, то фазы выпрямленных тока и напряжения совпадают. В результате диод VD1 будет выключаться в момент спадания напряжения u_{ao} до нуля, т.е. в момент $\omega t = \pi$. В этот момент времени ток i_{vd1} , протекающий через VD1, прекращается до последующего включения VD1.

Во второй полупериод, обозначенный стрелкой слева – направо «→», напряжение u_{ao} становится отрицательным, а u_{bo} – положительным (на рис. 2, б) полярность напряжения в точках **a** и **b** указана в скобках. В результате к нагрузке R_d будет приложено напряжение u_{bo} , а ток нагрузки i_d будет равен току диода i_{VD2} .

Благодаря включению VD2 в момент времени $\omega t = \pi$, положительный потенциал точки **b** оказывается приложенным к катоду диода VD1, в результате чего на VD1 подаётся обратное (запирающее отрицательное) напряжение всей

вторичной обмотки U_{ab} . Диод VD2 будет находиться во включенном состоянии до тех пор, пока ток i_{VD2} не станет равным нулю в момент времени $\omega t = 2\pi$. В этот момент времени ток i_{VD2} прекращается до последующего включения VD2.

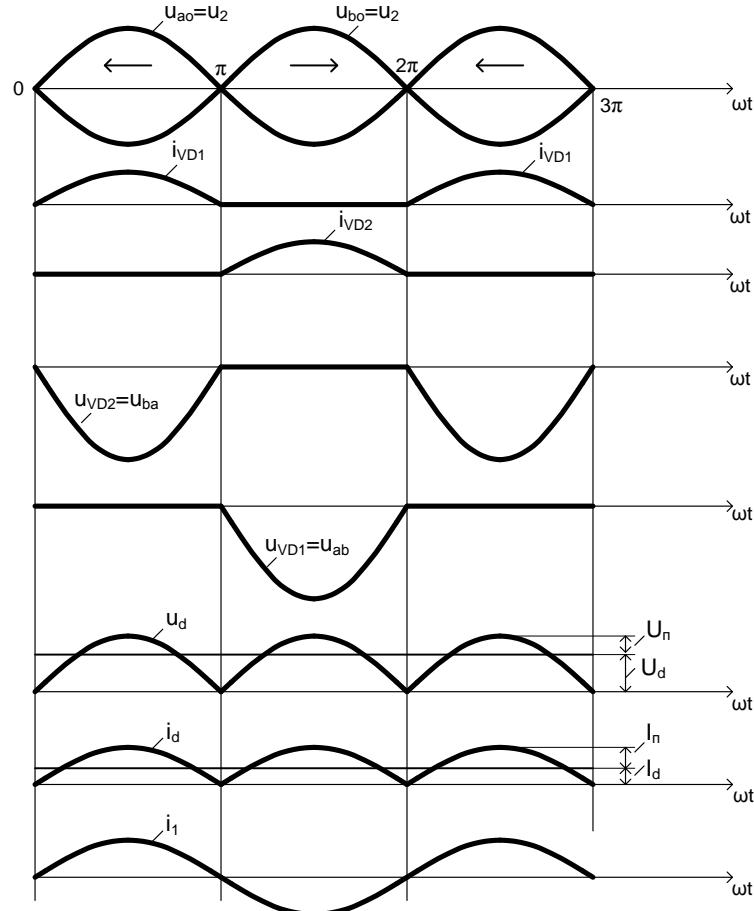


Рис. 4. Диаграмма процессов работы двухполупериодного выпрямителя со средней точкой при $R_d > 0$ и $L_d = 0$

В результате поочередной проводимости тока одного направления диодами VD1 и VD2 на нагрузке R_d появляется выпрямленное пульсирующее напряжение u_d , содержащее постоянную U_d и переменную U_n составляющие (см. рис. 4).

Среднее значение U_d , равное постоянной составляющей выпрямленного напряжения u_d для режима холостого хода определяется из выражения

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9U_2,$$

а в режиме токовой нагрузки I_d определяется по формуле

$$U_d = 0,9U_2 - \frac{u_k U_2 I_d}{\pi I_{dh}},$$

где u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Среднее значение U_d в данной схеме в 2 раза выше, чем в однополупериодной схеме, так как напряжение вторичной полуобмотки трансформатора прикладывается к нагрузке каждый полупериод. Соответственно в 2 раза больше будет и среднее значение выпрямленного тока I_d

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R_d} = 0,9 \frac{U_2}{R_d}.$$

Основные параметры, характеризующие работу диодов VD1 и VD2 в схеме, можно выразить следующими соотношениями:

– максимальное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{m_{obp.}} = 2\sqrt{2}U_2 = 2,82U_2;$$

– максимальное значение тока диода

$$I_m = \frac{U_{2m}}{R_d} = \frac{\pi I_d R_d}{2R_d} = 1,57 I_d,$$

– средне значение тока диода равно половине тока нагрузки I_d , так как в схеме поочередно проводят ток два диода

$$I_{VD} = 0,5I_d,$$

– действующее значение тока диода

$$I = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \frac{\pi}{4} I_d = 0,785 I_d,$$

– расчетная мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,2 P_{dh},$$

где S_1 и S_2 – полные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора; P_{dh} – полная номинальная активная мощность в

$P_{dh} = \frac{1}{T} \int_0^T U_d i_d dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_d i_d d\omega t$; $1,2 = K_{pr}$ – коэффициент превышения расчетной мощности трансформатора.

Работа схемы выпрямителя (рис. 5) на активно-индуктивную нагрузку R_d и L_d (ключ К разомкнут). Наличие в цепи нагрузки L_d существенно изменяет характер электромагнитных процессов в схеме. Индуктивность в электрической цепи обладает явлением инерции, когда изменение тока в цепи происходит с запаздыванием относительно приложенного напряжения. Так после начала нарастания напряжения нарастание тока i_d в нагрузке будет происходить постепенно и тем медленнее, чем больше постоянная времени

$$\tau_d = \frac{\omega L_d}{R_d} = \frac{x_d}{R_d}$$

Включенная индуктивность L_d в цепи нагрузки обычно выполняет роль переменной составляющей выпрямленного тока i_d .

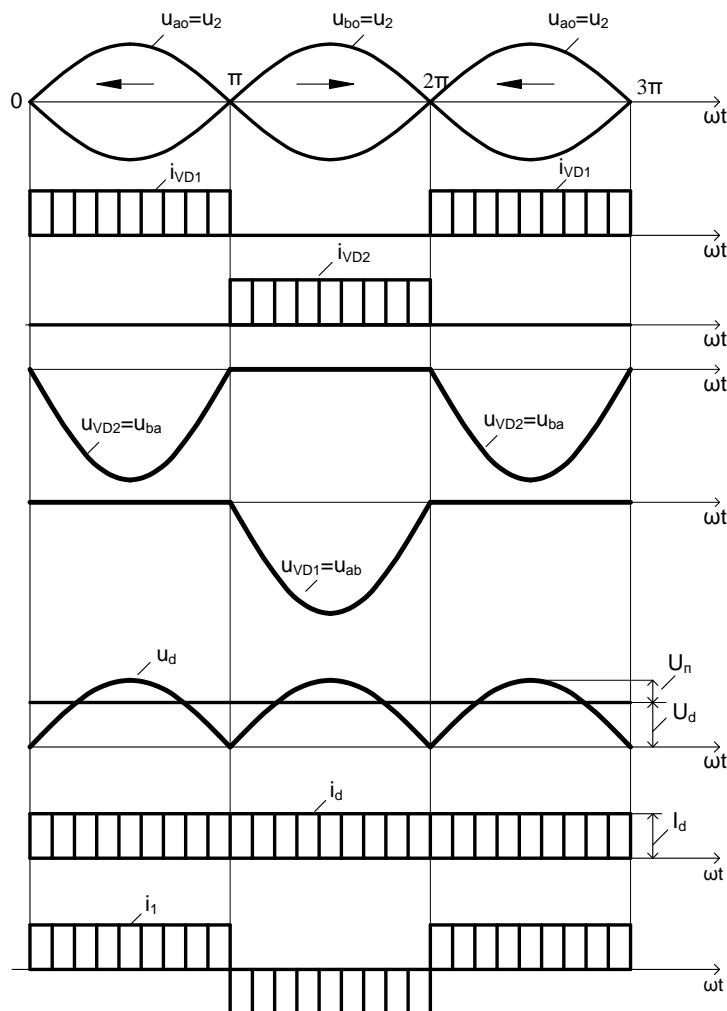


Рис. 5. Диаграмма процессов работы двухполупериодного выпрямителя со средней точкой при $R_d > 0$ и $L_d = \infty$

Наличие индуктивности L_d в цепи выпрямленного тока приводит к тому, что в точках прохождения напряжения вторичной обмотки трансформатора через нуль ($0, \pi, 2\pi, 3\pi$ и т. д.) ток в диодах VD1 и VD2 не исчезает до нуля, а продолжает

протекать за счет энергии, накопленной в индуктивности L_d . В результате форма выпрямленного тока становится более сглаженной и не успевает доходить до нуля в моменты, когда выпрямленное напряжение становится равным нулю. При увеличении индуктивности или частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения u_d пульсации выпрямленного тока i_d уменьшаются, а при больших значениях τ_d форма тока приближается к идеально сглаженной. Поэтому, при дальнейшем рассмотрении работы как данной схемы, так и других схем выпрямления принимается допущение $\omega L_d = \infty$. В этом случае можно считать, что вся переменная составляющая выпрямленного напряжения u_d выделяется на индуктивности L_d , а постоянная – на сопротивлении R_d . На рис. 5 представлена диаграмма процессов работы данного выпрямителя при допущении $\omega L_d = \infty$. Форма выпрямленного напряжения u_d и его среднее значение U_d остаются такими же, как и при чисто активной нагрузке (ключ К замкнут). Основное отличие данного выпрямителя заключается в том, что изменяется форма токов диодов, которая становится прямоугольной.

В связи с таким изменением формы токов меняются действующие и мгновенные значения токов диодов, токов в обмотках трансформатора и соответственно его расчетная мощность. При $\omega L_d = \infty$ указанные величины принимают следующие значения:

– максимальное значение тока диода $I_m = I_d$,

– действующие значения тока диода и вторичной полуобмотки трансформатора

$$I = I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = 0,707 I_d ;$$

– действующие значения тока первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{I_d}{K_T} ,$$

где K_T – коэффициент трансформации трансформатора,

– расчетная мощность трансформатора $S_T = 1,34 P_{dh}$

где $1,34 = K_{np}$ – коэффициент превышения расчётной мощности трансформатора.

Таким образом, сравнение процессов работы двухполупериодного выпрямителя со средней точкой на активную и активно-индуктивную нагрузку показывает, что наличие большой индуктивности L_d в цепи нагрузки приводит к увеличению

расчетной мощности S_m трансформатора ($K_{np} = 1,34$ по сравнению с $K_{np} = 1,2$), но зато улучшает использование диодов по току, т.е. уменьшает действующее значение тока через диод ($I = I_2 = 0,707I_d$ по сравнению $I = I_2 = 0,785I_d$ при активной нагрузке).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Мостовая схема выпрямления представлена на рис. 2,в. Рассмотрим процесс выпрямления на активную (ключ К замкнут) и активно-индуктивную (ключ К разомкнут) нагрузки. При рассмотрении процессов работы в данной схеме выпрямления примем те же допущения, что и в однополупериодном выпрямителе (см. рис. 1.2).

Работа схемы выпрямления на активную нагрузку (см. рис. 6)

В первый полупериод, обозначенный стрелкой справа – налево « $\leftarrow\rightleftharpoons$ », когда потенциал точки а становится выше потенциала точки в (на схеме рис. 2,в это соответствует знаку + без скобок), к анодам диодов VD1 и VD4 подаётся прямое (отпирающее положительное) напряжение относительно их катодов и диоды включаются в момент времени $\omega t = 0$. В результате включения диодов VD1 и VD4 напряжение u_{ab} оказывается приложенным к нагрузке R_d , по которой начинает протекать ток i_d , совпадающий по времени с током диодов i_{VD1} и i_{VD4} . Благодаря включению VD1 положительный потенциал точки а оказывается приложенным к катоду диода VD3, анод которого соединен непосредственно с точкой в вторичной обмотки трансформатора, имеющей в данный полупериод отрицательный потенциал. В результате, на VD3 подаётся обратное (запирающее отрицательное) напряжение обмотки u_{ba} и диод VD3 находится в запертом состоянии. Аналогично, благодаря включению VD4 отрицательный потенциал точки в оказывается приложенным к аноду диода VD2, катод которого соединен непосредственно с точкой а обмотки, имеющей в данный полупериод положительный потенциал.

В результате на VD2 подаётся обратное напряжение обмотки u_{ab} и диод VD2 также находится в запертом состоянии.

Диоды VD1 и VD4 будут находиться во включенном состоянии до тех пор, пока токи i_{VD1} и i_{VD4} , протекающие через них, не станут равным нулю. Так как нагрузка R_d является активной, то фазы выпрямленных тока i_d и напряжения u_d совпадают. В результате, диоды VD1 и VD4 будут выключаться в момент спадания

напряжения u_{ab} до нуля, т. е. в момент $\omega t = \pi$. В этот момент времени ток $i_{VD1,4}$ протекающий через VD1 и VD4, прекращается до последующего включения этих диодов.

Во второй полупериод, обозначенный стрелкой слева – направо « \rightarrow » потенциал точки в становится выше потенциала точки а (на схеме рис. 2, в полярность напряжения в точках а и в указаны в скобках), т. е. напряжение u_{ab} становится обратным, а u_{ba} – прямым. В результате, к нагрузке R_d будет теперь приложено напряжение u_{ba} , а ток нагрузки i_d будет равен току диодов VD2 и VD3. Благодаря включению диода VD3 в момент $\omega t = \pi$ положительный потенциал точки в оказывается приложенным к катоду VD1, анод которого соединен непосредственно с точкой а обмотки, имеющей в данный полупериод отрицательный потенциал. В результате, на диод VD1 подаётся обратное напряжение обмотки u_{ba} и диод VD1 находится в запертом состоянии. Аналогично, благодаря включению диода VD2 отрицательный потенциал точки а оказывается приложенным к аноду диода VD4, катод которого соединен непосредственно к точке в обмотки, имеющей в данный полупериод положительный потенциал. В результате, на диод VD4 подаётся также обратное напряжение обмотки u_{ba} и диод VD4 находится в запертом состоянии.

Диоды VD2 и VD3 будут находиться во включенном состоянии до тех пор, пока токи i_{VD2} и i_{VD3} , протекающие через них, не станут равными нулю. Благодаря активной нагрузке фазы i_d и u_{ba} совпадают, а это значит, что диоды VD2 и VD3 будут выключаться в момент спадания напряжения u_{ba} до нуля, т. е. в момент $\omega t = 2\pi$. В этот момент времени ток $i_{VD2,3}$, протекающий через VD2 и VD3, прекращается до последующего включения этих диодов. Также циклы работы диодов выпрямителя повторяются через период напряжения сети.

В результате поочередной проводимости тока одного направления диодами VD1, VD4 и VD2, VD3 на нагрузке R_d появляется выпрямленное пульсирующее напряжение u_d , содержащее постоянную U_d и переменную U_n составляющие (рис. 6). Максимальное значение обратного напряжения на диоде определяется по выражению

$$U_{\text{м обр.}} = \sqrt{2}U_2 = 1,41U_2.$$

Максимальное и среднее значение тока, протекающего через диод, определяется по выражениям (6) и (7) соответственно. Действующее значение тока, проходящего через вторичную обмотку трансформатора, равно:

$$I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d = 1,11 I_d$$

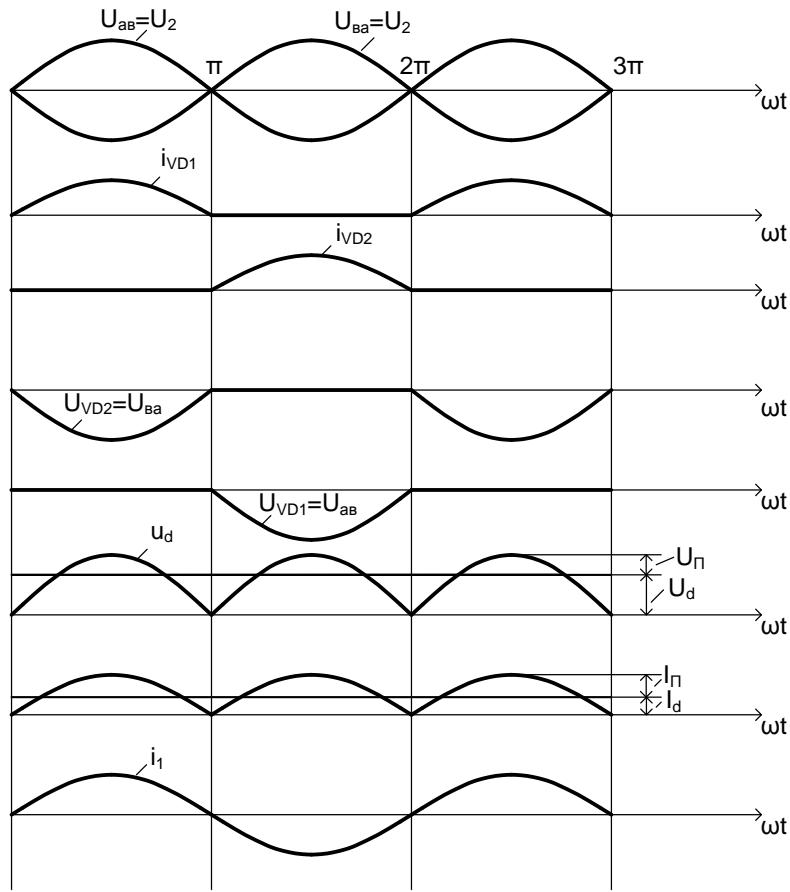


Рис. 6. Диаграмма процессов работы двухполупериодного мостового выпрямителя при $R_d > 0$ и $L_d = 0$

Коэффициент превышения расчетной мощности трансформатора K_{np} в этом выпрямителе при $R_d > 0$ и $L_d = 0$ равен единице.

Работа схемы выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку (см. рис. 7)

При разомкнутом ключе К в цепь нагрузки включена индуктивность L_d , которая обычно выполняет роль фильтра переменной составляющей выпрямленного тока i_d . Физические процессы в мостовом выпрямителе при наличии R_d и индуктивности L_d будут такими же, как и в выпрямителе со средней точкой, которые описаны на стр. 18–20. Диаграмма процессов работы мостового выпрямителя при $R_d > 0$ и $L_d = \infty$ представлена на рис. 7. Коэффициент K_{np} при $R_d > 0$ и $L_d = \infty$ равен 1,11.

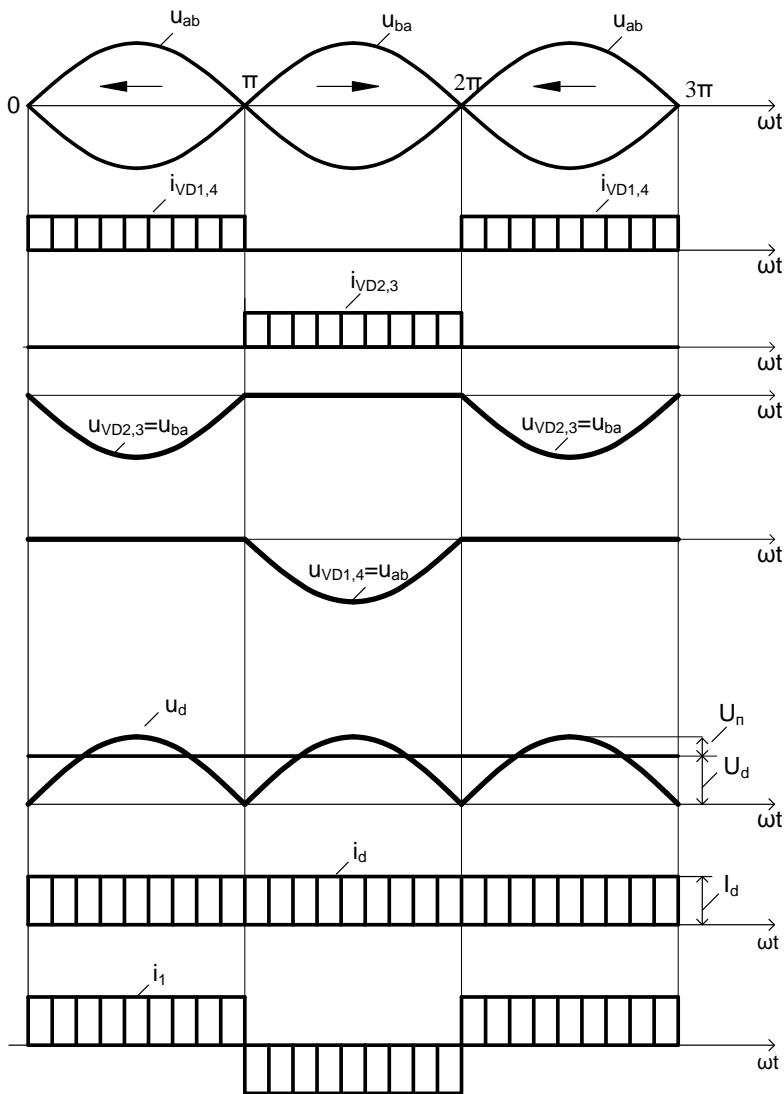


Рис. 7. Диаграмма процессов работы двухполупериодного мостового выпрямителя при $R_d > 0$ и $L_d = \infty$.

Вопросы для отчета:

1. Условия для включения диода.
2. Продолжительность включения диода.
3. Величина среднего выпрямленного напряжения и тока в каждой схеме (сравнить результаты).
4. От чего зависит мощность трансформатора?
5. Что меняется в работе каждой схемы при замыкании ключа К?
6. В каком случае фазы выпрямленных тока и напряжения не будут совпадать?
7. Принцип действия диода в схеме выпрямления.

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Расчет неуправляемых однофазных выпрямителей»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Расчет неуправляемых однофазных выпрямителей.

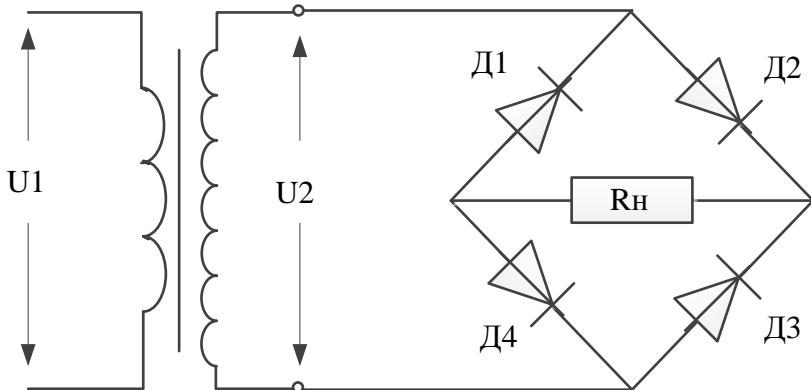
Цель работы: Изучить принцип действия усилителя, влияние напряжения питания на коэффициент усиления.

Методические материалы

При расчете необходимо:

- 1) Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя;
- 2) Определить действующее U_2 и амплитудное U_{m2} значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора;
- 3) коэффициент трансформации K ;
- 4) постоянную составляющую выпрямленного тока I_o и его амплитудное значение;
- 5) мощность P , выделяемую в нагрузочном резисторе R_h .
- 6) Выбрать полупроводниковые вентили для выпрямителя.

Схема мостового выпрямителя



1. Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора определяется по формуле: $U_2 = U_o / 0,9$

2. Коэффициент трансформации трансформатора определяется по формуле:

$$K = U_1 / U_2$$

3. Амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора определяется по формуле: $U_{m2} = \sqrt{2} * U_2$

4. Значение максимального обратного напряжения вентиля в мостовой схеме определяется по формуле: $U_{обр.max} = U_{m2} / 2$

5. Постоянная составляющая выпрямленного тока определяется по формуле:

$$I_o = U_o / R_h$$

6. Амплитудное значение выпрямленного тока определяется по формуле:

$$I_{2m} = U_{m2} / R_h$$

7. Мощность, выделяемая в сопротивлении нагрузочного резистора определяется по формуле: $P = U_o * I_o$

8. Далее выбирается марка диода и его технические характеристики: $I_{\text{доп.}}$; $U_{\text{обр. max.}}$.

Варианты заданий:

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 100 | 125 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 2 | 500 | 1680 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 3 | 20 | 4 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 4 | 80 | 10 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 5 | 100 | 20 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 6 | 250 | 150 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 7 | 150 | 50 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 8 | 500 | 100 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 9 | 350 | 175 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 10 | 60 | 15 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 11 | 400 | 125 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 12 | 300 | 150 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 13 | 200 | 160 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 14 | 140 | 180 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 15 | 80 | 75 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 16 | 450 | 1200 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 17 | 90 | 105 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 18 | 70 | 95 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 19 | 220 | 225 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 20 | 100 | 105 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 21 | 400 | 625 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 22 | 240 | 125 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 23 | 60 | 130 | 127 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 24 | 300 | 155 | 220 |

Составить схему двухполупериодного мостового выпрямителя и выпрямителя на двух диодах. Начертить схемы и провести расчет для каждой схемы. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации, постоянную составляющую выпрямленного тока, мощность на нагрузке. Выбрать диоды.

| Вариант | Выпрямленное напряжение, В | Сопротивление нагрузки, Ом | Напряжение питания, В |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 25 | 220 | 220 | 127 |

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

| Тип диода | I _{доп.д.} , А | U _{обр.д.} , В | | Тип диода | I _{доп.д.} , А | U _{обр.д.} , В |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--|-----------|-------------------------|-------------------------|
| Д7Г | 0,3 | 200 | | Д231 | 10 | 300 |
| Д205 | 0,4 | 400 | | Д231Б | 5 | 300 |
| Д207 | 0,1 | 200 | | Д232 | 10 | 400 |
| Д209 | 0,1 | 400 | | Д232Б | 5 | 400 |
| Д210 | 0,1 | 500 | | Д233 | 10 | 500 |
| Д211 | 0,1 | 600 | | Д233Б | 5 | 500 |
| Д214 | 5 | 100 | | Д234Б | 5 | 600 |
| Д214А | 10 | 100 | | Д242 | 5 | 100 |
| Д214Б | 2 | 100 | | Д242А | 10 | 100 |
| Д215 | 2 | 200 | | Д242Б | 2 | 100 |
| Д215А | 10 | 200 | | Д243 | 5 | 200 |
| Д215Б | 2 | 200 | | Д243А | 10 | 200 |
| Д217 | 0,1 | 800 | | Д243Б | 2 | 200 |
| Д218 | 0,1 | 1000 | | Д244 | 5 | 50 |
| Д221 | 0,4 | 400 | | Д244А | 10 | 50 |
| Д222 | 0,4 | 600 | | Д244Б | 2 | 50 |
| Д224 | 5 | 50 | | Д302 | 1 | 200 |
| Д224А | 10 | 50 | | Д303 | 3 | 150 |
| Д224Б | 2 | 50 | | Д304 | 3 | 100 |
| Д226 | 0,3 | 400 | | Д305 | 6 | 50 |
| Д226А | 0,3 | 300 | | Д202А | 3 | 50 |
| | | | | Д202Н | 1 | 500 |

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение выпрямителей на тиристорах»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение выпрямителей на тиристорах.

Цель работы: Изучить принцип действия управляемого выпрямителя.

Методические материалы
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: провести экспериментальное исследование различных схем однофазных управляемых выпрямителей при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку.

Управляемые однофазные выпрямители широко используются в различных отраслях техники в качестве регулируемых источников питания. Нагрузка таких выпрямителей чаще всего имеет активный и активно-индуктивный характер. Выпрямительный блок ВБ состоит из следующих элементов: трансформатор ТР, управляемый выпрямитель УВ и нагрузка Н (рис. 1).

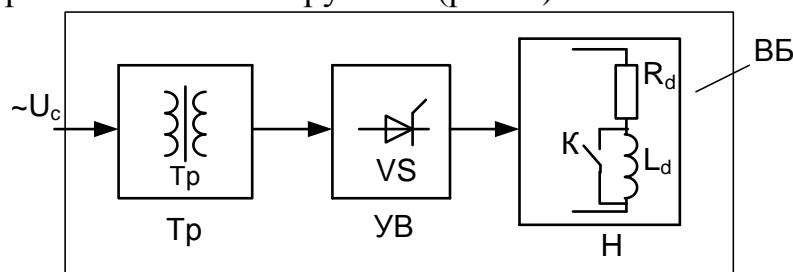


Рис. 1. Блочная схема выпрямления переменного тока в постоянный.

Существует несколько схем однофазных управляемых выпрямителей:

- однополупериодная схема (рис. 2, а);
- двухполупериодная схема со средней точкой трансформатора (рис. 2, б);
- двухполупериодная мостовая схема (рис. 2, в).

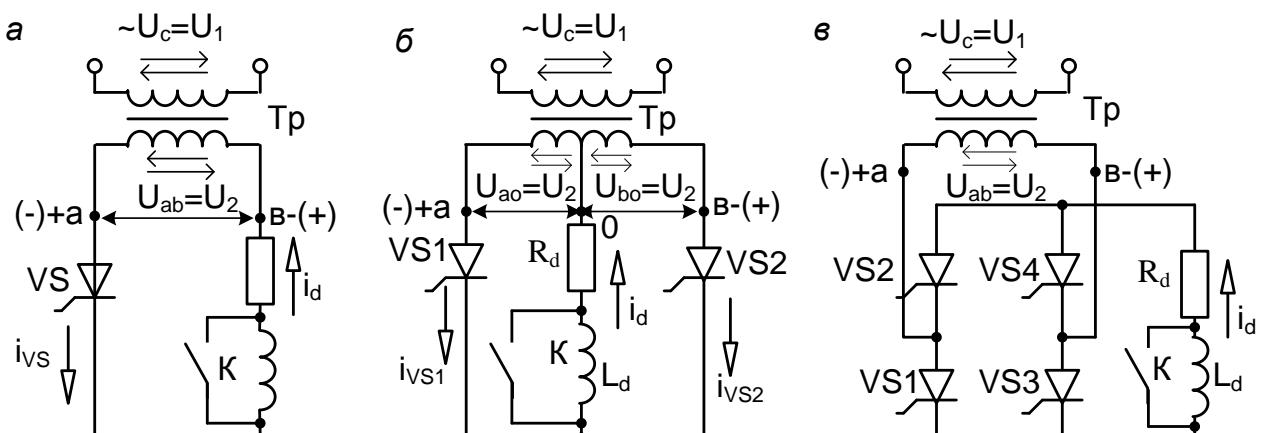


Рис. 2. Принципиальные схемы однофазных управляемых выпрямителей:

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Сущность процесса выпрямления на активную нагрузку R_d (ключ К замкнут) в однополупериодной схеме управляемого выпрямителя (а), представленной на рис. 2, а. На первичную обмотку трансформатора ТР от питания сети подаётся

переменное синусоидальное напряжение. На вторичной обмотке трансформатора наведется также синусоидальное напряжение

$$u_{ab} = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t,$$

где U_{2m} и U_2 – максимальное и действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора; ω – угловая частота напряжения питающей сети.

В первый полупериод, когда потенциал точки a становится выше потенциала точки b , к аноду тиристора VS подается прямое (отпирающее положительное) напряжение относительно катода и при наличии импульса управления на его управляющем электроде он включается. Импульс управления имеет фазу (угол) подачи α относительно точки прохода напряжения сети через ноль. В результате напряжение u_{ab} оказывается приложенным к нагрузке (резистор R_d), через которую начнет протекать ток нагрузки i_d . Тиристор будет находиться в проводящем состоянии с начала подачи импульса управления под углом α до тех пор, пока проходящий через него ток i_d не снизится до нуля. Для активной нагрузки когда ток по фазе совпадает с напряжением, тиристор VS будет выключаться в моменты спадания напряжения U_{ab} до нуля. В эти моменты времени ток i_d в нагрузке прекращается до последующего включения тиристора. Во втором полупериоде потенциал точки b в вторичной обмотки будет выше потенциала точки a , к тиристору VS приложено обратное (запирающее отрицательное) напряжение и ток через тиристор не протекает. В результате на резистор R_d будет выделяться пульсирующее напряжение только одной полярности, т. е. будет возникать выпрямительное напряжение u_d (рис. 3).

Среднее значение I_d выпрямленного тока i_d , повторяющего вследствие активной нагрузки форму напряжения u_d , можно выразить следующей формулой

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0,45 \frac{U_2}{R_d} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right).$$

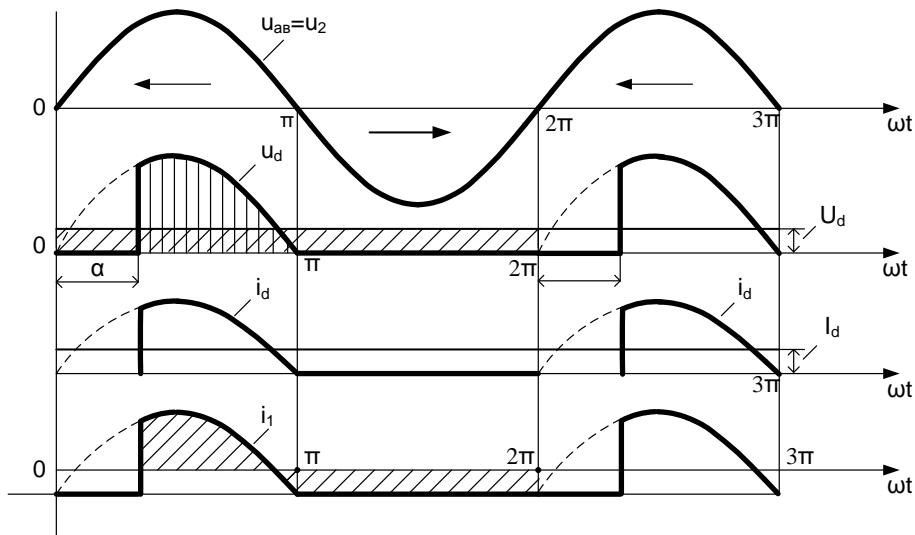


Рис. 3. Диаграмма процессов работы однополупериодного управляемого выпрямителя

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Рассмотрим сущность процесса выпрямителя на активную (ключ К замкнут) и активно-индуктивную (ключ К разомкнут) нагрузки в двухполупериодной схеме со средней точкой, представленной на рис. 2, б.

Работа схемы управляемого выпрямления с нулевой точкой (рис. 4) на активную нагрузку R_d (ключ К замкнут).

При подаче на управляющий электрод тиристора импульса управления с углом α тиристор включается в момент времени $\omega t = \alpha$. Вторичная обмотка трансформатора выполнена таким образом, что точка a соответствует началу обмотки, а точка b – её концу. В результате включения тиристора VS1 напряжение $u_{ao} = u_2$ оказывается приложенным к нагрузке R_d , по которой начинает протекать ток i_d , совпадающий по времени с током тиристора i_{VS1} (рис. 4). Благодаря включению VS1 положительный потенциал точки a оказывается приложенным к катоду тиристора VS2, в результате чего на VS2 подается обратное (запирающее отрицательное) напряжение всей вторичной обмотки u_{ba} и тиристор VS2 находится в запертом состоянии.

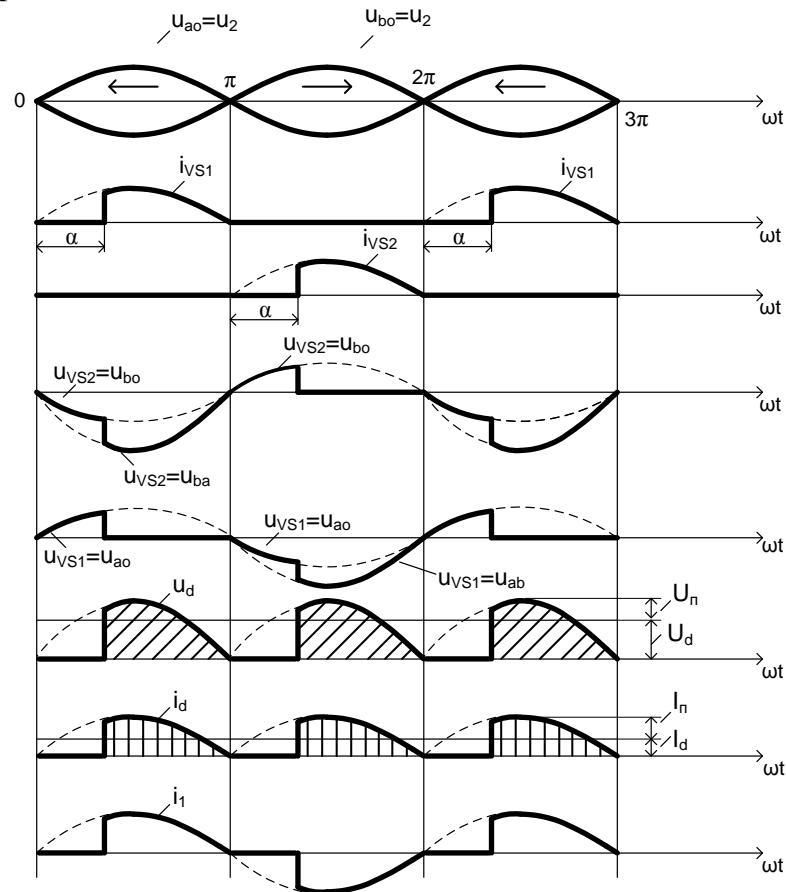


Рис. 4. Диаграмма процессов работы двухполупериодного управляемого выпрямителя со средней точкой при $R_d > 0$ и $L_d = 0$

Тиристор VS1 будет находиться во включенном состоянии до тех пор, пока ток i_{VD1} протекающий через него, не станет равным нулю. Так как нагрузка R_d является активной, то фазы выпрямленных тока и напряжения совпадают. В результате тиристор VS1 будет выключаться в момент спадания напряжения u_{ao} до нуля, т. е. в момент $\omega t = \pi$. В этот момент времени ток i_{VS1} , протекающий через VS1, прекращается до последующего включения тиристора VS1.

Во второй полупериод, напряжение u_{ao} становится отрицательным, а u_{bo} – положительным (на рис. 2, б полярность напряжения в точках a и b указана в скобках). Тиристор VS2 будет находиться во включенном состоянии до тех пор, пока ток i_{VS2} не станет равным нулю в момент времени $\omega t = 2\pi$. В этот момент времени ток i_{VS2} прекращается до последующего включения VS2.

В результате поочередной проводимости тока одного направления тиристорами VS1 и VS2 на нагрузке R_d появляется выпрямленное пульсирующее напряжение u_d , содержащее постоянную U_d и переменную U_n составляющие. Среднее значение U_d в данной схеме зависит от угла отпирания тиристоров. Чем больше угол α , тем меньше значение U_d .

Работа схемы выпрямителя с нулевой точкой (см. рис. 5) на активно-индуктивную нагрузку R_d и L_d (ключ К разомкнут).

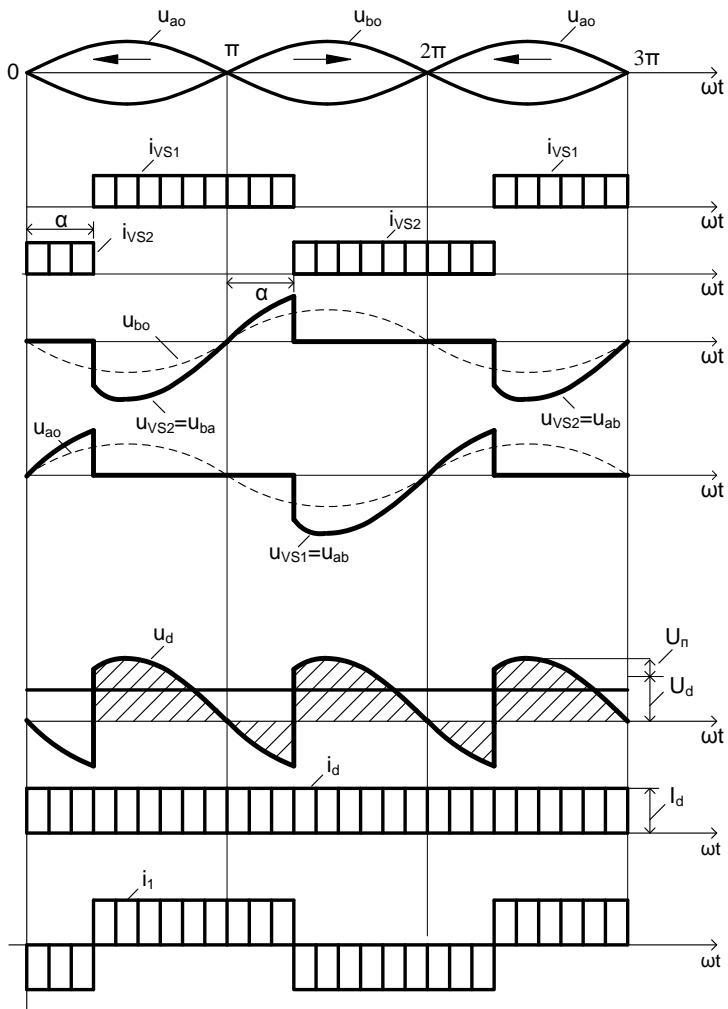


Рис. 5. Диаграмма процессов работы двухполупериодного управляемого выпрямителя со средней точкой при $R_d > 0$ и $L_d = \infty$

Включенная индуктивность L_d в цепи нагрузки обычно выполняет роль переменной составляющей выпрямленного тока i_d . Наличие индуктивности L_d в цепи выпрямленного тока приводит к тому, что в точках прохождения напряжения вторичной обмотки трансформатора через нуль ток в тиристорах VS1 и VS2 не исчезает до нуля, а продолжает протекать за счет энергии, накопленной в индуктивности L_d . В результате форма выпрямленного тока становится более сглаженной и не успевает доходить до нуля в моменты, когда выпрямленное напряжение становится равным нулю. При увеличении индуктивности или частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения u_d пульсации выпрямленного тока i_d уменьшаются, а при больших значениях τ_d форма тока приближается к идеально сглаженной.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Мостовая схема управляемого выпрямителя представлена на рис. 2, в. Рассмотрим процесс выпрямления на активную (ключ К замкнут) и активно-индуктивную (ключ К разомкнут) нагрузки.

Работа схемы мостового управляемого выпрямителя на активную нагрузку

В первый полупериод, когда потенциал точки *a* становится выше потенциала точки *b* (на схеме рис. 2, в), к анодам тиристоров VS1 и VS4 подаётся прямое напряжение относительно их катодов и при условии подачи с углом α импульсов управления на управляющие электроды, тиристоры включаются в момент времени $\omega t = \alpha$. В результате включения тиристоров VS1 и VS4 напряжение U_{ab} оказывается приложенным к нагрузке R_d , по которой начинает протекать ток i_d , совпадающий по времени с током тиристоров i_{VS1} и i_{VS4} . Благодаря включению тиристора VS1 положительный потенциал точки *a* оказывается приложенным к катоду тиристора VS3, анод которого соединен непосредственно с точкой *b* вторичной обмотки трансформатора, имеющей в данный полупериод отрицательный потенциал. В результате, на VS3 подаётся обратное напряжение обмотки U_{ba} и тиристор VS3 находится в запертом состоянии. Аналогично, благодаря включению VS4 отрицательный потенциал точки *b* оказывается приложенным к аноду тиристора VS2, катод которого соединен непосредственно с точкой *a* обмотки, имеющей в данный полупериод положительный потенциал. В результате на VS2 подаётся обратное напряжение обмотки U_{ab} и тиристор VS2 также находится в запертом состоянии.

Тиристоры VS1 и VS4 будут находиться во включенном состоянии до тех пор, пока токи i_{VS1} и i_{VS4} , протекающие через них, не станут равным нулю. Так как нагрузка R_d является активной, то фазы выпрямленных тока i_d и напряжения U_d совпадают. В результате, тиристоры VS1 и VS4 будут выключаться в момент спадания напряжения U_{ab} до нуля, т. е. в момент $\omega t = \pi$. В этот момент времени ток, протекающий через VS1 и VS4, прекращается до последующего включения этих тиристоров.

Во второй полупериод потенциал точки *b* становится выше потенциала точки *a* (на схеме рис. 2, в полярность напряжения в точках *a* и *b* указаны в скобках), т. е. напряжение U_{ab} становится обратным, а U_{ba} – прямым. В результате, к нагрузке R_d будет теперь приложено напряжение U_{ba} , а ток нагрузки i_d будет равен току тиристоров VS2 и VS3. Благодаря включению тиристора VS3 в момент $\omega t = \pi + \alpha$ положительный потенциал точки *b* оказывается приложенным к катоду VS1, анод которого соединен непосредственно с точкой *a* обмотки, имеющей в данный полупериод отрицательный потенциал. В результате, на тиристор VS1 подаётся обратное напряжение обмотки U_{ba} и тиристор VS1 находится в запертом состоянии.

Аналогично, благодаря включению тиристора VS2 отрицательный потенциал точки *a* оказывается приложенным к аноду тиристора VS4, катод которого соединен непосредственно к точке *b* обмотки, имеющей в данный полупериод положительный потенциал. В результате, на тиристор VS4 подаётся также обратное напряжение обмотки u_{ba} и тиристор VS4 находится в запертом состоянии.

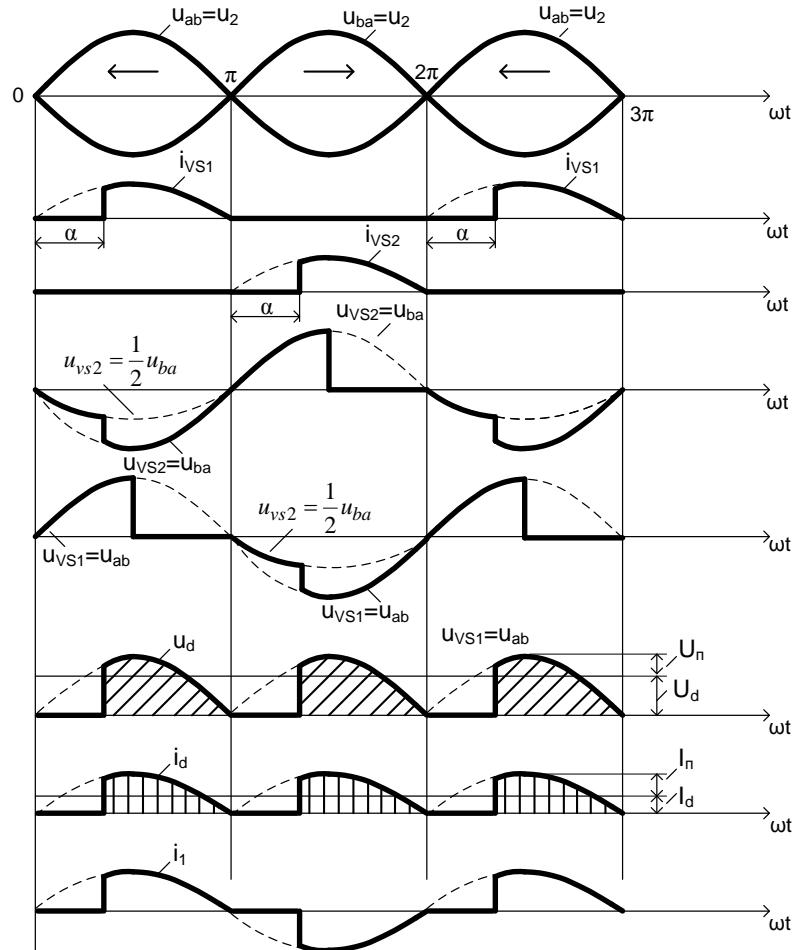


Рис. 6. Диаграмма процессов работы двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя со средней точкой при $R_d > 0$ и $L_d = 0$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОТЧЕТА

1. Формула коэффициента сглаживающих фильтров.
2. Начертить LC и RC фильтры.
3. Как уменьшить пульсации с помощью емкостного фильтра? Какой должна быть для этого величина ёмкости?
4. В какой момент отключается тиристор?

5. Чему равно среднее значение выпрямленного тока?
6. От чего зависит величина угла α ?
7. Как влияет активная нагрузка на выпрямленные ток и напряжение?
8. Как влияет активно-индуктивная нагрузка на выпрямленные ток и напряжение?
9. Как влияет угол α на среднее значение U_d ?
10. Какие показатели индуктивного фильтра и как влияют на форму выпрямления напряжения и тока?
11. Начертить Г-образные и П-образные фильтры.

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение лабораторной работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение работы усилителя с построением вольт-амперных характеристик»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Тема: Изучение работы усилителя с построением вольт-амперных характеристик.

Цель работы: Изучить принцип действия усилителя, влияние напряжения питания на коэффициент усиления.

Методические материалы

Усилителем постоянного тока называется усилитель, сохраняющий постоянство коэффициента усиления при уменьшении частоты входного сигнала до нуля. УПТ должен удовлетворять следующим требованиям: при отсутствии входного сигнала, напряжение на выходе усилителя также должно быть равно нулю; при изменении знака входного сигнала должен изменяться и знак выходного напряжения; отношение выходного напряжения к входному должно быть постоянной величиной; коэффициент усиления не должен зависеть от частоты усиливаемого сигнала.

В отличие от других усилителей, например усилителей низкой частоты, связь между каскадами УПТ должна быть непосредственной (гальванической), так как ни разъединительный конденсатор, ни трансформатор не пропускают постоянный или медленной изменяющийся ток. При этом возникает ряд сложностей с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих напряжений и токов, необходимых для нормальной работы каскада. Кроме того, отсутствие конденсатора или трансформатора приводит к тому, что через усилитель одновременно могут проходить полезный сигнал и сигнал помехи. Причиной помехи является изменение начального режима работы каскада под влиянием различных дестабилизирующих факторов (например, изменений температуры, напряжения источника питания и др.). На входе УПТ оба сигнала (полезный и помехи) складываются, и различить их невозможно. Это создает ложное представление об истинном значении усиленного полезного сигнала.

Изменение сигнала на выходе при отсутствии изменений входного сигнала, вызываемое воздействием дестабилизирующих факторов, называется дрейфом нуля УПТ. Для уменьшения дрейфа нуля стабилизируют источники питания, вводят отрицательную обратную связь, а также применяют специальные балансные схемы.

Одной из наиболее распространенных схем УПТ с ограниченным дрейфом нуля является дифференциальный усилитель. УПТ этого типа построен по принципу сбалансированного четырехплечевого моста (рис.1). Два плеча моста образованы транзисторами $VT1$ и $VT2$, а два других – коллекторными резисторами R_{K1} и R_{K2} . К одной диагонали моста подключается источник питания U_{num} , в другую включается нагрузка R_H . Правая и левая половины параллельно-балансного каскада выполняются одинаковыми. Для этого применяют однотипные транзисторы с одинаковыми параметрами. Соответственно выбираются сопротивления всех резисторов ($R_{K1} = R_{K2}$; $R_1 = R_2$; $R_3 = R_4$).

На коллекторных резисторах R_{K1} и R_{K2} выделяется усиленный сигнал. Резисторы R_1-R_4 фиксируют потенциал баз транзисторов и совместного с резистором R_\varnothing обеспечивают оптимальный выбор рабочих точек транзисторов в режиме покоя. Кроме того, резистор R_\varnothing служит для стабилизации эмиттерного тока. Резистор R_o , повышающий стабильность работы и входное сопротивление УПТ, часто не ставят. В

данной схеме резисторы R_5 и R_0 используются для грубой и точной балансировки усилителя.

Входной сигнал U_{ex} подается между базами обоих транзисторов. При равенстве входных сопротивлений транзисторов на одной базе появляется сигнал $+ U_{ex}/2$, а на второй: $- U_{ex}/2$.

В транзисторах $p-n-p$ -типа повышение потенциала базы вызывает уменьшение коллекторного тока. В результате этого потенциал коллектора относительно массы понижается. Соответственно понижение потенциала базы второго транзистора увеличивает коллекторный ток и повышает потенциал коллектора.

Разность потенциалов обоих коллекторов является выходным напряжением $U_{вых}$ усилителя. Коэффициент усиления балансного УПТ равен коэффициенту усиления одной половины каскада:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = \frac{h_{21\alpha}R_K}{(h_{11\alpha}(1 + h_{22\alpha}R_K))},$$

где $h_{11\alpha}; h_{21\alpha}; h_{22\alpha}$ – h -параметры транзисторов (из справочника).

Входные сопротивления дифференциального усилителя R_{ex} :

$$R_{ex} = 2h_{11\alpha}.$$

Выходное сопротивление усилителя $R_{вых}$:

$$R_{вых} = \frac{2R_K}{1 + h_{22\alpha}R_K}.$$

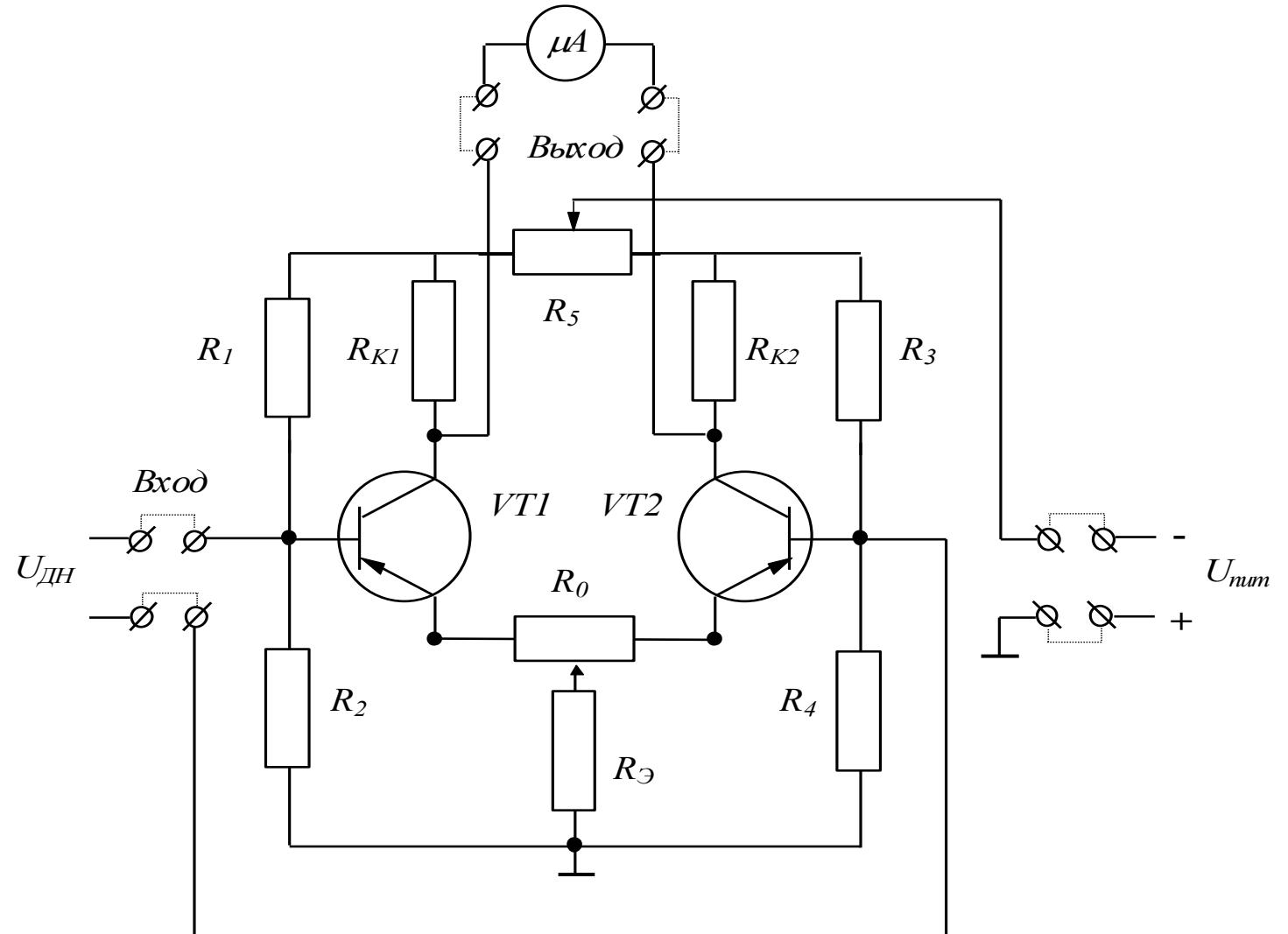


Рис.1. Принципиальная схема УПТ на параллельно-балансном каскаде

2. Описание лабораторной установки

В центральной части панели на рис.1. размещен исследуемый УПТ, собранный по схеме параллельно-балансного или дифференциального каскада. На панели приведена схема этого усилителя. Усилитель полностью собран, и на панели стенда выведены гнезда для внешних подключений.

В правой части стенда расположен источник питания УПТ. На лицевую панель стенда выведен переключатель “Источник питания”, позволяющий ступенчато регулировать величину напряжения питания.

В левой части стенда расположен калиброванный делитель напряжения с переключателем. Делитель подключен к источнику питания, полярность которого изменяется тумблером $P2$.

В верхней центральной части панели расположен микроамперметр, предназначенный для контроля установки нуля УПТ. В центральной части панели расположены рукоятки грубой и точной установки нуля УПТ “УСТ. 0”. Для измерения выходного напряжения используется цифровой вольтметр В7-22А. Шнур, вилка и тумблер $P1$ предназначены для подключения стенда к внешней сети.

Порядок выполнения

Изучить схему и принцип действия дифференциального УПТ. Провести балансировку (“установку нуля”) УПТ. Для этого:

- выполнить соединения, указанные на схеме пунктирными линиями;
- переключателем “Источник питания” установить номинальное напряжение $U_{num} = 11,4$ В;
- переключатель “Делитель напряжения” поставить в положение “0”;
- тумблером $P1$ включить стенд и регулятором установки нуля “УСТ. 0” добиться отсутствия напряжения на выходе УПТ.

При номинальном напряжении питания снять амплитудную характеристику УПТ: $U_{вых} = F(U_{вх})$. Для этого:

- подключить цифровой вольтметр В7-22А к гнездам “Выход” УПТ;
 - поставить тумблер $P2$ в положение “+”;
- постепенно увеличивая напряжение калиброванного делителя с помощью переключателя “Делитель напряжения”, записать несколько значений выходного напряжения в таблицу 1.

Таблица 1

| $U_{вх}$, В | | | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{вых}$, В | | | | | | | |

- изменить полярность напряжения делителя тумблером $P2$ и повторить измерения;
- по результатам измерений построить амплитудную характеристику УПТ.

4. Определить влияние напряжения питания U_{num} на коэффициент усиления УПТ. Для этого:

- делителем напряжения установить величину входного напряжения (задается преподавателем);
- изменяя напряжение источника питания переключателем “Источник питания”, записать значения выходного напряжения. Результаты внести в таблицу 2.

Таблица 2

| $U_{ex} = \dots\dots$ | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{вых}, В$ | | | | | | | |
| $U_{пит}, В$ | | | | | | | |

По результатам измерений определить коэффициент усиления и построить характеристику $K_U = F(U_{num})$ при $U_{ex} = const$.

5. Определить дрейф нуля при изменении напряжения источника питания и $U_{ex} = 0$. Для этого:

- поставить делитель напряжения в положение “0” ($U_{ex} = 0$);
- установить предел 2 В на цифровом вольтметре В7-22А;
- проверить установку нуля при номинальном напряжении питания $U_{num} = 11,4$ В;
- изменяя напряжение источника питания, записать изменения выходного напряжения в таблицу 3.

Таблица 3

| $U_{ex} = 0.$ | | | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{вых}, В$ | | | | | | | |
| $U_{пит}, В$ | | | | | | | |

6. Снять и построить частотную характеристику УПТ $K_U = F(f)$ при $U_{ex} = const$.

Для этого:

- подготовить к работе осциллограф С1-68 и провести калибровку канала вертикального отклонения луча;
- поставить рычажок “Развертка” в положение “Х”;
- подготовить к работе генератор колебаний инфразвуковой частоты КЭТ-3Г и установить переключатель на частоту $f = 1$ Гц;
- соединить кабелем выход генератора и “ВХОД Y” осциллографа;
- измерить амплитуду колебаний напряжения U_{ex} генератора, используя масштабную сетку и калибровочные коэффициенты осциллографа;
- переключить соединительный кабель осциллографа на клеммы “ВЫХОД” УПТ;
- подать на вход УПТ напряжение с частотой $f = 1$ Гц от генератора КЭТ-3Г;
- измерить амплитуду выходного напряжения УПТ, используя масштабную сетку и калибровочные коэффициенты осциллографа;

- повторить измерения для всех заданных частот, результаты записать в таблицу

4. Таблица 4

| $U_{ex} = 0$ | | | | | |
|---------------------------------------|---|----|-----|------|-------|
| $f, \text{ Гц}$ | 1 | 10 | 100 | 1000 | 10000 |
| $U_{\text{вых}}, \text{ В}$ | | | | | |
| $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{ex}}$ | | | | | |

Построить частотную характеристику в логарифмическом масштабе по оси абсцисс $K_U = F(\lg f)$.

Контрольные вопросы

1. Назовите три классические схемы усилителей на биполярных транзисторах.
2. Что означает термин «схема с общим эмиттером»?
3. Каково назначение элементов этой схемы?
4. Чем характеризуется режим работы усилителя «по постоянному току»?
5. Как протекают постоянные токи в усилителе?
6. Чем характеризуется режим работы усилителя «по переменному току»?
7. Как протекают переменные токи в усилителе?
8. Что такое коэффициент усиления усилителя? Отчего он зависит?
9. Какой полярности напряжение на коллекторе должно быть у $p-n-p$ и $n-p-n$ транзисторов?

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Определение параметров однокаскадного усилителя»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского
хозяйства

Тема: Определение параметров однокаскадного усилителя.

Цель работы: Изучить принцип действия усилителя, влияние напряжения питания на коэффициент усиления.

Произвести расчет усилителя низкой частоты для однотактного усилителя мощности. Усилитель мощности работает в режиме класса А. Схема каскада усилителя напряжения низкой частоты представлена на рис. 1.

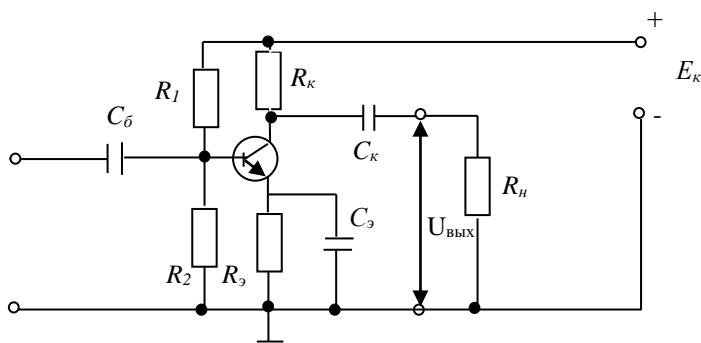


Рис. 1. Усилитель низкой частоты

Исходные данные берутся из таблицы 1 для заданного варианта.

В расчетно-графическом задании считаются заданными: тип транзистора; схема усилителя; рабочая точка транзистора в состоянии покоя; сопротивление нагрузки усилителя R_n ; сопротивление резистора в цепи коллектора R_k ; наименьшая граничная частота усиления f_n ; падение напряжения на резисторе R_3 , которое выбирают в соответствии с требованиями температурной стабильности усилителя.

Некоторые из величин являются общими для всех вариантов, поэтому они не указаны в табл. 1. Это коллекторный ток транзистора $I_{ko} = I$ мА и напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{kэо} = 5$ В в состоянии покоя. Кроме того, сопротивление нагрузки усилителя R_n берут равным рассчитанному предварительно входному сопротивлению усилителя $R_{вх}$, т. е. считают, что данный усилитель имеет в качестве нагрузки такой же каскад усиления.

Нужно иметь в виду, что в схеме усилительного каскада, изображенного на рис. 1, использован транзистор типа *n-p-n*. При выполнении схемы на транзисторе типа *p-n-p* необходимо изменить полярность источника питания E_k . Соответственно изменяется направление токов, протекающих через электронно-дырочные переходы.

Усилительный каскад содержит транзистор с сопротивлением коллекторной нагрузки, цепь температурной стабилизации положения точки покоя (сопротивление R_3 , шунтированное емкостью C_3) и две переходные цепи $C_k R_n$ и $C_b R_{вх}$.

В приводимых далее формулах для расчетов всюду имеются в виду абсолютные значения токов и напряжений. В расчетах следует давать ток в миллиамперах, напряжение в вольтах и сопротивление в килоомах. Расчеты следует производить, используя микрокалькулятор, с точностью порядка 1 %;

значения напряжений после расчета округляют с точностью до 0,1 В, а сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов – с точностью до целого значения. Большинство приведенных формул являются приближенными. Вывод этих формул дается в рекомендуемой литературе.

Для определения основных динамических параметров усилительного каскада аналитическим методом используют h -параметры транзисторов для схемы включения с общим эмиттером ОЭ, которые представляют собой величины, характеризующие применение транзистора как электронного прибора, управляемого током, а именно:

h_{11} – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на его выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи; h_{22} – выходная проводимость транзистора при холостом ходе на его выходе; h_{21} – обратный коэффициент передачи напряжения транзистора при холостом ходе на его выходе. Так как транзистор включен по схеме с общим эмиттером, то h – параметры имеют индекс «Э».

$$h_{11} = \frac{U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}} \quad \text{при } U_{\text{кэ}} = 0; \quad h_{12} = \frac{U_{\text{бэ}}}{U_{\text{кэ}}} \quad \text{при } I_{\text{б}} = 0;$$

$$h_{21} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} \quad \text{при } U_{\text{кэ}} = 0; \quad h_{22} = I_{\text{к}} / U_{\text{ко}} \quad \text{при } I_{\text{б}} = 0.$$

Нужно иметь в виду, что действительные h -параметры транзисторов имеют сильный разброс и зависят от положения рабочей точки. В справочниках обычно приводятся предельные значения параметров: наименьшее и наибольшее. В табл.1 для простоты дается некоторое среднее значение параметров для данного типа транзистора.

Выбор точки покоя сводится к выбору тока коллектора I_{k0} и напряжению $U_{\text{kэ0}}$ в режиме покоя (при отсутствии входного сигнала). Координата этой точки задана по условию $I_{\text{k0}} = 1 \text{ мА}$; $U_{\text{kэ}} = 5 \text{ В}$.

Задание

1. Начертите схему усилителя.
2. Опишите назначение всех элементов схемы.
3. Дайте краткое описание работы схемы усилителя.
4. Рассчитайте параметры элементов схемы и заполните табл. 2.

Порядок работы

Определить падение напряжения $U_{\text{ко}}$ на коллекторном резисторе в состоянии покоя ($I_{\text{k0}} = 1 \text{ мА}$ для всех вариантов; R_{k} берется из табл.1):

$$U_{\text{ко}} = I_{\text{k0}} R_{\text{k}}.$$

Рассчитать ток базы $I_{\text{б0}}$ транзистора в состоянии покоя:

$$I_{\text{б0}} = I_{\text{k0}} / h_{21\text{Э}}.$$

Ток делителя, протекающий по резисторам R_1 , R_2 , берут в 5 раз больше тока базы:

$$I_d = 5 \cdot I_{Bo}.$$

Рассчитать напряжение питания схемы как сумму трех напряжений:

$$E_k = U_{k3} + U_{k0} + U_\varnothing.$$

Значение U_\varnothing задано в табл. 1, $U_{k3} = 5V$ для всех вариантов.

Определить падение напряжения на резисторе R_2 делителя как сумму двух напряжений:

$$U_2 = U_\varnothing + U_{b\varnothing}.$$

напряжение $U_{b\varnothing}$ считают равным для всех вариантов 0,2В.

Определить падение напряжения на резисторе R_1 как разность напряжений питания E_k и падения напряжения на резисторе R_2 :

$$U_1 = E_k - U_2.$$

Рассчитать сопротивление резистора R_2 по закону Ома:

$$R_2 = U_2 / I_2 = U_2 / I_d,$$

где I_d – ток делителя.

При расчете сопротивления резистора R_1 нужно учитывать, что через него протекает сумма токов:

$$R_1 = U_1 / (I_d + I_{Bo}).$$

Найти входное сопротивление усилителя R_{bx} как эквивалентное сопротивление трех включенных параллельно резисторов R_1 , R_2 и $h_{11\varnothing}$.

Сопротивление нагрузки усилителя берется такого же значения:

$$R_{ekv} = R_1 \times R_2 / R_1 + R_2.$$

$$R_{bx} = R_{ekv} \times h_{11\varnothing} / R_{ekv} + h_{11\varnothing}$$

Сопротивление нагрузки усилителя берется такого же значения:

$$R_H = R_{bx}$$

Рассчитать сопротивление резистора R_\varnothing по закону Ома:

$$R_\varnothing = U_\varnothing / (I_{k0} + I_{b0}).$$

Оценить емкость шунтирующего конденсатора C_\varnothing в эмиттерной цепи по приближенной формуле:

$$C_\varnothing = 1 / (2\pi * f_H * r_\varnothing),$$

где $r_\varnothing = 2h_{12\varnothing} / h_{22\varnothing}$.

Оценить емкость разделительного конденсатора на выходе схем по приближенной формуле:

$$C_6 = 1 / f_H R_{bx}.$$

Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы рассчитать по аналогичной формуле, но вместо R_{bx} берут R_H :

$$C_k = 1 / f_H R_H.$$

Определить коэффициент усиления по напряжению в области средних частот:

$$K_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_H.$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = \frac{h_{21}^2}{h_{11}} \cdot R_h.$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_p / K_u$$

Рассеиваемая на коллекторе мощность:

$$P_k = U_{k\vartheta} I_k.$$

не должна превышать максимально допустимой мощности $P_{k,\max}$, которая приводится в табл. 1.

Произвести проверку этого положения (При превышении мощности необходимо изменить режим работы транзистора, уменьшив ток коллектора до 0,5 мА).

Расчетные данные поместить в таблицу 2.

Таблица 2. Расчетные данные

| R_{bx} кОм | R_h кОм | R_1 . кОм | R_2 . кОм | R_ϑ . кОм | I_b мА | $I_{дел}$ мА | I_k мА | E_k В | U_ϑ В | $U_{k\vartheta}$ В |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|------------------------|-------------|-----------------|-------------|------------|--------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | | |

Продолжение табл. 2

| U_k В | U_1 В | U_2 В | C_ϑ пФ | C_b пФ | C_k пФ | K_i | K_u | K_p | P_k Вт |
|------------|------------|------------|---------------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------------|
| | | | | | | | | | |

Варианты заданий

Таблица 1. Варианты заданий

| № вар. | Тип транзистора | $h_{11\beta}$, Ом | $h_{12\beta}$ | $h_{21\beta}$ | $h_{22\beta}$, Ом^{-1} | R_k , кОм | U_β , В | f_H , Гц | P_{Kmax} Вт |
|--------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------|----------------------------------|-------------|---------------|------------|---------------|
| 1 | МП39 | 850 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 28 | $55 \cdot 10^{-6}$ | 2,4 | 24 | 50 | 0,15 |
| 2 | МП40 | 900 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $60 \cdot 10^{-6}$ | 3,1 | 2,2 | 30 | 0,15 |
| 3 | МП41 | 950 | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | 45 | $50 \cdot 10^{-6}$ | 3,6 | 2,8 | 25 | 0,15 |
| 4 | ГТ108А | 540 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 35 | $120 \cdot 10^{-6}$ | 1,8 | 1,1 | 65 | 0,075 |
| 5 | МП116 | 930 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $100 \cdot 10^{-6}$ | 4,8 | 2,3 | 15 | 0,15 |
| 6 | МП15 | 1300 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 45 | $150 \cdot 10^{-6}$ | 1,4 | 0,8 | 70 | 0,15 |
| 7 | МП39Б | 1100 | $6 \cdot 10^{-3}$ | 40 | $45 \cdot 10^{-6}$ | 3,3 | 1,8 | 40 | 0,15 |
| 8 | МП41А | 750 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 75 | $75 \cdot 10^{-6}$ | 4,4 | 3,1 | 10 | 0,15 |
| 9 | ГТ309Б | 4500 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 120 | $250 \cdot 10^{-6}$ | 1,8 | 1,3 | 20 | 0,05 |
| 10 | ГТ322Б | 2500 | $4 \cdot 10^{-3}$ | 85 | $85 \cdot 10^{-6}$ | 3,2 | 2,0 | 35 | 0,2 |
| 11 | МП402 | 900 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $60 \cdot 10^{-6}$ | 4,3 | 14 | 80 | 0,15 |
| 12 | МП114 | 930 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $100 \cdot 10^{-6}$ | 4,8 | 1,6 | 90 | 0,15 |
| 13 | МП40А | 1100 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $56 \cdot 10^{-6}$ | 5,1 | 2,0 | 85 | 0,15 |
| 14 | ГТ308А | 540 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 35 | $120 \cdot 10^{-6}$ | 6,3 | 2,5 | 95 | 0,075 |
| 15 | МП39 | 850 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 28 | $55 \cdot 10^{-6}$ | 4,4 | 1,7 | 85 | 0,15 |
| 16 | ГТ309Б | 4500 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 120 | $120 \cdot 10^{-6}$ | 5,2 | 2,6 | 75 | 0,05 |
| 17 | МП38 | 1300 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 45 | $150 \cdot 10^{-6}$ | 4,4 | 1,7 | 60 | 0,15 |
| 18 | МП39Б | 1100 | $6 \cdot 10^{-3}$ | 40 | $46 \cdot 10^{-6}$ | 6,8 | 2,3 | 90 | 0,15 |
| 19 | ГТ322Б | 2500 | $4 \cdot 10^{-3}$ | 85 | $85 \cdot 10^{-6}$ | 7,0 | 24 | 70 | 0,2 |
| 20 | МП41А | 750 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 75 | $75 \cdot 10^{-6}$ | 6,2 | 1,8 | 50 | 0,15 |
| 21 | ГТ313Б | 2000 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 70 | $80 \cdot 10^{-6}$ | 6 | 2,4 | 60 | 0,15 |
| 22 | МП38 | 900 | $6 \cdot 10^{-3}$ | 40 | $90 \cdot 10^{-6}$ | 4,4 | 2,2 | 15 | 0,15 |
| 23 | МП25 | 1000 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $100 \cdot 10^{-6}$ | 4,8 | 1,8 | 25 | 0,15 |
| 24 | МП38 | 800 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 30 | $50 \cdot 10^{-6}$ | 2,4 | 2,0 | 50 | 0,15 |
| 25 | МП40 | 900 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 28 | $50 \cdot 10^{-6}$ | 3,0 | 2,2 | 30 | 0,15 |

Примечание: К транзисторам типа $p-n-p$ относятся МП-20-МП21Е; МП25-МП26Б; МП39-МП41А; МП114-МП-116; П201-П203Э; ГТ308А-ГТ308В; ГТ309А-ГТ311И; КТ313-ГТ313Б; ГТ402А-ГТ403И; П416-П416Б; П4А-П4А; П401-П402А; ГТ320-ГТ321Е.

К транзисторам типа $n-p-n$ относятся МП-35-МП38; КТ312А-КТ312В; КТ404А.

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение схем релаксационных генераторов, автогенераторов»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского
хозяйства

Тема: Изучение схем релаксационных генераторов, автогенераторов.

Цель работы: Изучить принцип действия электронных генераторов.

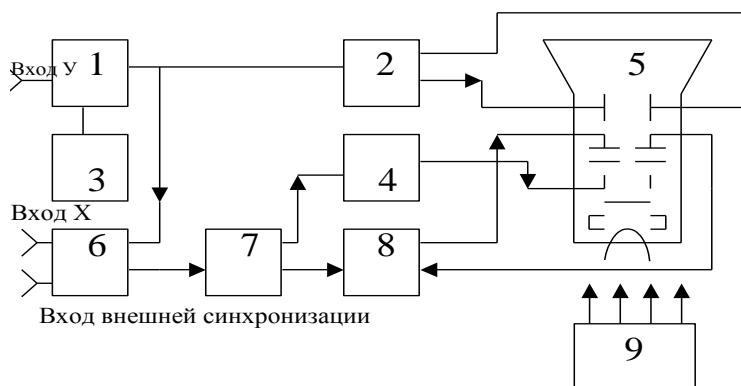
Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, релаксационный RC-генератор, источник питания.

Принципиальное устройство и работа осциллографа

Электронный осциллограф – это прибор, предназначенный для визуального наблюдения и регистрации, а также измерения различных параметров периодических и непериодических электрических сигналов, позволяющий определять их форму, величину, временные и частотные соотношения. Например, с помощью осциллографа можно измерять силу тока, напряжение и их изменение во времени, сдвиг фазы между электрическими сигналами, сравнивать частоты и амплитуды различных сигналов.

Электронный осциллограф является одним из самых распространенных измерительных приборов, он располагает возможностью графического представления исследуемых процессов (данная форма наиболее удобна для восприятия), имеет большое входное сопротивление, высокую чувствительность, а также малую инерционность и широкий частотный диапазон. Он широко применяется при изучении переходных режимов в электрических цепях. Если имеется возможность преобразовывать неэлектрические величины в напряжение электрического сигнала, осциллограф применяют для исследования физических процессов в механике, теплотехнике, диагностике двигателей и в других областях науки и техники.

На рис. 1 представлена схема осциллографа, основными узлами которого являются: электронно-лучевая трубка 5 со схемой управления лучом 4, входной каскад 1 и усилитель канала вертикального отклонения луча 2, блок синхронизации 6, калибратор 3, генератор развертки 7, усилитель канала горизонтального отклонения луча 8 и блок питания 9.



Puc. 1

Исследуемый сигнал подается на вход "Y" входного каскада 1 канала вертикального отклонения луча. Входной каскад обеспечивает минимальное влияние осциллографа на исследуемый сигнал и его согласование с усилителем напряжения 2 канала. С выхода усилителя напряжения, определяющего предельную чувствительность осциллографа, исследуемый сигнал подается на вертикально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубы 5. Исследуемый сигнал может также непосредственно подаваться на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубы.

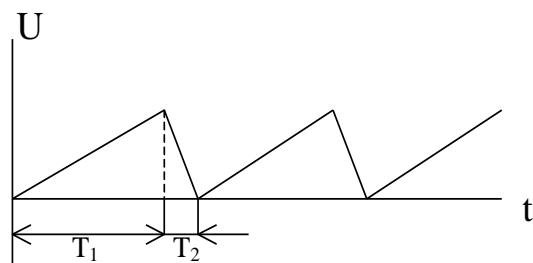


Рис. 2

Генератор развертки 7 генерирует напряжение, которое линейно изменяется со временем (рис. 2), усиливается усилителем 8 канала горизонтального отклонения луча и подается на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубы. Под действием этого напряжения электронный луч в течение времени T_1 перемещается по экрану осциллографа слева направо пропорционально времени и практически мгновенно за время $T_2 \ll T_1$ возвращается обратно. При совпадении периодов напряжения развертки исследуемого сигнала или кратном их соотношении, что достигается регулировкой частоты развертки органами управления, на экране осциллографа будет наблюдаться график изучаемого процесса.

Неподвижность изображения из-за нестабильности частоты генератора не может быть сохранена в течение длительного времени. Поэтому генератор

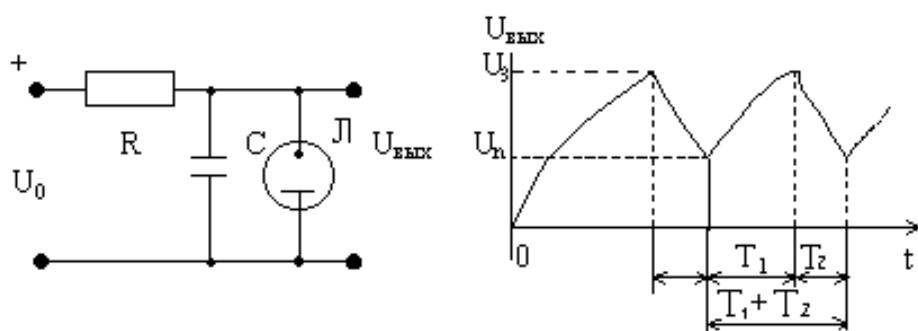
развертки синхронизируется исследуемым сигналом. Формирование сигнала синхронизации прямоугольной формы осуществляется блоком синхронизации 6 независимо от величины и формы входного сигнала. Благодаря этому достигается устойчивый запуск генератора развертки. Для запуска может использоваться внешний сигнал, подаваемый на гнездо "вход синхронизации".

Контроль коэффициента развертки и коэффициента вертикального отклонения луча осуществляется с помощью калибратора 3, встроенного в осциллограф вырабатывающего прямоугольные импульсы заданной амплитуды и длительности.

Питание блоков осциллографа осуществляется стабилизированным напряжением от блока питания 9, обеспечивающего устойчивое напряжение питания при колебаниях напряжения в сети.

Релаксационный RC-генератор

RC-генератор релаксационных колебаний состоит из элемента, накапливающего энергию конденсатора, и активного сопротивления R . Схема простейшего генератора изображена на рис. 3. При подаче постоянного напряжения на вход генератора конденсатор C заряжается через сопротивление R до напряжения зажигания U_3 неоновой лампы L . В момент зажигания неоновая лампа начинает проводить ток, и конденсатор быстро разряжается через нее. При некотором напряжении U_n (напряжение погасания) лампа погаснет, ее сопротивление резко возрастет и разряд конденсатора прекратится. Начнется новый цикл заряда конденсатора. Колебания напряжения на конденсаторе имеют пилообразную форму (рис.4).



Заряд конденсатора происходит за время T_1 , разряд - за время T_2 , причем $T_1 \gg T_2$. Период колебаний напряжения на конденсаторе $T = T_1 + T_2 \approx T_1$.

Определим закон изменения напряжения на конденсаторе. По закону Кирхгофа

$$U_0 = U_R + U_C,$$

где U_0 – напряжение, поданное на RC-цепь; U_R – напряжение на сопротивлении R при протекании через него зарядного тока i, равное

$$U_R = iR = \frac{dq}{dt}R,$$

где q – заряд, протекающий в цепи; U_C – напряжение на конденсаторе, которое определяется формулой

$$U_C = \frac{q}{C}.$$

Поэтому уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{dq}{dt}R + \frac{q}{C} = U_0.$$

После введения подстановки $Z = q - U_0C$ уравнение сводится к однородному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными

$$\frac{dZ}{dt} + \frac{Z}{RC} = 0,$$

интегрируя которое и возвращаясь к переменной q, можем записать

$$\ln(q - U_0C) = -\frac{1}{RC}t + \ln q_0.$$

Пропотенцируем полученное выражение:

$$q = U_0C + q_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right).$$

Постоянную интегрирования q_0 определим из начального условия; в начальный момент времени заряд на конденсаторе равен 0, т.е. $q = 0$ при $t=0$.

Тогда $q_0 = -U_0C$.

Соответственно заряд конденсатора меняется во время его зарядки по закону

$$q(t) = U_0C \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right),$$

а напряжение

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right),$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи.

Величина τ равна времени, необходимому для зарядки конденсатора до ~ 0.67 от его полного заряда при данном напряжении U_0 . Полагая в (4) $t = \tau$, получим

$$U_{C/t=\tau} = U_0(1 - e^{-1}) = 0,67U_0.$$

Период релаксационных колебаний зависит от параметров схемы (от постоянной времени $\tau = RC$) и от потенциалов зажигания и погасания лампы. Пусть лампа гаснет в момент времени t_1 при потенциале U_n на конденсаторе, а зажигается в момент времени t_2 при потенциале U_3 :

$$U_n = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right),$$

откуда

$$U_3 = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right) \right),$$

$$RC \cdot \ln \frac{U_0 - U_n}{U_0 - U_3} = T_I \approx T.$$

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить осциллограф к работе в соответствии с описанием прибора.
2. Измерить напряжение "зажигания" U_3 и напряжение "погасания" U_n неоновой лампы, а также напряжение U_0 на входе генератора.

Для этого при отсутствии напряжения на входе RC генератора установить луч ручкой вертикального перемещения в нижнюю часть экрана, совместив его с последним делением шкалы.

После включения напряжения питания генератора получить изображение 3÷5 периодов релаксационных колебаний, используя "открытый" вход осциллографа и входной делитель «1÷10». Изображение должно быть устойчивым и иметь наибольший размер в пределах рабочей части шкалы прибора.

3. Измерить время заряда T_I и время разряда T_2 конденсатора, используя "закрытый" вход осциллографа. Изображение измеряемого временного интервала

должно занимать почти весь экран осциллографа, что достигается выбором диапазона развертки.

4. Снять, используя "открытый" вход, зависимость $U(t)$ напряжения на конденсаторе при его зарядке от времени.

При подготовке прибора к измерению при отключенном напряжении питания RC-генератора установить луч на нижнем делении шкалы. После включения питания RC-генератора получить наибольший размер исследуемого временного интервала в пределах рабочей части экрана соответствующим выбором диапазона развертки и коэффициента отклонения луча.

Изображение исследуемого сигнала перевести на кальку, наложив ее на экран. Отметить на ней оси координат и записать коэффициент отклонения луча и диапазон развертки. При необходимости изображение исследуемого сигнала можно снять по точкам, определив координаты 10 точек кривой.

5. Повторить измерения для двух других значений сопротивления R .

6. Обработать полученные результаты:

- рассчитать постоянную времени RC-цепи $\tau_{\text{расч}}$ для каждого случая по известным значениям R и C ;

- рассчитать значение T_1 по формуле (5); оценить погрешность расчета T_1 и прямых измерений T_1 , используя сведения о погрешности измерения амплитуды и временных интервалов; сравнить рассчитанные и измеренные значения периода колебаний RC-генератора; определить частоту колебаний генератора $v = 1/T = 1/T_1$;

- сравнить измеренное время заряда T_1 и разряда T_2 конденсатора; определить, справедливо ли соотношение $T_1 \gg T_2$, считая, что оно удовлетворительно выполняется при отношении $T_2/T_1 \leq 0.1$; оценить погрешность измерения периода колебаний генератора, вызванную пренебрежением T_2 ;

- определить, выполняется ли закон изменения напряжения (4) на конденсаторе, для чего построить зависимость

$$\ln \frac{U_0 - U_C}{U_0} = f(t),$$

используя полученные осцилограммы $U = f(t)$.

Из формулы (4) следует, что величина

$$\ln \frac{U_0 - U_C}{U_0} = -\frac{1}{\tau} t$$

линейно зависит от времени, следовательно, при выполнении закона (4) построенные в координатах $\ln[(U_0 - U_C)U_0]$, t графики должны представлять собой прямые линии с наклоном $-\frac{1}{\tau}$.

При выполнении закона (4) определить по графикам постоянные времени RC-цепей. Сравнить полученные значения τ_e с результатами $\tau_{\text{расч}}=RC$.

Полученные результаты занести в рекомендуемые таблицы (табл. 1, 2, 3).

Таблица 1

Исследование режима RC-генератора

| № | R Ом | C мкФ | U ₀ | | U _n | | U ₃ | | T ₁ | | T ₂ | |
|---|---------|----------|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|---|
| | | | дел | В | дел | В | дел | В | дел | с | дел | с |
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |

Величина времени развертки на деление: T_p

Погрешность измерения времени: E_t

Погрешность измерения амплитуды: E_A

Таблица 2

Расчеты периода и частоты RC-генератора

| № | R Ом | C мкФ | $\tau_{\text{расч}}$ с | $T_{1\text{расч}}$ с | $\Delta T_{\text{расч}}$ с | ν Гц | $T_2/T_1 \%$ | $T_2/(T_1 + T_2) \%$ |
|---|---------|----------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| | | | | | | | | |

Вопросы для допуска к работе

- Поясните цель работы.
- Объясните принцип действия RC-генератора и временную диаграмму его работы.
- Укажите измеряемые величины и способ их измерения.

Контрольные вопросы:

- Поясните принцип действия осциллографа, перечислите его основные узлы.

2. Поясните принцип действия релаксационного RC-генератора и выведите зависимость $U = f(t)$ для зарядки конденсатора.
3. Выведите формулу периода релаксационных колебаний.
4. Дайте анализ полученных результатов.
5. Выведите формулу погрешностей расчета периода колебаний RC-генератора.
6. Объясните методику измерений амплитудных и временных интервалов осциллографом.

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение работы мультивибратора в ждущем режиме»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского
хозяйства

Тема: Изучение работы мультивибратора в ждущем режиме.

Цель работы: изучение принципа действия автоколебательного и ждущего мультивибраторов.

Краткие теоретические сведения

Мультивибратор представляет собой релаксационный генератор колебаний почти прямоугольной формы. Он является двухкаскадным усилителем на резисторах с положительной обратной связью, в котором выход каждого каскада соединен со входом другого. Название "мультивибратор" происходит от двух слов: "мульти" - много и "вибратор" - источник колебаний, поскольку колебания мультивибратора содержат большое число гармоник. Мультивибратор может работать в автоколебательном режиме, режиме синхронизации и ждущем режиме.

При работе в режиме автоколебаний мультивибратор без внешнего воздействия вырабатывает импульсы, период повторения и длительность которых определяются параметрами схемы мультивибратора. В режиме синхронизации на мультивибратор действует извне синхронизирующее напряжение, частота которого определяет частоту импульсов. В ждущем режиме мультивибратор при отсутствии внешних импульсов запуска находится в состоянии покоя (в состоянии устойчивого равновесия) и не генерирует никаких импульсов. Лишь при воздействии импульсов запуска, поступавших от внешнего генератора, мультивибратор вырабатывает только один рабочий импульс, после чего возвращается в исходное состояние. Таким образом, частота следования пульсов, генерируемых ждущим мультивибратором, задается не параметрами схемы, а частотой следования импульсов запуска. Параметры же схемы определяют длительность вырабатываемых импульсов.

Мультивибраторы применяются в устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники (в т.ч. в реле времени (метроном - это часы, позволяющие по звуковым сигналам отсчитывать равные промежутки времени с точностью до долей секунды), задающих устройствах, формирователях ЭВМ и радиотехнических игрушках), в устройствах радиотехники в качестве задающих генераторов и формирователей импульсов, делителей частоты, бесконтактных переключателей тока и др.

Автоколебательный мультивибратор

Рассмотрим схему мультивибратора, показанную на рисунке 1.

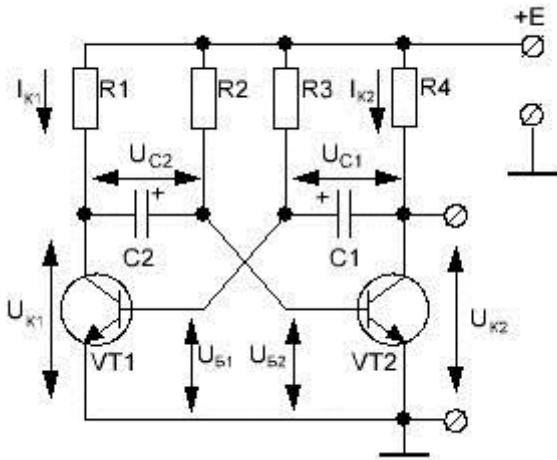


Рисунок 1 – Схема автоколебательного мультивибратора

Транзистор VT2 находится либо в закрытом (интервалы T_1 , $U_{k2}=E$), либо в открытом (интервалы T_2 , $U_{k2}<E$) состоянии (рисунок 2).

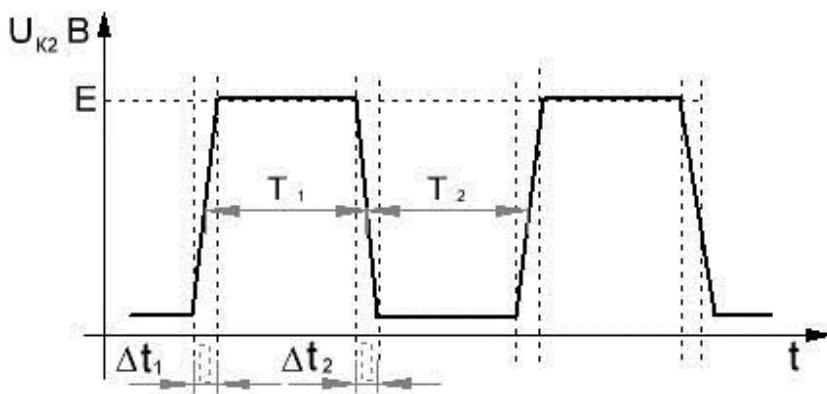


Рисунок 2 – Напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT2

Переход из закрытого состояния в открытое и обратный переход (интервалы Δt_1 и Δt_2) происходит очень быстро ($\Delta t_1, \Delta t_2 \ll T_1, T_2$). Транзистор VT1 работает в противофазе с транзистором VT2. (VT2 открыт, VT1 закрыт и т.д.). В течение переходных интервалов Δt_1 и Δt_2 оба транзистора открыты, усилитель обладает большим коэффициентом усиления, токи и напряжения транзисторов изменяются очень быстро. Затем следует интервал (T_1 или T_2) квазистабильного (т.е. устойчивого в течение некоторого промежутка времени) состояния, определяемого зарядом или разрядом конденсаторов.

Мультивибратор бывает как симметричным, так и несимметричным. У симметричного мультивибратора коллекторные сопротивления в обоих плечах одинаковы, одинаковы также базовые сопротивления и емкости (одинаковые транзисторы, сопротивления и емкости, т.е. $R_2=R_4$, $R_1=R_3$, $C_1=C_2$). Рассмотрим

работу симметричного мультивибратора. Будем считать изменение токов транзисторов мгновенным, т. е. время рассасывания зарядов много меньше времени зарядов конденсаторов.

Принцип работы мультивибратора

Если транзистор VT1 открыт и находится в режиме насыщения, то в это же время транзистор VT2 заперт (рисунок 2). При этом правая обкладка конденсатора C1 соединена через R4 с источником питания, а левая соединена с базой транзистора VT1. Протекающий зарядный ток поддерживает потенциал базы транзистора VT1 на уровне, близком к $U_{B1} \approx 0.8V$, вполне достаточном, чтобы VT1 находился в режиме насыщения. Напряжение на базе U_{B1} не может стать заметно большим этого напряжения, из-за ограничивающего действия экспоненциальной входной характеристики транзистора и ограничения тока через резистор R4. Конденсатор C1 заряжается до напряжения $E - U_{B1}$. После окончания заряда конденсатора C1 напряжение остается примерно таким же и поддерживается за счет тока через R4.

Во время и после окончания заряда конденсатора C1 транзистор VT2 остается запертым напряжением на конденсаторе C2, зарядившемся в предыдущий полупериод.

В самом деле, если C2 зарядился до напряжения $E - U_{B2}$, то все это напряжение приложено между базой и эмиттером VT2, так как потенциал левой обкладки конденсатора, равный напряжению коллектор-эмиттер насыщенного транзистора VT1, очень близок к нулю.

Чтобы транзистор VT2 открыл, необходимо, чтобы конденсатор C2 не только полностью разрядился, но и частично перезарядился до напряжения $U_{B2} \approx 0.6V$, при котором VT2 открывается. Как только транзистор VT2 начинает проводить, его коллекторный потенциал U_{K2} падает. Понижение U_{K2} передается через конденсатор C1 и вызывает падение потенциала U_{B1} на базе транзистора VT1. Вследствие этого транзистор VT1 переходит в активный режим, что вызовет дальнейшее увеличение тока транзистора VT1, и т. д. Возникающий при этом регенеративный процесс быстро переключает схему из одного квазистабильного состояния в другое, при котором VT1 находится в закрытом состоянии, а VT2 – в открытом состоянии. Транзисторы меняются состояниями.

На рисунке 4 приведены зависимости коллекторного тока и напряжений на коллекторе и базе транзистора VT1. Аналогичные зависимости для транзистора VT2 имеют такой же вид, но сдвинуты по фазе на половину периода.

Разность потенциалов на обкладках конденсаторов C1 и C2 во время скачка не меняется, так как конденсатор пропускает скачок напряжения. Потенциал коллектора VT2 за время скачка изменяется от нуля (открытого) до + E, (когда он

заперт). На такую же величину изменяется за время скачка и потенциал базы транзистора VT1.

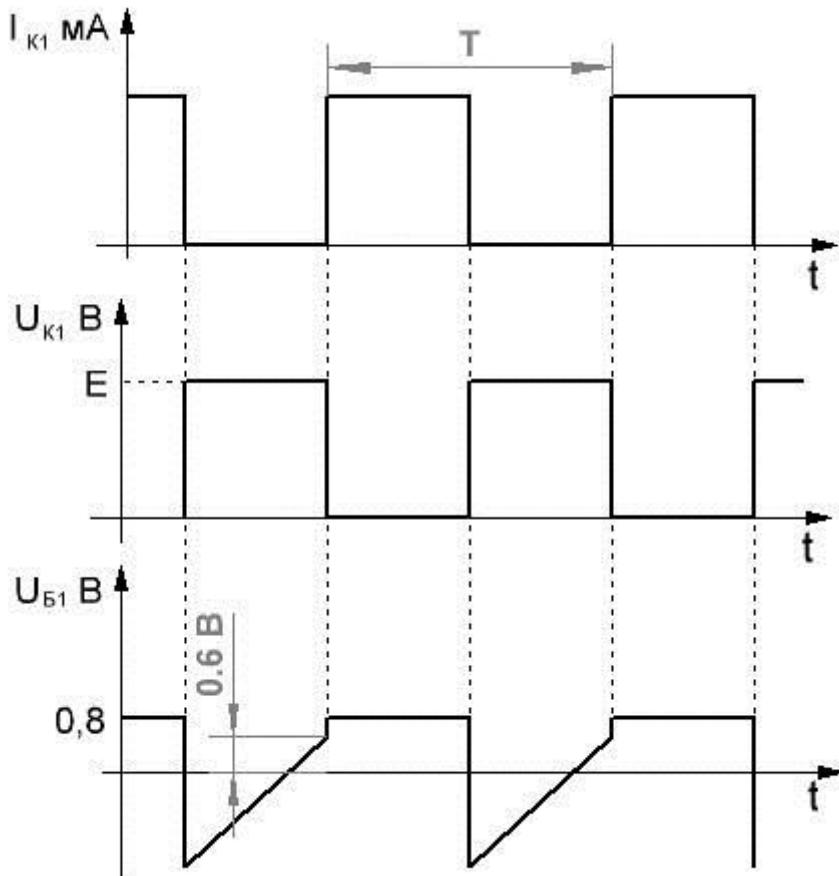


Рисунок 4 – Зависимости коллекторного тока и напряжений на коллекторе и базе транзистора VT1

Потенциал коллектора транзистора VT1, при этом претерпевает скачок от E , до нуля, а потенциал базы транзистора VT2 изменяется от нуля до $U_{B2} = E$. После скачка система находится в неустойчивом квазистатическом состоянии, которое не может продолжаться сколь угодно долго. Конденсатор C1 заряженный во время предшествующего цикла до потенциала источника питания, будет разряжаться через открытый транзистор VT1 и сопротивление R4 (рисунок 5) поддерживая положительный потенциал на базе транзистора VT1 т. е. держа его открытым до тех пор, пока потенциал базы не упадет до нуля.

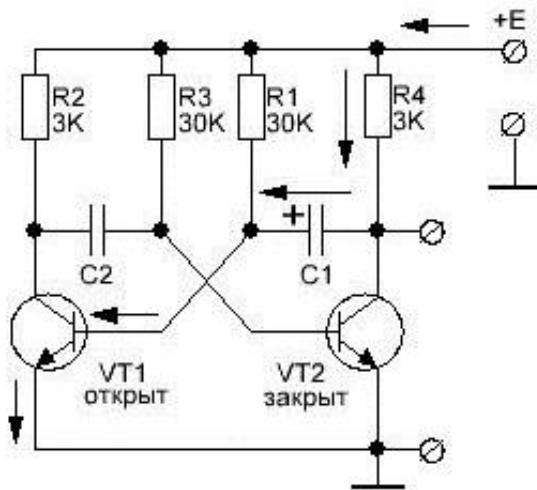


Рисунок 5 – Цепь разряда конденсатора С1 в мультивибраторе

Заметим, что цепь разряда конденсатора С1, такая: + E, сопротивление R4, конденсатор С1, транзистор VT1, –E (рисунок 5). Влиянием сопротивления R1 можно пренебречь, так как оно много больше, чем сопротивление открытого перехода база-эмиттер транзистора VT1.

В то время как цепь заряда конденсатора С2: +E, R3, С2, открытый транзистор VT1, –E (рисунок 6).

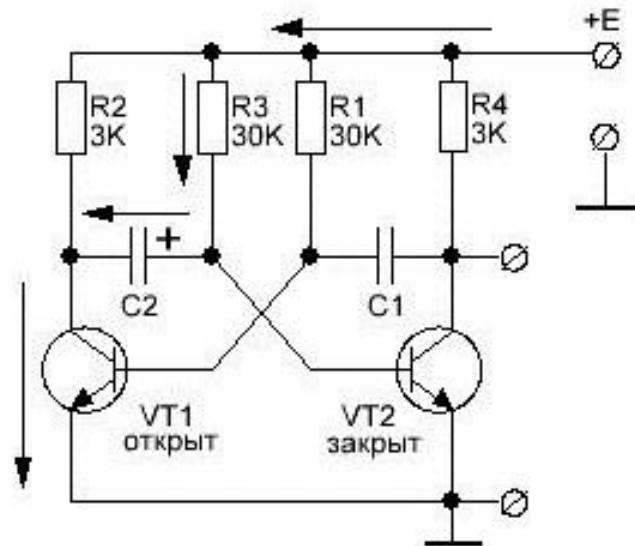


Рисунок 6 – Цепь заряда конденсатора С2 в мультивибраторе

Вследствие заряда конденсатора С2 будет увеличиваться потенциал базы транзистора VT2 – U_{B2} . Появится ток через транзистора VT2, который вызовет уменьшение потенциала его коллектора U_{K2} . Транзистор VT2 начнет открываться. Это приведет к уменьшению тока коллектора транзистора VT1 (закрывается), и т.д. В результате этого процесса произойдет новый скачок и система перейдет в другое квазистабильное состояние, при котором транзистор VT1, окажется запертым, а транзистор VT2 открытым.

После чего конденсатор С2 будет разряжаться так, что будет поддерживать запертым транзистор VT2, до тех пор, пока потенциал U_{B2} на базе VT2 не станет

равным нулю. Тогда начнет проходить ток через VT1, и все повторится. Колебания будут представлять собой смену квазистойчивых состояний.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Начертить схему автоколебательного мультивибратора.
3. Начертить схему ждущего мультивибратора.
4. Пояснить принцип действия автоколебательного мультивибратора.
5. Начертить временные диаграммы мультивибраторов и пояснить принцип действия ждущего мультивибратора.
6. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы.

1. Что такое мультивибратор?
2. В какие интервалы времени открыты оба транзистора у мультивибратора?
3. Почему транзисторы в мультивибраторе не могут быть открыты в течение длительных интервалов времени?
4. Изменится ли период, повторения напряжения мультивибратора при увеличении (уменьшении) емкости конденсатора C1?
5. В каких режимах может работать мультивибратор?
6. Чем автоколебательный режим мультивибратора отличается от ждущего?
7. Какую форму имеют импульсы напряжения на выходе автоколебательного мультивибратора?
8. Какую функцию выполняют конденсаторы связи автоколебательного мультивибратора?
9. Каким образом частота импульсов зависит от напряжения питания мультивибратора?
10. Как сделать, чтобы длительности импульсов, получаемых на правом и левом транзисторах, были различными?
11. Где и с какой целью используют автоколебательные мультивибраторы?

БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Построение схем на логических элементах»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского
хозяйства

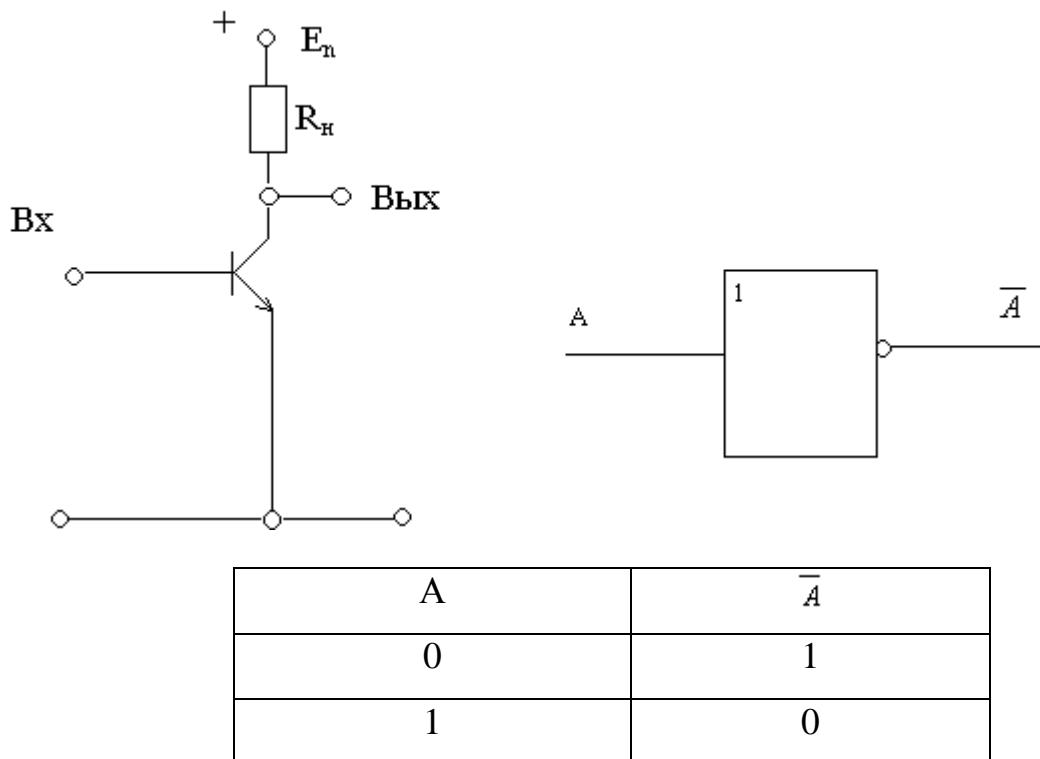
Тема: Построение схем на логических элементах.

Цель работы: Изучение принципа построения схем на логических элементах.

Краткие теоретические сведения

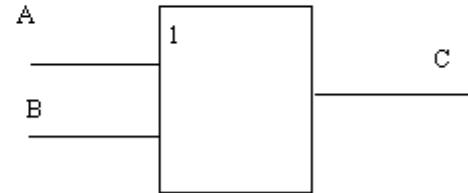
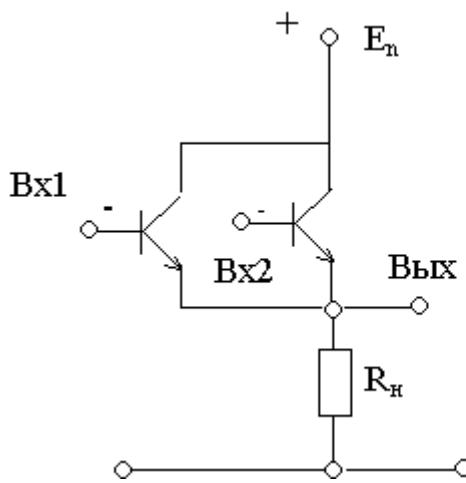
В основе обработки компьютером информации лежит алгебра логики, разработанная Дж. Булем. Было доказано, что все электронные схемы ЭВМ могут быть реализованы с помощью логических элементов И, ИЛИ, НЕ.

Элемент НЕ



При подаче на вход схемы сигнала низкого уровня (0) транзистор будет заперт, т.е. ток через него проходить не будет, и на выходе будет сигнал высокого уровня (1). Если же на вход схемы подать сигнал высокого уровня (1), то транзистор “откроется”, начнет пропускать электрический ток. На выходе за счет падения напряжения установится напряжение низкого уровня. Таким образом, схема преобразует сигналы одного уровня в другой, выполняя логическую функцию.

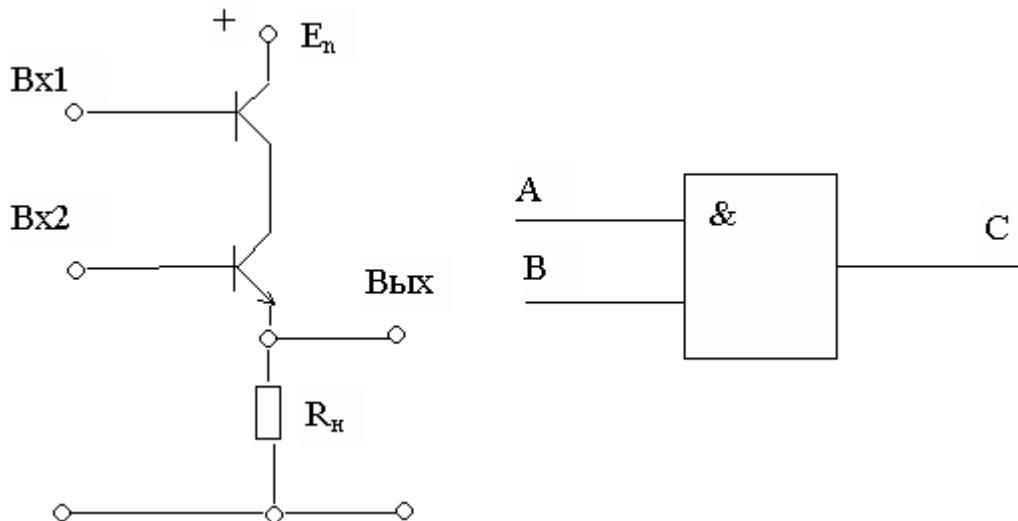
Элемент ИЛИ



| A | B | C |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Функция “ИЛИ” - логическое сложение (дизъюнкция), ее результат равен 1, если хотя бы 1 из аргументов равен 1. Здесь транзисторы включены параллельно друг другу. Если оба закрыты, то их общее сопротивление велико и на выходе будет сигнал низкого уровня (логический “0”). Достаточно подать сигнал высокого уровня (“1”) на один из транзисторов, как схема начнет пропускать ток, и на сопротивлении нагрузки установится также сигнал высокого уровня (логическая “1”).

Элемент И

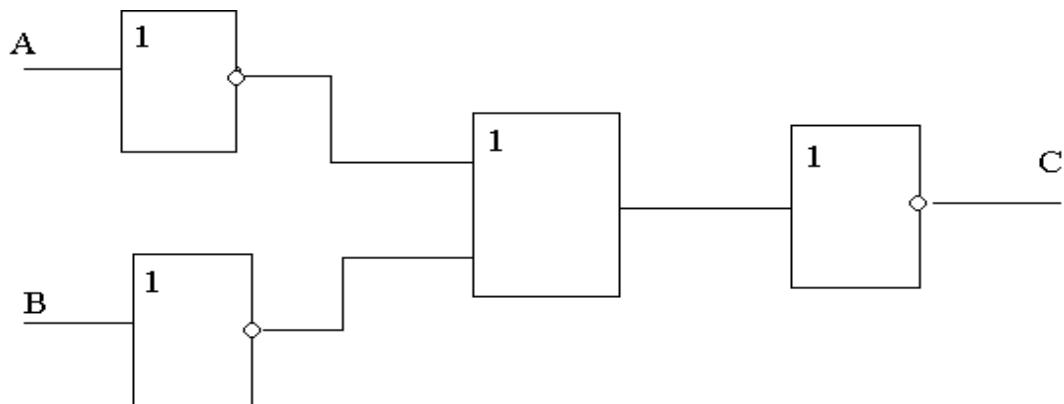
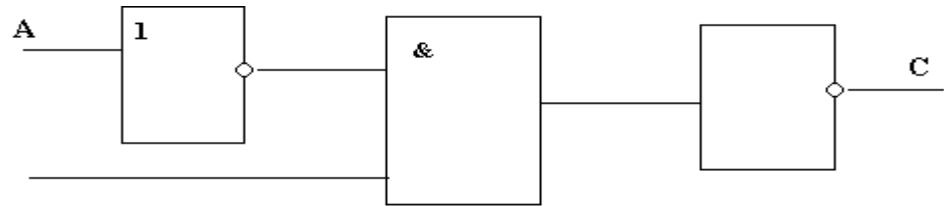


| A | B | C |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Если на входы $Bx1$ и $Bx2$ поданы сигналы низкого уровня (логические “0”), то оба транзистора закрыты, ток через них не проходит, выходное напряжение на R_h близко к нулю. Пусть на один из входов подано высокое напряжение (“1”). Тогда соответствующий транзистор откроется, однако другой останется закрытым, и ток через транзисторы и сопротивление проходить не будет. Следовательно, при подаче напряжения высокого уровня лишь на один из транзисторов, схема не переключается и на выходе остается напряжение низкого уровня. И лишь при одновременной подаче на входы сигналов высокого уровня (“1”) на выходе мы также получим сигнал высокого уровня.

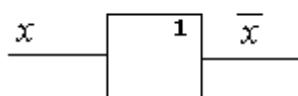
Таким образом, каждой базовой логической функции – «И», «ИЛИ», «НЕ» - соответствует особым образом сконструированная схема, называемая логическим элементом. Комбинируя сигналы, обозначающие логические переменные, и выходы, соответствующие логическим функциям, с помощью логических элементов, пользуясь таблицей истинности или представлением логической функции в виде КНФ и ДНФ, можно составить структурную или

функциональную схему (см. примеры ниже), являющуюся основой для аппаратной реализации схемы.

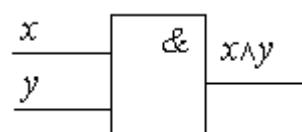


Анализируя функциональную схему, можно понять, как работает логическое устройство, т.е. дать ответ на вопрос: какую функцию она выполняет. Не менее важной формой описания логических устройств является структурная формула. Покажем на примере как записывают формулу по заданной функциональной схеме (1 схема). Ясно, что элемент “И” осуществляет логическое умножение значений \bar{A} и B . Над результатом в элементе “НЕ” осуществляется операция отрицания, т.е. вычисляется значение выражения: $\bar{\bar{A} \cdot B}$. Формула $C = \bar{\bar{A} \cdot B}$ и есть структурная формула логического устройства.

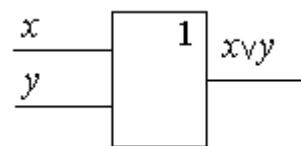
Основные логические функции обозначаются:



Инверсия:

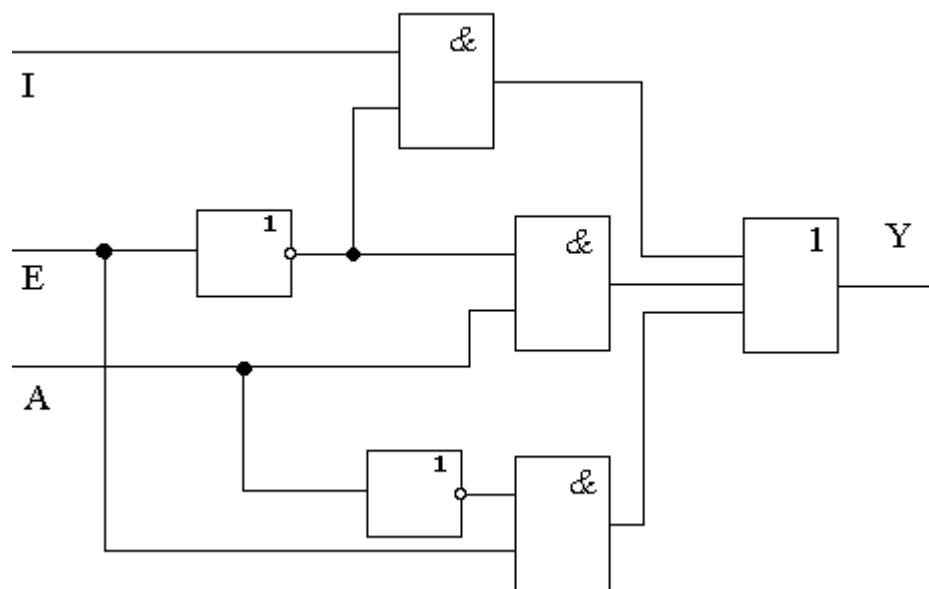


Конъюнкция:



Дизъюнкция:

Пример: дана логическая схема:



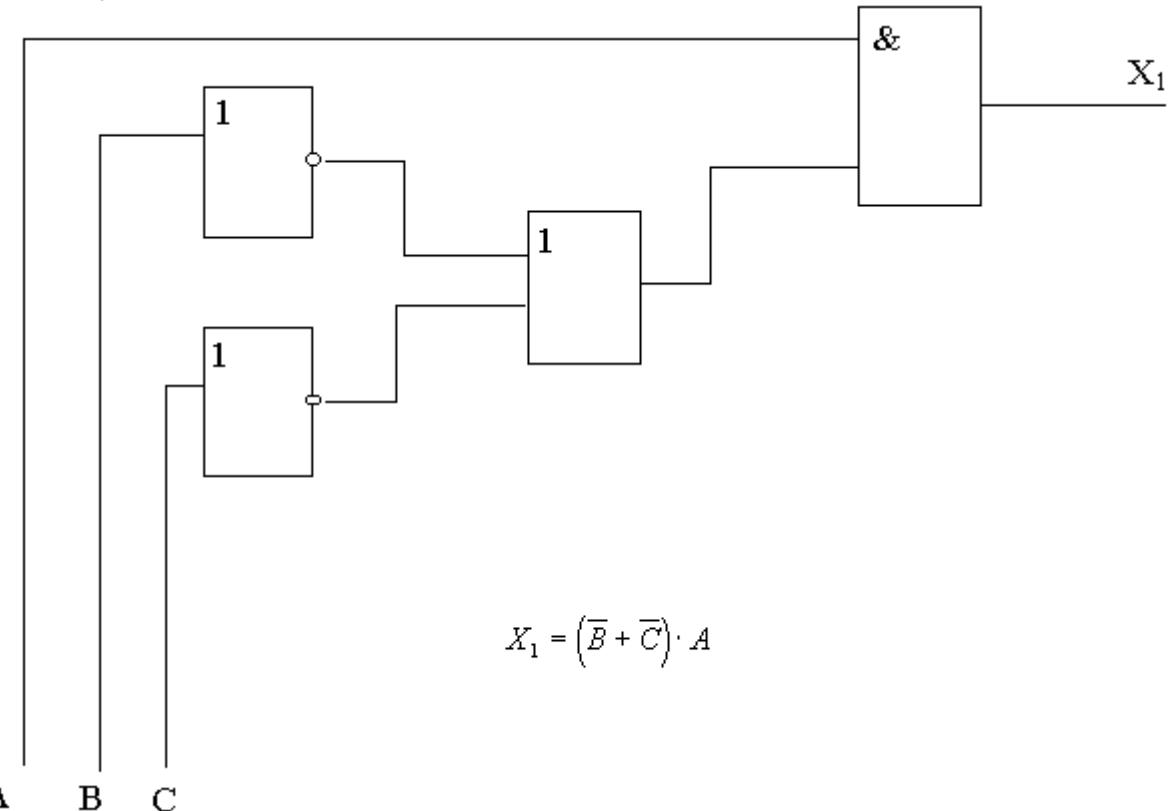
| A | E | I | Y |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

Она построена на основании булева выражения - $Y = \bar{E} \wedge I \vee \bar{E} \wedge A \vee \bar{A} \wedge E$

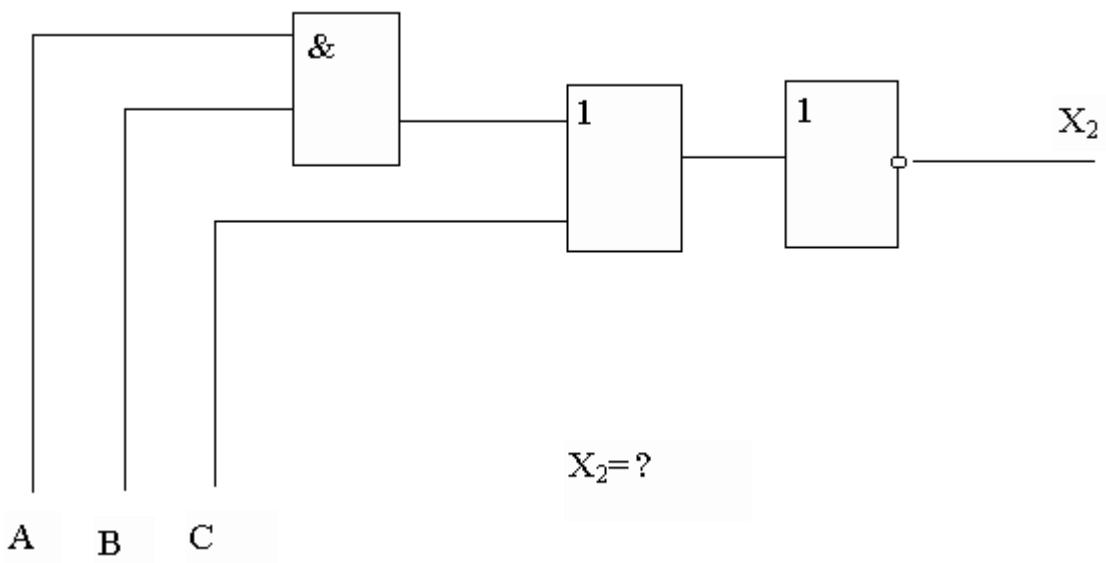
Практическая часть.

Задание 1. Для каждой из функциональных схем выписать соответствующую структурную формулу.

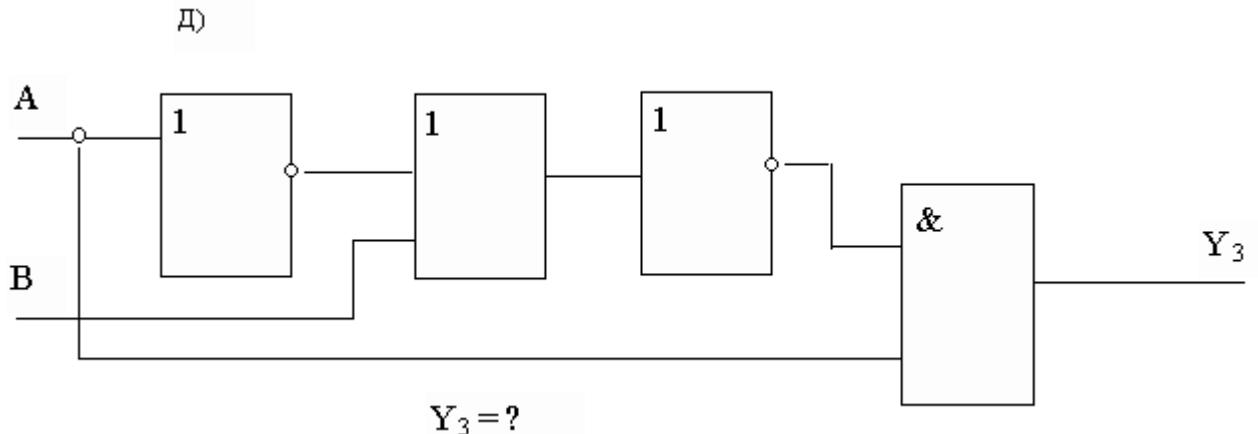
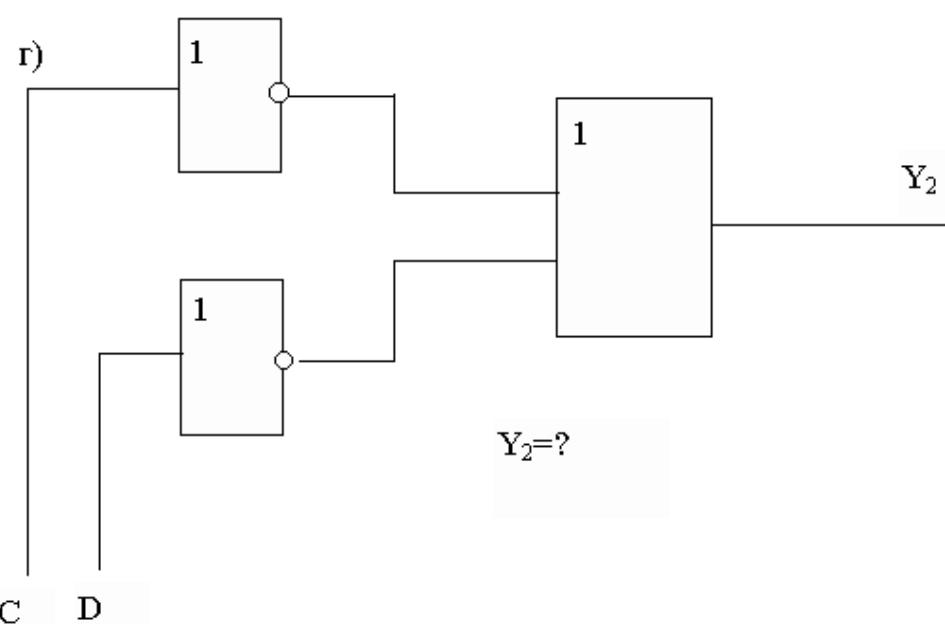
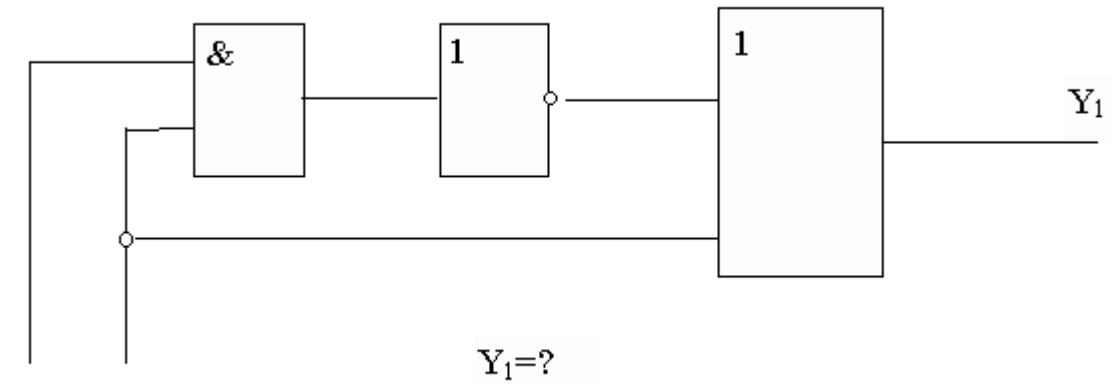
1.



2



3



БПОУ ВО «Грязовецкий политехнический техникум»

ИНСТРУКЦИОННАЯ КАРТА

*на выполнение практической работы
по учебной дисциплине ОП.12 «Электронная техника»*

«Изучение триггеров, шифраторов, дешифраторов»

по специальности 35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского
хозяйства

Тема: Изучение триггеров, шифраторов, дешифраторов.

Цель работы: Изучение принципа построения схем на логических элементах.

Краткие теоретические сведения

Триггеры предназначены для запоминания двоичной информации. Использование триггеров позволяет реализовывать устройства оперативной памяти (то есть памяти, информация в которой хранится только на время вычислений). Однако триггеры могут использоваться и для построения некоторых цифровых устройств с памятью, таких как счётчики, преобразователи последовательного кода в параллельный или цифровые линии задержки.

RS-триггер. Основным триггером, на котором базируются все остальные триггеры является RS-триггер. RS-триггер имеет два логических входа:

R - установка 0 (от слова reset);

S - установка 1 (от слова set).

RS-триггер имеет два выхода: Q - прямой; \bar{Q} - обратный (инверсный).

Состояние триггера определяется состоянием прямого выхода. Простейший RS-триггер состоит из двух логических элементов, охваченных перекрёстной положительной обратной связью (рисунок.1).

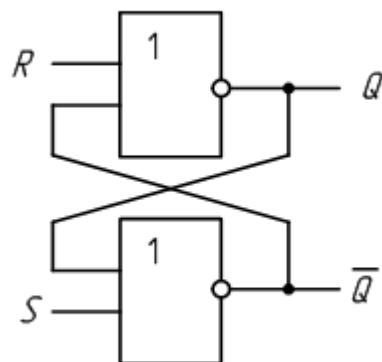


Рисунок 1 - Схема простейшего RS- триггера

Работа триггера:

Пусть $R=0$, $S=1$. Нижний логический элемент выполняет логическую функцию ИЛИ-НЕ, т.е. 1 на любом его входе приводит к тому, что на его выходе будет логический ноль $Q=0$. На выходе Q будет 1 ($Q=1$), т.к. на оба входа верхнего элемента поданы нули (один ноль - с входа R, другой - с выхода). Триггер находится в единичном состоянии. Если теперь убрать сигнал установки ($R=0$, $S=0$), на выходе ситуация не изменится, т.к. несмотря на то, что на нижний вход нижнего логического элемента будет поступать 0, на его верхний вход

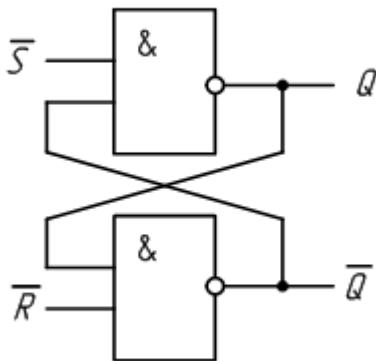
поступает 1 с выхода верхнего логического элемента. Триггер будет находиться в единичном состоянии, пока на вход R не поступит сигнал сброса. Пусть теперь $R=1$, $S=0$. Тогда $Q=0$, $\bar{Q}=1$. Триггер переключился в "0". Если после этого убрать сигнал сброса ($R=0$, $S=0$), то все равно триггер не изменит своего состояния. Для описания работы триггера используют таблицу состояний (переходов).

Обозначим: $Q(t)$ - состояние триггера до поступления управляющих сигналов (изменения на входах R и S); $Q(t+1)$ - состояние триггера после изменения на входах R и S.

Таблица 1 - Таблица переходов RS триггера в базисе ИЛИ-НЕ

| R | S | Q(t) | Q(t+1) | Пояснения |
|----------|----------|-------------|---------------|--------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | Режим хранения информации $R=S=0$ |
| 0 | 0 | 1 | 1 | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | Режим установки единицы $S=1$ |
| 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | Режим установки нуля $R=1$ |
| 1 | 0 | 1 | 0 | |
| 1 | 1 | 0 | * | $R=S=1$ запрещённая комбинация |
| 1 | 1 | 1 | * | |

RS-триггер можно построить и на элементах "И-НЕ". Схема RS-триггера, построенного на схемах "2И-НЕ"



Входы R и S инверсные (активный уровень "0"). Переход (переключение) этого триггера из одного состояния в другое происходит при установке на одном из входов "0". Комбинация R=S=0 является запрещённой.

Таблица переходов RS триггера в базисе "2И-НЕ"

| R | S | Q(t) | Q(t+1) | Пояснения |
|---|---|------|--------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | * | R=S=0 запрещённая комбинация |
| 0 | 0 | 1 | * | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | Режим установки нуля R=0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | Режим установки единицы S=0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | Режим хранения информации R=S=1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | |

2. Синхронный RS-триггер

Схема RS-триггера позволяет запоминать состояние логической схемы, но так как при изменении входных сигналов может возникать переходный процесс, то запоминать состояния логической схемы нужно только в определённые моменты времени, когда все переходные процессы закончены, и сигнал на выходе комбинационной схемы соответствует выполняемой ею функции. Это означает, что большинство цифровых схем требуют сигнала синхронизации (тактового сигнала). Все переходные процессы в комбинационной логической схеме должны закончиться за время периода синхросигнала, подаваемого на входы триггеров. Триггеры, запоминающие входные сигналы только в момент времени, определяемый сигналом синхронизации, называются синхронными. Принципиальная схема синхронного RS триггера приведена на рисунке 3.

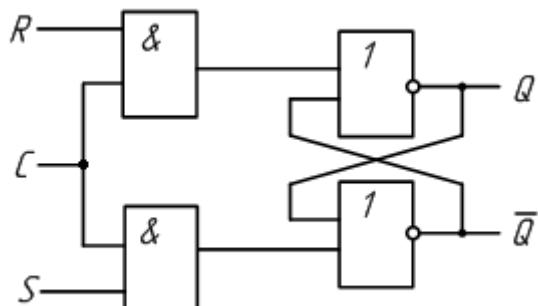


Рисунок 3. - Схема синхронного RS-триггера

Таблица 2. - Таблица переходов синхронного RS-триггера

| R | S | C | Q(t) | Q(t+1) | Пояснения |
|---|---|---|------|--------|--|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | Режим хранения информации R = S = 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | Режим установки единицы S = 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | Режим установки нуля R=1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | * | R = S = 1 запрещённая комбинация |
| 1 | 1 | 1 | 1 | * | |

В таблице 2. под сигналом С подразумевается синхроимпульс. Без синхроимпульса синхронный RS триггер сохраняет своё состояние.

3. D – триггер. D-триггер имеет 1 информационный вход (D-вход). Бывают только синхронные D-триггеры. Состояние информационного входа передаётся на выход под действием синхроимпульса (вход C).

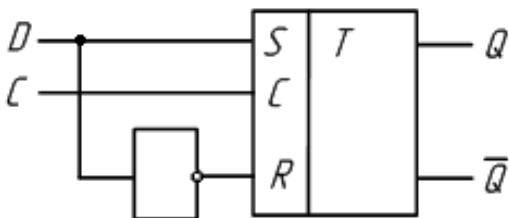


Рисунок 4 - Схема D-триггера на основе синхронного RS-триггера

Таблица 4. - Таблица переходов D-триггера

| C | D | Q(t) | Q(t+1) | Пояснения |
|---|---|------|--------|---------------------------|
| 0 | * | 0 | 0 | Режим хранения информации |
| 0 | * | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | * | 0 | Режим записи информации |
| 1 | 1 | * | 1 | |

Если на входе D - "1", то по приходу синхроимпульса Q = 1. Если на D "0", то Q = 0.

2.4 Счётный триггер (T-триггер). T-триггер имеет один счётный информационный вход. Триггер переключается каждый раз в противоположное состояние, когда на вход T поступает управляющий сигнал.

Таблица 3 - Таблица переходов Т триггера

| T | Q(t) | Q(t+1) |
|---|------|--------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

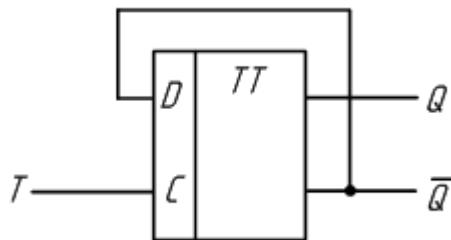


Рисунок 3 - Схема Т-триггера на основе двухступенчатого D-триггера

5. Универсальный триггер (JK-триггер). Такой триггер имеет информационные входы J и K, которые по своему влиянию аналогичны входам S и R тактируемого RS-триггера:

- при $J=1, K=0$ триггер по тактовому импульсу устанавливается в состояние $Q=1$;
- при $J=0, K=1$ - переключается в состояние $Q=0$;
- при $J=K=0$ - хранит ранее принятую информацию.

Но в отличие от синхронного RS-триггера одновременное присутствие логических 1 на информационных входах не является для JK-триггера запрещённой комбинацией и приводит триггер в противоположное состояние.

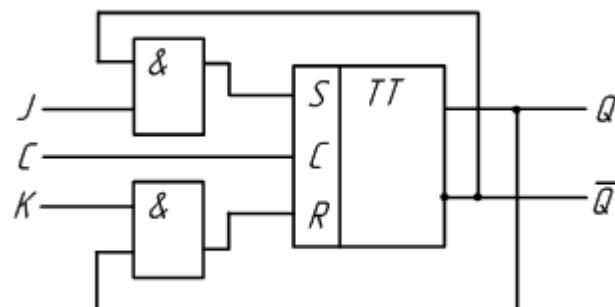


Рисунок 2.6 - Схема JK-триггера на основе двухступенчатого синхронного RS-триггера.

Таблица 2.6 - Таблица переходов JK триггера

| K | J | C | Q(t) | Q(t+1) |
|---|---|---|------|--------|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Схемы исследования триггеров.
3. Привести условные графические обозначения исследуемых триггеров.
4. Таблица переходов исследуемых триггеров.
5. Выводы по каждому заданию.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется быстродействие триггера?
2. Начертить схему RS-триггера на логических элементах "ИЛИ-НЕ" и пояснить принцип его работы.
3. Почему JK-триггер называется универсальным?
4. Пояснить по таблице переходов работу D-триггера.
5. Какой характерной особенностью обладает периодическая последовательность импульсов на входе T-триггера?