

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.06 Электроника**

**Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия**

**Профиль образовательной программы Электрооборудование и электротехнологии**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b>	<b>3</b>
1.1 Лекция №1 - Основы электроники. Типовые электронные элементы	3
1.2 Лекция №2 - Источники вторичного электропитания	14
1.3 Лекция №3 - Усилители электрических сигналов. Операционные усилители	31
1.4 Лекция №4 - Основы цифровой техники. Микропроцессорные средства	46
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ</b>	<b>56</b>
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 - Изучение и физическое исследование вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов	56
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 - Исследование схем однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей	59
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 - Исследование типовых схем усилителей на биполярных транзисторах	64
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 - Исследование операционного усилителя	69

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Основы электроники. Типовые электронные элементы»

### 1.1.1 Вопросы лекции:

1. Предмет курса. Краткая историческая справка. Основные определения.
2. Электронно-дырочные переходы и приборы на их основе.
3. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры.

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов

*1. Предмет курса. Краткая историческая справка. Основные определения.*

**Электроника** — наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации.

Возникновению электроники предшествовало изобретение радио. Поскольку радиопередатчики сразу же нашли применение (в первую очередь на кораблях и в военном деле), для них потребовалась элементная база, созданием и изучением которой и занялась электроника. Элементная база первого поколения была основана на электронных лампах. Соответственно получила развитие вакуумная электроника. Её развитию способствовало также изобретение телевидения и радаров, которые нашли широкое применение во время Второй мировой войны.

Но электронные лампы обладали существенными недостатками. Это прежде всего большие размеры и высокая потребляемая мощность (что было критичным для переносных устройств). Поэтому начала развиваться твердотельная электроника, а в качестве элементной базы стали применять диоды и транзисторы.

Дальнейшее развитие электроники связано с появлением компьютеров. Компьютеры, основанные на транзисторах, отличались большими размерами и потребляемой мощностью, а также низкой надежностью (из-за большого количества деталей). Для решения этих проблем начали применяться микросборки, а затем и микросхемы. Число элементов микросхем постепенно увеличивалось, стали появляться микропроцессоры. В настоящее время развитию электроники способствует также появление сотовой связи, а также различных беспроводных устройств, навигаторов, коммуникаторов, планшетов и т. п.

Основными вехами в развитии электроники можно считать:

- изобретения А. С. Поповым радио (7 мая 1895 года), и начало использования радиоприёмников,
- изобретение Ли де Форестом лампового триода, первого усилительного элемента,
- использование Лосевым полупроводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов,
- развитие твёрдотельной электроники,
- использование проводниковых и полупроводниковых элементов (работы Иоффе, Шотки),
- изобретение в 1947 году транзистора (Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн),
- создание интегральной микросхемы и последующее развитие микроэлектроники, основной области современной электроники.

Можно различать следующие области электроники:

- физика (микромира, полупроводников, электромагнитных волн, магнетизма, электрического тока и др.) — область науки, в которой изучаются процессы, происходящие с заряженными частицами,
  - бытовая электроника — бытовые электронные приборы и устройства, в которых используется электрическое напряжение, электрический ток, электрическое поле или электромагнитные волны.(Например телевизор, мобильный телефон, утюг, лампочка, электроплита,.. и др.).
  - Энергетика выработка, транспортировка и потребление электроэнергии, электро приборы высокой мощности (например электродвигатель, электрическая лампа, электростанция), электрическая система отопления, линия электропередачи.
  - Микроэлектроника - электронные устройства, в которых в качестве активных элементов используются микросхемы:
    - оптоэлектроника - устройства в которых используются электрический ток и потоки фотонов,
    - звуко-видео-техника - устройства усиления и преобразования звука и видео изображений,
    - цифровая микроэлектроника - устройства на микропроцессорах или логических микросхемах. Например: электронный калькулятор, компьютер, цифровой телевизор, мобильный телефон, принтер, робот, панель управления промышленным оборудованием, средствами транспорта, и другие бытовые и промышленные устройства.
- Электронное устройство может включать в себя самые разные материалы и среды, где происходит обработка электрического сигнала с использованием разных физических процессов. Но в любом устройстве обязательно имеется электрическую цепь.
- Изучению различных аспектов электроники посвящены многие научные дисциплины технических вузов.

## 2. Электронно-дырочные переходы и приборы на их основе

**Электрический переход** в полупроводнике — это граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых существенно различаются.

Переходы между двумя областями полупроводника с различным типом электропроводности называют **электронно-дырочными** или **p-n-переходами**.

Переходы между двумя областями с одним типом электропроводности (**n**- или **p**-типов), отличающиеся концентрацией примесей и соответственно значением удельной проводимости, называют **электронно-электронными** (**n<sup>+</sup> - n'**-переход) или **дырочно-дырочными** (**p<sup>+</sup> - p'**-переход), причем знак « + » в обозначении одного из слоев показывает, что концентрация носителей заряда одного типа в этом слое значительно выше, чем во втором, и поэтому слой имеет меньшее удельное электрическое сопротивление.

Переходы между двумя полупроводниковыми материалами, имеющими различную ширину запрещенной зоны, называют **гетеропереходами**. Если одна из областей, образующих переход, является металлом, то такой переход называют **переходом металл — полупроводник**.

Электрические переходы нельзя создать путем механического контакта двух областей с разными физическими свойствами, хотя при рассмотрении физических процессов такая абстракция обычно используется. Это объясняется тем, что поверхности кристаллов обычно загрязнены оксидами и атомами других веществ. Существенную роль играет воздушный зазор, устранить который при механическом контакте практически невозможно.

**Полупроводниковым диодом** называется полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1.

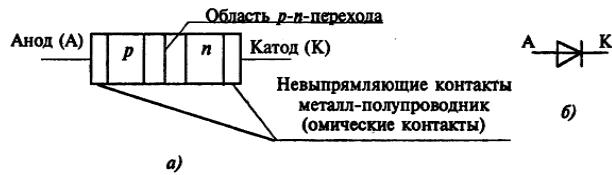


Рис. 1. Схема структуры полупроводникового диода (а)  
и его графическое обозначение (б)

Буквами *p* и *n* обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно *p*-типа и *n*-типа. В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя *p* в слой *n*, причиной которой является то, что их концентрация в слое *p* значительно больше их концентрации в слое *n*. В итоге в приграничных областях слоя *p* и слоя *n* возникает так называемый обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью *E*. Это поле препятствует переходу дырок из слоя *p* в слой *n* и переходу электронов из слоя *n* в слой *p*. Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя *n* в слой *p* и электроны из слоя *p* в слой *n*. Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величину проходящего тока.

Основные характеристики полупроводникового диода представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока *i*, протекающего через диод, от напряжения *u*, приложенного к диоду. Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рис. 2).

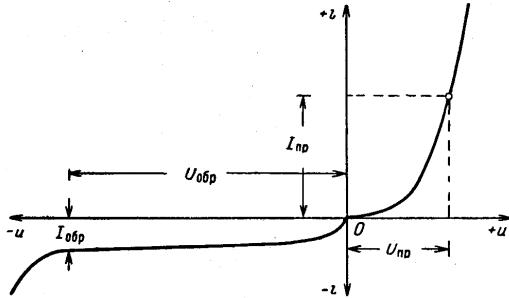


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводникового диода

**Диод Шоттки.** В диоде Шоттки используется не *p-n*-переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 3, б.

В обычных условиях прямой ток, образованный электронами зоны проводимости, переходящими из полупроводника в металл, имеет очень малую величину. Это является следствием недостатка электронов, энергия которых позволила бы им преодолеть данный барьер.

Для увеличения прямого тока необходимо «разогреть» электроны в полупроводнике, поднять их энергию. Такой разогрев может быть осуществлен с помощью электрического поля.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику *n*-типа, то потенциальный барьер понизится и через переход начнет

протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается весьма малым.

Диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц ( $1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ). У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) – около  $0,5 \text{ В}$ , что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение – сотни вольт.

**Стабилитрон.** Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 3,а.

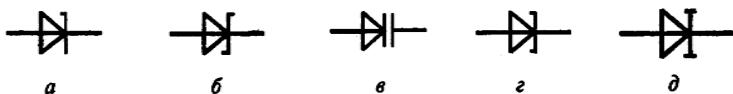


Рис. 3. Графическое изображение полупроводниковых диодов: а) стабилитрон; б) диод Шоттки; в) варикап; г) туннельный диод; д) обращенный диод

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует напряжение. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д представлена на рис. 4.

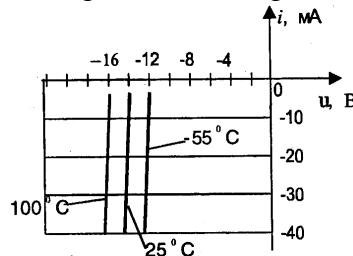


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы.

В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до  $5,7 \text{ В}$ ) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) – лавинный пробой.

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

1.  $U_{cm}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);
2.  $I_{cm\min}$  – минимально допустимый ток стабилизации;
3.  $I_{cm\max}$  – максимально допустимый ток стабилизации;
4.  $r_{cm}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),  

$$r_{cm} = du/di;$$
5.  $\alpha_{U_{cm}}$  (ТКН) – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Величины  $U_{cm}$ ,  $I_{cm\min}$  и  $I_{cm\max}$  принято указывать как положительные.

Для примера применения стабилитрона обратимся к схеме так называемого параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5.). Легко заметить, что если напряжение  $u_{ex}$  настолько велико, что стабилитрон находится в режиме пробоя, то изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения  $u_{vых}$  (при изменении напряжения  $u_{ex}$  изменяется только ток  $i$ , а также напряжение  $U_R = i \cdot R$ ).

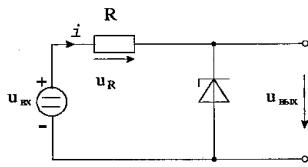


Рис. 5. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

**Стабистор.** Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около  $0,7\text{ V}$ ) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

**Светодиодом** называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. При протекании через диод прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда (электронов или дырок) в базовую область диодной структуры. Процесс самопроизвольной рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда, происходящих как в базовой области, так и в самом р-п переходе, сопровождается переходом их с высокого энергетического уровня на более низкий; при этом избыточная энергия выделяется путем излучения кванта света.

Чтобы кванты энергии – фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ( $E_g > 1,8\text{ eV}$ ). Исходя из этого ограничения, для изготовления светодиодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC), твердые растворы: галлий–мышьяк–фосфор (GaAsP) и галлий–мышьяк–алюминий (GaAsAl), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны ( $E_g > 3,4\text{ eV}$ ), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового.

Обычно излучение светодиодов является монохроматическим с оговоренной для каждого типа максимальной длиной волны, имеющей незначительный разброс внутри каждого типа. Светодиоды с управляемым цветом свечения изготавливаются на основе двух светоизлучающих переходов, один из которых имеет резко выраженный максимум спектральной характеристики в красной полосе, другой – в зеленой. При совместной работе цвет результирующего излучения зависит от соотношения токов через переходы. Основным технологическим методом изготовления светодиодов является метод эпитаксиального наращивания. Это жидкофазная эпитаксия или эпитаксия из газовой фазы. В некоторых случаях, в основном, при использовании карбида кремния, применяется метод диффузии примесей (акцепторных или донорных) из газовой фазы, проводящийся внутри кварцевых ампул.

**Фотодиоды** – селективные регистрирующие фотоэлектрические ПЛЭ, основанные на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенные как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

Фотовольтаическим эффектом – (фотогальваническим, вентильным) – называют форму внутреннего фотоэффекта в полупроводниках со свойствами, неоднородными для движения фотоносителей даже при отсутствии внешнего напряжения, при которой оптически генерированные неравновесные носители заряда пространственно разделяются в объеме полупроводника вследствие его неоднородности, образуя при этом пространственно разделенные объемные заряды и, следовательно, разность потенциалов между участками облученного образца, называемую фото ЭДС ( $V_F$ ).

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной ( $n$  – область) и дырочной ( $p$  – область)

проводимостей. Границу между этими областями называют контактным  $p-n$  переходом (рис. 6). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

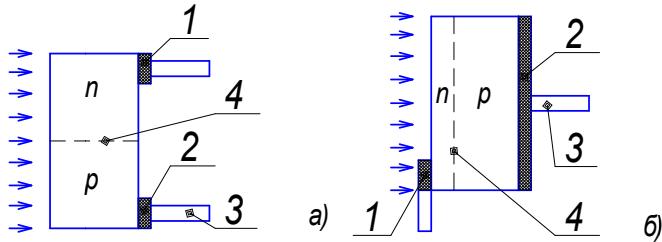


Рис. 6. Принципиальная схема фотодиода.

- а) – направление светового пучка параллельно плоскости  $p-n$  перехода;  
 б) – световой пучок и плоскость  $p-n$  перехода взаимно перпендикулярны.  
 1 – контакт  $n$  – области; 2 – контакт  $p$  – области; 3 – выводы; 4 –  $p-n$  переход.

### 3. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры.

**Биполярный транзистор** – это полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$  – переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока.

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

**Устройство транзистора.** Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ ) и соответственно два  $p-n$  – перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод – коллектором.

На рис. 7, а показано схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа  $n-p-n$  и два допустимых варианта условного графического обозначения (рис. 7, б).

Транзистор  $p-n-p$  устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рис. 8, а. Более простой вариант условного графического обозначения – на рис. 8, б.

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна. Транзисторы типа  $n-p-n$  более распространены в сравнении с транзисторами типа  $p-n-p$ , так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить тем, что основную роль в электрических процессах в транзисторах типа  $n-p-n$  играют электроны, а транзисторах типа  $p-n-p$  – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

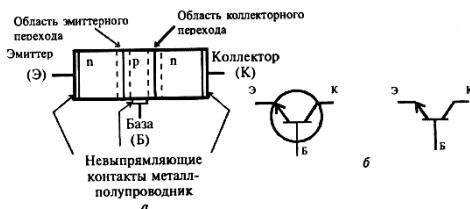


Рис. 7. Структура транзистора типа  $n-p-n$  (а)

и его графическое обозначение (б)

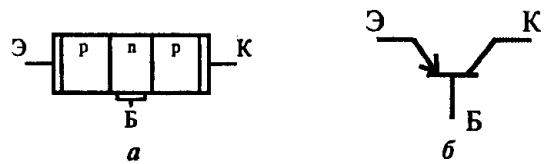


Рис. 8. Структура транзистора типа  $p-n-p$  (а) и его графическое обозначение (б)

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

**Три схемы включения биполярного транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки.** Транзисторы часто применяют для усиления переменных сигналов (которые при расчетах обычно считают синусоидальными), при этом в выходной цепи транзистора применяется нагрузка с ненулевым сопротивлением.

Во входной цепи, кроме источника постоянного напряжения, необходимого для обеспечения активного режима работы, также используют источник входного переменного напряжения. Представим три характерные схемы включения транзистора.

**Схема с общей базой (ОБ)** (рис. 9). Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{вых}$  значительно больше амплитуды напряжения  $u_{вх}$ . Учитывая, что  $i_{вых} \approx i_{вх}$ , можно утверждать, что схема не обеспечивает усиления тока, но усиливает напряжение. Входной ток такой схемы достаточно большой, а соответствующее входное сопротивление мало.

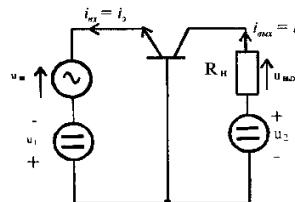


Рис. 9. Схема включения транзистора с общей базой (ОБ)

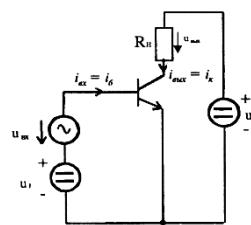


Рис. 10. Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ)

**Схема с общим эмиттером (ОЭ)** (рис. 10). Так как  $i_{вых} \gg i_{вх}$ , а при достаточно большом сопротивлении  $R_h$  амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{вых}$  значительно больше амплитуды напряжения  $u_{вх}$ , следовательно, схема обеспечивает усиление и тока, и напряжения.

Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

**Схема с общим коллектором (ОК)** (рис. 11). При определении переменных составляющих токов и напряжений источники постоянного напряжения  $u_1$  и  $u_2$  заменяют закоротками (закорачивают).

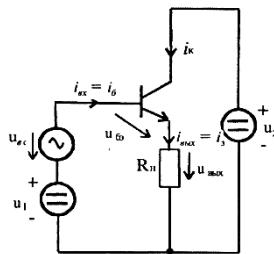


Рис. 11. Схема включения транзистора с общим коллектором (ОК)

После этого к коллектору оказываются подключенными и источник входного напряжения  $u_{ex}$ , и сопротивление нагрузки. Отсюда и название – схема с общим коллектором.

Напряжение  $u_{\delta x}$  и особенно его переменная составляющая достаточно малы, поэтому амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{ex}$  примерно равна амплитуде переменной составляющей напряжения  $u_{вых}$ . Поэтому схемы с общим коллектором называют эмиттерным повторителем.

Учитывая, что  $i_{вых} \gg i_{ex}$ , можно отметить, что схема усиливает ток, но не усиливает напряжение.

Схема отличается повышенным входным сопротивлением, так как при увеличении входного напряжения увеличению входного тока препятствует увеличение как напряжения  $u_{\delta x}$ , так и напряжения  $u_{вых}$ .

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером.

#### **h – параметры транзистора**

При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде четырехполюсника (рис. 12). В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

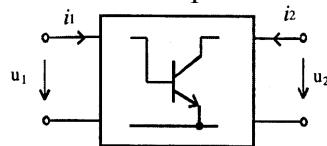


Рис. 12. Транзистор в виде четырехполюсника

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого четырехполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

$i_1$  – переменная составляющая тока базы;

$u_1$  – переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

$i_2$  – переменная составляющая тока коллектора;

$u_2$  – переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые  $h$ -параметры.

Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала (при закороченном выходе:  $u_2=0$ ) :

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} .$$

Аналогично

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0} - \text{коэффициент обратной связи по напряжению.}$$

Режим работы при  $i_1=0$  называют холостым ходом на входе.

Далее

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{- коэффициент передачи тока,}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{- выходная проводимость.}$$

При этом

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

т. е.

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2;$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2.$$

Коэффициенты  $h_{ij}$  определяются опытным путем. Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «э», а схеме с общей базой – буквой «б».

**Полевыми транзисторами** называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

**Устройство полевого транзистора.** Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа приведено на рис 13,а условное графическое обозначение этого транзистора – на рис. 14,а. Стрелка указывает направление от слоя  $p$  к слою  $n$  (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

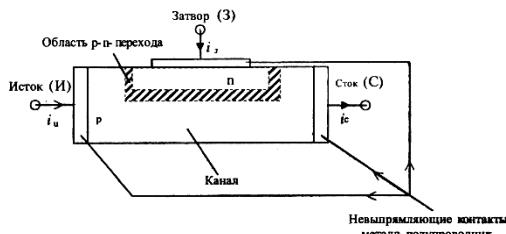


Рис. 13. Структура полевого транзистора

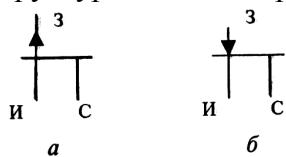


Рис. 14. Графическое изображение полевого транзистора:

а) с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа;

б) с управляющим  $p-n$ -переходом и каналом  $n$ -типа

Удельное сопротивление слоя  $n$  (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя  $p$  (канала), поэтому область  $p-n$ -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое  $p$ .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим  $p-n-$

переходом и каналом  $n$ -типа. Его условное графическое обозначение представлено на рис. 14,б.

**Схемы включения транзистора.** Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения. Для полевого транзистора это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используют схемы с общим истоком (рис. 15).

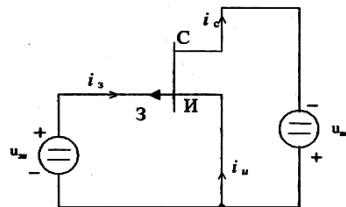


Рис. 15. Схема включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ)

Так как в рабочем режиме  $i_3 \approx 0$ , а  $i_u \approx i_c$ , входными характеристиками обычно не пользуются. Например, для транзистора КП103Л для тока утечки затвора  $I_{3,ym}$  при  $t < 85^\circ\text{C}$  выполняется условие  $I_{3,ym} \leq 2 \mu\text{A}$ .

**Выходные (стоковые) характеристики.** Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{uc}) \Big|_{u_{3u} = \text{const}},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами (смысл которых понятен из обозначений):  $U_{uc,\text{макс}}$ ,  $U_{3u,\text{макс}}$ ,  $P_{\text{макс}}$ .

Для транзистора КП103Л  $U_{uc,\text{макс}}=10\text{ В}$ ,  $U_{3u,\text{макс}}=15\text{ В}$ ,  $P_{\text{макс}}=120\text{ мВт}$  (все при  $t=85^\circ\text{C}$ ).

**Стокозатворные характеристики (характеристики передачи, передаточные, переходные, проходные характеристики).** Стокозатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{3u}) \Big|_{u_{uc} = \text{const}},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение  $u_{3u}$ , например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем  $0,5\text{ В}$ .

*Параметры, характеризующие свойства транзистора усиливать напряжение.*

**Крутизна стокозатворной характеристики  $S$**  (крутизна характеристики полевого транзистора):

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{3u}} \right|_{\substack{u_{uc} = \text{заданное} \\ u_{3u} = \text{const}}}.$$

Обычно задается  $u_{3u}=0$ . При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная. Для КП103Л  $S=1,8\ldots 3,8\text{ мА/В}$  при  $u_{uc}=0$ ,  $t=20^\circ\text{C}$ .

**Внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_{uc,\text{диф}}$**  (внутреннее сопротивление) определяется выражением:

$$R_{uc,\text{диф}} = \left| \frac{du_{uc}}{di_c} \right|_{\substack{u_{uc} = \text{заданное} \\ i_c = \text{const}}}.$$

Для КП103Л  $R_{uc,\text{диф}} \approx 25\text{ кОм}$  при  $u_{uc}=10\text{ В}$ ,  $u_{3u}=0$ .

**Коэффициент усиления**

$$M = \left| \frac{du_{uc}}{du_{3u}} \right|_{\substack{u_{uc} = \text{заданное} \\ i_c = \text{const}}}.$$

Можно отметить, что

$$M = S \cdot R_{uc,diif}.$$

Для КП103Л при  $S=2 \text{ mA/B}$  и  $R_{uc,diif}=25 \text{ k}\Omega$   $M=2 \text{ (mA/B)} \cdot 25 \text{ k}\Omega=50$ .

Принципы управления параметрами электронного активного элемента, заложенные в полевых транзисторах, могут быть реализованы в более сложных электронных устройствах. К таким устройствам можно отнести *ячейку памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флэш-память)*. Устройства флэш-памяти являются современными быстродействующими программируемыми постоянными запоминающими устройствами (ППЗУ) с электрической записью и электрическим стиранием информации (ЭСП-ПЗУ). Эти устройства являются энергонезависимыми, так как информация не стирается при отключении питания, выдерживают не менее 100 000 циклов записи/стирания.

Одной из разновидностей приборов, реализующих принципы полевых транзисторов, являются *полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС)*. Приборы с зарядовой связью используются: в запоминающих устройствах ЭВМ; в устройствах преобразования световых (оптических) сигналов в электрические.

**Тиристорами** называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более  $p-n$ -переходов.

Тиристор по принципу действия – прибор ключевого типа. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными, тиристорами (династорами). Приборы с управляющими электродами называют управляемыми тиристорами, или просто тиристорами.

Тиристоры являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники (управляемые выпрямители, инверторы и т. п.).

Существует большое количество различных тиристоров. Наиболее часто используют незапираемые тиристоры с тремя выводами, управляемые по катоду. Такие тиристоры содержат два силовых и один управляющий электрод и проводят ток только в одном направлении.

Упрощенное изображение структуры тиристора представлено на рис. 16, а его условное графическое обозначение – на рис. 17.

Обратимся к простейшей схеме с тиристором (рис. 18), где использованы следующие обозначения:

- $i_a$  – ток анода (силовой ток в цепи анод-катод тиристора);
- $u_{ak}$  – напряжение между анодом и катодом;
- $i_y$  – ток управляющего электрода (в реальных схемах используют импульсы тока);
- $u_{yk}$  – напряжение между управляющим электродом и катодом;
- $u_{num}$  – напряжение питания.

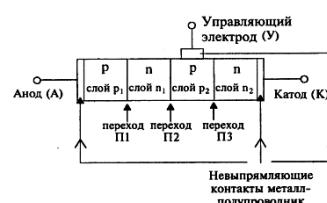


Рис. 16. Структурная схема тиристора

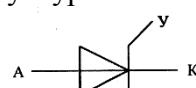


Рис. 17. Графическое изображение тиристора

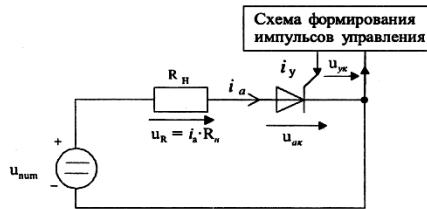


Рис. 18. Схема управления с применением тиристора

Предположим, что напряжение питания меньше так называемого напряжения переключения  $U_{nep}$  ( $u_{num} < U_{nep}$ ) и что после подключения источника питания импульс управления на тиристор не подавался. Тогда тиристор будет находиться в закрытом (выключенном) состоянии. При этом ток тиристора будет малым ( $i_a = 0$ ) и будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx u_{num}$ ,  $u_R \approx 0$  (нагрузка отключена от источника питания).

Если предположить, что выполняется соотношение  $u_{num} > U_{nep}$  или что после подключения источника питания (даже при выполнении условия  $u_{num} < U_{nep}$ ) был подан импульс управления достаточной величины, то тиристор будет находиться в открытом (включенном) состоянии. При этом для всех трёх переходов будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx 1 \text{ В}$ ,  $i_a \approx u_{num} / R_h$ ,  $u_R \approx u_{num}$  (т. е. нагрузка оказалась подключенной к источнику питания).

Существуют тиристоры, для которых напряжение  $U_{nep}$  больше 1 кВ, а максимально допустимый ток  $i_a$  больше, чем 1 кА.

Характерной особенностью рассматриваемого незапираемого тиристора, который очень широко используется на практике, является то, что его нельзя выключить с помощью тока управления.

Для выключения тиристора на практике не него подают обратное напряжение  $u_{ak} < 0$  и поддерживают это напряжение в течение времени, большего так называемого времени выключения  $t_{выкл}$ . Оно обычно составляет единицы или десятки микросекунд. За это время избыточные заряды в слоях  $n_1$  и  $p_2$  исчезают. Для выключения тиристора напряжение источника питания  $u_{num}$  в приведенной выше схеме (см. рис. 6) должно изменить полярность.

После указанной выдержки времени на тиристор вновь можно подавать прямое напряжение ( $u_{ak} > 0$ ), и он будет выключенным до подачи импульса управления.

Существуют и широко используются так называемые симметричные тиристоры (симисторы, триаки). Каждый симистор подобен паре рассмотренных тиристоров, включенных встречно-параллельно (рис. 19). Условное графическое обозначение симистора показано на рис. 20.

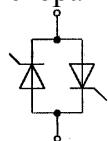


Рис. 19

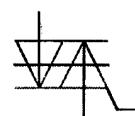


Рис. 20

## 1.2 Лекция №2 (2 часа).

### Тема: «Источники вторичного электропитания»

#### 1.2.1 Вопросы лекции:

1. Структуры линейных и импульсных источников вторичного электропитания.
2. Основные схемы выпрямителей. Сглаживающие фильтры.
3. Стабилизаторы напряжения линейного типа.

## 1.2.2 Краткое содержание вопросов

### *1. Структуры линейных и импульсных источников вторичного электропитания.*

**Источники вторичного электропитания** (ИВЭП) – электронные устройства, предназначенные для преобразования энергии первичного источника электропитания в электрическую энергию значения частоты, уровня и стабильности которой согласованы с требованиями, предъявляемыми к этим параметрам конкретными электронными устройствами (ЭУ) и системами.

В качестве первичных источников электропитания для ЭУ и систем обычно используют либо промышленную сеть переменного тока, либо автономные источники переменного (генераторы) или постоянного (аккумуляторы, химические батареи и т.д.) тока.

Практика показывает, что возможности непосредственного использования этих источников для питания различных ЭУ и систем весьма ограничены. Причина этого в том, что современные ЭУ выполняются с использованием интегральных схем (ИС), требующих для своего питания постоянного напряжения низкого уровня (как правило,  $\pm 5 \dots \pm 15$  В). При этом отклонения этого напряжения от заданного значения не должны превышать  $\pm (5 \dots 10)\%$ . В ряде случаев, например для питания прецизионных аналоговых устройств или аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, стабильность напряжения питания должна быть существенно выше ( $0,1 \dots 0,01\%$ ).

Реальные параметры применяемых на практике первичных источников, как правило, этим требованиям не отвечают. Это обусловлено:

- несовпадением частот напряжения промышленной сети и потребителя, ибо промышленная сеть формирует переменное напряжение с частотой 50 Гц, в то время как ЭУ в основном используют для питания напряжение постоянного тока, т.е. напряжение с частотой равной нулю;
- несовпадением уровней напряжения, т.к., например, действующее значение напряжения промышленной сети равно 220 или 380 В, напряжение аккумуляторной батареи 12 В, что не соответствует диапазону напряжения питания, необходимому для надежного функционирования ИС;
- несовпадением стабильностей напряжений, ибо промышленная сеть допускает статические (долговременные) отклонения напряжения в диапазоне  $+15\% \dots -20\%$ , а напряжение аккумуляторной батареи может изменяться от 7,5 до 15 В, что также не соответствует требованиям, предъявляемым к напряжению питания для устройств, выполненных на основе ИС.

Поэтому в большинстве случаев приходится применять источники вторичного электропитания (ИВЭП). Под этим термином обычно понимаются преобразователи вида электрической энергии, выполняющие преобразования исходя из требований, предъявляемых к источнику питания конкретного электрического или электронного устройства.

В большинстве случаев с помощью источников вторичного электропитания преобразуется энергия переменного напряжения электрической сети в постоянные напряжения требуемого уровня, которые с помощью электронных устройств стабилизации поддерживаются неизменными. Более редко встречаются источники вторичного электропитания, обеспечивающие получение требуемого значения электрического тока (неизменного или меняющегося по определенному закону).

Вследствие того, что ИВЭП является массовым функциональным узлом, необходимым для функционирования большинства электронных устройств, разработано достаточно много способов их построения. Известны различные схемотехнические решения, эффективные в тех или иных случаях. Причем основной проблемой, возникающей при их проектировании, является получение заданной мощности при

минимальных массогабаритных показателях и стоимости, а также высокой надежности при работе.

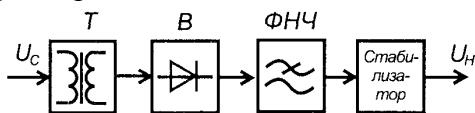
Источники вторичного электропитания являются преобразовательными устройствами, т.е. устройствами преобразующими напряжение или ток источника энергии одного вида в напряжение или ток другого вида (или с другими параметрами), необходимыми приемнику энергии. Преобразователи напряжения используются самостоятельно или в комбинации друг с другом для получения наилучших технико-экономических показателей.

### Структурные схемы ИВЭП.

Рассмотрим типовые структурные схемы наиболее массовых ИВЭП получающих энергию от промышленной сети  $\sim 220\text{В}$   $50\text{Гц}$  и преобразующих ее в постоянное низкое сглаженное стабилизированное напряжение. Это необходимо для большинства электронных приборов и устройств.

#### *ИВЭП с низкочастотным трансформатором на входе.*

Исторически первой и наиболее применяемой была схема с низкочастотным понижающим сетевым трансформатором.



Рассмотрим отдельные узлы такой схемы.

**Трансформатор (Т)** – статическое устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции напряжений переменного тока с одними параметрами в напряжение с другими параметрами. С помощью силового трансформатора источника вторичного электропитания осуществляется гальваническая развязка высоковольтных, опасных для жизни цепей напряжения электрической сети и вторичных цепей устройств потребителей. Низкочастотные трансформаторы малой мощности промышленного изготовления обладают высокой надежностью и энергетической эффективностью (КПД). С определенной степенью приближения трансформатор можно считать линейным устройством преобразования электрической энергии.

**Выпрямительное устройство (В)** источника питания предназначено для преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. В источниках вторичного электропитания находят применение нерегулируемые и реже регулируемые выпрямители, выполняемые на полупроводниковых приборах: диодах, тиристорах или транзисторах. В регулируемых выпрямителях одновременно с функцией выпрямления выполняется регулирование выходного напряжения. Выпрямитель является нелинейным устройством, которое в общем случае обладает определенной энергетической эффективностью.

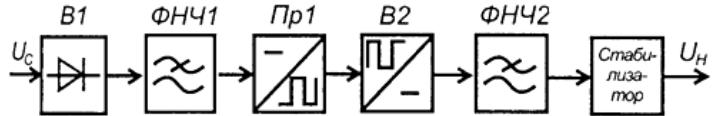
Источники питания включают, как правило, несколько **фильтров (ФНЧ - фильтр низкой частоты)**, с помощью которых осуществляется подавление паразитных гармоник напряжения и тока или сглаживание выпрямленного напряжения. Пассивные фильтры (включающие емкости, индуктивности и резисторы) являются линейными устройствами, поскольку строятся на основе только линейных элементов. Для фильтрации низкочастотных пульсаций и получения весьма значительного подавления помех используют активные фильтры. В большинстве случаев применения фильтр источников питания обладает высоким КПД.

Большинство источников вторичного электропитания содержат в своем составе **стабилизаторы напряжения и тока**, как простейшие *параметрические*, так и более сложные – *компенсационные*. Стабилизаторы предназначены для автоматического поддержания напряжения (тока) на выходе с заданной степенью точности. Стабилизаторы являются сравнительно сложными устройствами, КПД которых зависит от типа стабилизатора и принципа регулирования энергии.

Достоинства такой схемы: простота, недорогие типовые электронные полупроводниковые элементы и малое их количество.

Недостатки: большая масса и габариты низкочастотного трансформатора, сглаживающего фильтра, линейного стабилизатора напряжения, а также большие потери в стабилизаторе. Из-за этих недостатков такая схема питания в современных устройствах применяется редко.

*ИВЭП с высокочастотным промежуточным звеном.*



Из всех узлов ИВЭП наиболее громоздкие как правило узлы выполненные на магнитопроводах из ферромагнитного материала (трансформаторы и дроссели фильтров). Увеличение рабочей частоты приводит к значительному уменьшению массы и габаритов этих электромагнитных элементов и сглаживающих фильтров. Поэтому сейчас в современных устройствах электроники применяются схемы ИВЭП с высокочастотным (ВЧ) промежуточным звеном или по другому ИВЭП с бестрансформаторным входом.

В состав такого ИВЭП входят:

- *бестрансформаторный сетевой выпрямитель* (В1), часто диодная сборка мостового типа;
- *фильтр низкой частоты* (ФНЧ1), обычно емкостной;
- *высокочастотный инвертор* (Пр1), преобразует высокое постоянное напряжение в переменное напряжение высокой частоты (20-50 кГц). Инвертор выполняется на высоковольтных полевых транзисторах (раньше изготавливали на биполярных). Транзисторы работают в ключевом режиме с малыми потерями мощности. Инвертор выполняет роль стабилизатора напряжения в зависимости от величины выходного напряжения изменяется коэффициент заполнения импульсов;
- после инвертора располагается *высокочастотный трансформатор*, который понижает уровень переменного напряжения и осуществляет гальваническую развязку питающей сети и нагрузки. Магнитопровод такого трансформатора выполняют из феррита, имеющего малые потери на высокой частоте;
- *высокочастотный выпрямитель* (В2) выполняется на диодах с хорошими частотными и импульсными параметрами;
- *сглаживающий фильтр* (ФНЧ2) обычно индуктивно-емкостный.

Несмотря на очевидное усложнение структуры и техники такие ИВЭП имеют существенные меньшие массогабаритные показатели и более высокий КПД по сравнению с традиционными ИВЭП. Высокочастотное звено - инвертор, трансформатор и выпрямитель образуют **конвектор**. ИВЭП с ВЧ звеном используются во многих блоках питания компьютеров, мониторов, зарядных устройств для сотовых телефонов и т.д.

## 2. Основные схемы выпрямителей. Сглаживающие фильтры.

Основными параметрами выпрямителей являются:

1. Среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt$$

2. Среднее значение выходного тока

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt$$

3. Коэффициент пульсаций выходного напряжения (тока) – отношение амплитуды первой гармоники напряжения пульсаций к среднему значению.

*Однофазный однополупериодный выпрямитель (однофазный однотактный).*

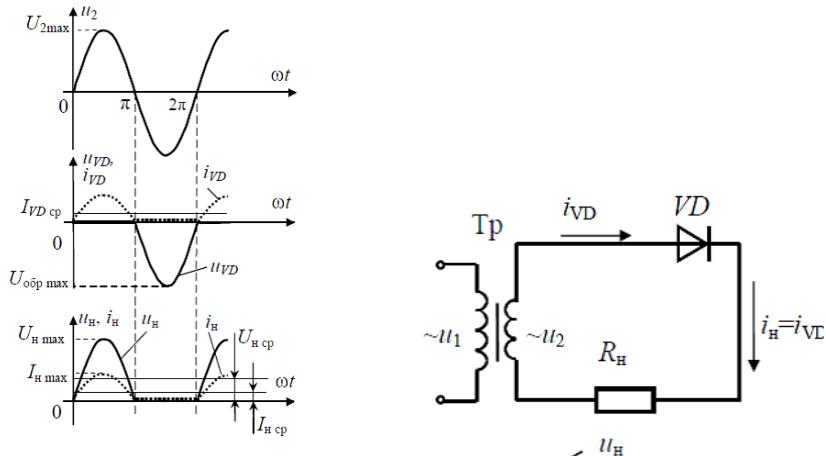


Рис. 1. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу.

Рассмотрим работу данной схемы в предположении, что входное напряжение изменяется по закону  $u_{ex} = U_m \sin \omega t$ . На интервале времени  $0 < t < T/2$  ( $0 < t < \pi$ ) полупроводниковый диод VD смешен в прямом направлении и напряжение, а следовательно, и ток в нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала.

На интервале  $T/2 < t < T$  ( $\pi < t < 2\pi$ ) диод VD смешен в обратном направлении и напряжение (ток) в нагрузке равен нулю.

При заданном входном напряжении  $u_{ex} = U_m \sin \omega t$  для нечетных полупериодов выпрямленный ток в нагрузочном резисторе  $i_h$  будет создавать на нем падение напряжения, среднее значение которого будет равно:

$$U_{h_{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{h_{cp}} dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{T\omega} \cos \omega t = \frac{U_m}{\pi}$$

где  $U_m$  - амплитуда входного напряжения, или используя известное соотношение, связывающее амплитудное и действующее значения напряжения переменного тока  $U = U_m / \sqrt{2}$

$$U_{h_{cp}} = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} \approx 0,45U$$

где  $U$  - действующее значение входного напряжения.

По аналогии, предполагая, что амплитуда выпрямленного тока

$$I_m = \frac{U_m}{R_H}$$

для среднего тока в нагрузочном резисторе можно записать

$$I_{h_{cp}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_m \sin \omega t dt \approx \frac{I_m}{\pi} = 0,318I_m$$

$I_m$  - амплитуда выпрямленного тока.

Действующий ток в нагрузочном резисторе, равный току диода, определяется выражением

$$i_{VD} = I_h \sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_m \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{2} = 0,5I_m$$

Максимальное обратное напряжение на диоде  $U_{VD\ o\bar{b}p} = U_m$

Коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды низшей (основной) гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения, для рассматриваемой схемы

$$\varepsilon = \frac{U_{m1}}{U_{h\ cp}} = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

Как видно из последнего выражения, однополупериодное выпрямление имеет низкую эффективность из-за высокой пульсации выпрямленного напряжения, а потому находит ограниченное применение.

Достоинства: простота схемы, имеется один трансформатор и один диод.

Недостатки: большие размеры и вес трансформатора, значительная величина обратного напряжения на диоде, большая величина и низкая частота пульсаций.

*Двухтактный выпрямитель со средней (нулевой) точкой трансформатора (однофазный двухполупериодный)*

Анализируя временные диаграммы работы однофазного однополупериодного выпрямителя можно сделать вывод, что параметры выходного напряжения выпрямителя можно существенно улучшить, если ток нагрузки будет протекать в оба полупериода действия выходного напряжения. Этого наиболее просто добиться, используя две схемы однополупериодного выпрямления, работающие синхронно и противофазно на единую нагрузку. Реализация данной идеи требует использования двух источников первичного напряжения  $u'_{ex} = U_m \sin \omega t$  и  $u''_{ex} = U_m \sin(\omega t + \pi)$  имеющих общую точку. Полученная таким образом схема называется однофазной двухполупериодной схемой выпрямителя со средней точкой.

Рассмотрим ее работу. Для этого воспользуемся временными диаграммами, приведенными на рис. 2. На интервале времени  $0 < t < T/2$  ( $0 < t < \pi$ ) под действием напряжения  $u'_{ex}$  диод  $VD1$  смещен в прямом направлении и поэтому ток нагрузки определяется напряжением  $u'_{ex}$ . На этом же интервале диод  $VD2$  смещен в обратном направлении и к нему прикладывается сумма напряжений  $u_h + u''_{ex}$ .

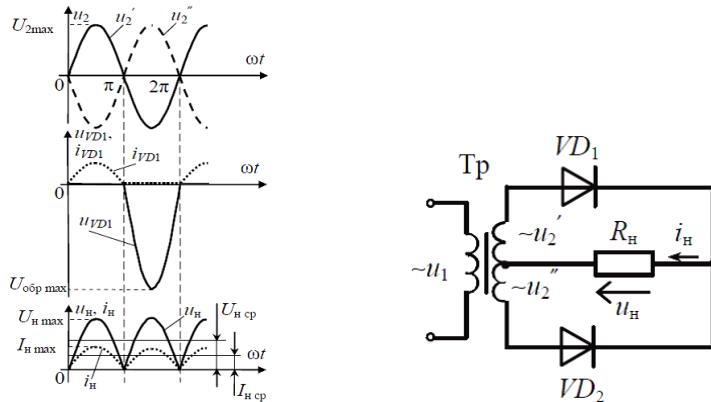


Рис. 2. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой и временные диаграммы, поясняющие его работу.

В результате этого максимальное обратное напряжение запертого диода  $U_{VD\ max} = 2U_m$ .

На интервале времени  $T/2 < t < T$  ( $\pi < t < 2\pi$ ) диод  $VD1$  смещен в обратном направлении, а ток нагрузки под действием напряжения  $u''_{ex}$  протекает через прямосмещенный диод  $VD2$ .

В данном случае средние значения напряжения нагрузки будут в два раза превышать напряжение однофазной однополупериодной схемы:

$$U_{h\ cp} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \approx 0,9U$$

$$I_{h_{cp}} = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi} \approx 0,9I$$

где  $U_m$  и  $I_m$  - амплитудные значения входного напряжения и тока, а  $U$  и  $I$  – их действующие значения.

Коэффициент пульсаций

$$\varepsilon = \frac{U_{m1}}{U_{h_{cp}}} = \frac{2\pi}{3} = 0,67$$

К основным недостаткам данной схемы следует отнести: необходимость двух источников входного напряжения; высокое значение напряжения, прикладываемого к полупроводниковым диодам при их обратном смещении ( $U_{VD\_{обр}} = 2U_m$ ); малое значение среднего напряжения  $U_{h_{cp}}$ , определяемого амплитудой  $U_m$ , в то время как суммарная амплитуда входного напряжения схемы равна  $2U_m$ .

Достоинства этой схемы выпрямления: за счет малого числа коммутируемых элементов уменьшаются потери в выпрямительном звене, что позволяет использовать схему при высоком токе нагрузки. Существует возможность размещения полупроводников на одном радиаторе без изоляции.

Недостатки схемы: при запирании диода за счет наведения ЭДС с работающей полуобмотки в неработающую происходит удвоение напряжения, прикладываемого к диоду в закрытом состоянии. Это не позволяет использовать схему при высоких уровнях выпрямленного напряжения. Кроме того, на каждом такте участвует в работе только одна из полуобмоток, что ухудшает использование трансформатора. С точки зрения качественных показателей ( $K_0, K_n$ ) данная схема не отличается от однофазной мостовой схемы выпрямления.

#### *Однофазный мостовой выпрямитель.*

Данная схема характеризуется высоким коэффициентом использования по мощности трансформатора и поэтому позволяет добиться оптимальных характеристик выпрямителя в большинстве практических случаях. Она содержит трансформатор и четыре диода, два из которых, соединяясь анодами, образуют общий минус выпрямителя, а два другие, соединяясь катодами, образуют общий плюс выпрямителя. В течение каждого полупериода переменного напряжения ток проходит через вторичную обмотку трансформатора и одну пару диодов: VD1, VD3 либо VD2, VD4.

Достоинство данной схемы – повышенная частота пульсаций, низкое обратное напряжение на диодах, возможность работы без трансформатора; недостаток – повышенное падение напряжения на диодах и необходимость применения изолирующих прокладок при установке диодов на один радиатор.

Достоинства однофазного мостового выпрямителя:

- высокое значение коэффициента выпрямления  $K_0$ , малый уровень пульсации напряжения (низкое значение  $K_n$ ) по сравнению с однополупериодной схемой выпрямления.
- по сравнению со схемой «со средней точкой трансформатора» (двуихполупериодной, однофазной) в схеме обеспечивается лучшее использование трансформатора и уровень обратного напряжения имеет меньшее значение.

Недостатки: коммутация двух вентилей в каждый момент времени приводит к увеличению потерь в звене выпрямителя, что нежелательно при больших токах. Наличие двух групп вентилей не позволяет размещать их на одном радиаторе без изоляции.

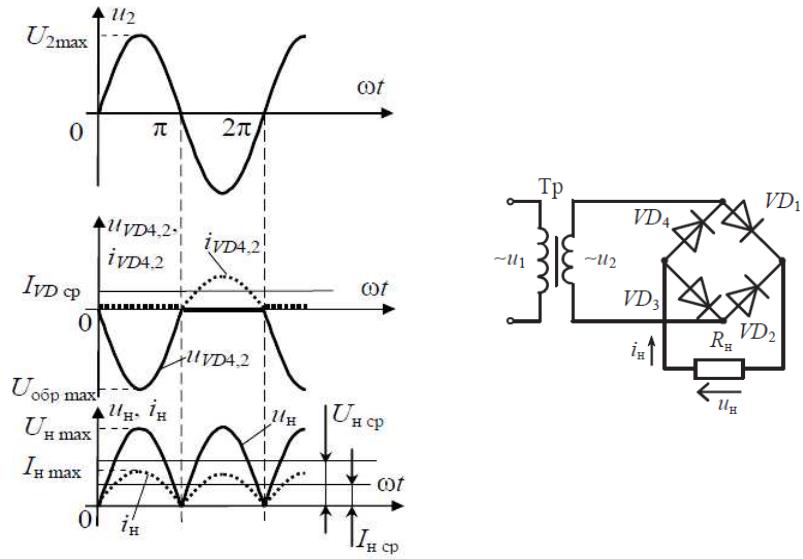


Рис. 3. Схема однофазного мостового выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу.

Основные параметры данной схемы:

$$U_{h\text{cp}} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \approx 0,9U$$

$$I_{h\text{cp}} = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi} \approx 0,9I$$

$$\varepsilon = \frac{U_{m1}}{U_{h\text{cp}}} = \frac{2\pi}{3} = 0,67$$

Используя рассмотренные выше принципы, можно построить схемы выпрямителей, работающих от трехфазной сети переменного тока. Для получения схемы *трехфазного однополупериодного выпрямителя* необходимо использовать входной источник со схемой соединения «звезда» и три однополупериодных выпрямителя.

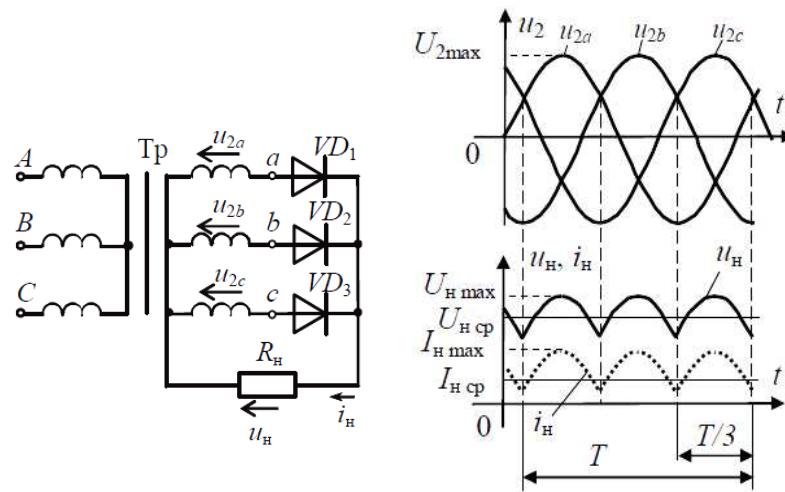


Рис. 4. Схема трехфазного однополупериодного (с нулевой точкой) и временные диаграммы, поясняющие его работу

Анализ временных диаграмм показывает, что в этом случае в течение одного периода изменения входного напряжения последовательно проводят три диода (по  $T/3$  каждый). Следовательно, к данной схеме выпрямителя применимы полученные ранее выражения. В соответствии с этим

$$U_{h\text{cp}} = \frac{3\sqrt{3}U_{m\phi}}{2\pi} \approx 0,827U_{m\phi}$$

$U_{m\phi}$  - амплитуда фазного напряжения.

Коэффициент пульсаций

$$\varepsilon = \frac{U_{m3}}{U_{h\text{cp}}} = 0,25$$

Максимальное обратное напряжение на каждом диоде равно амплитуде линейного напряжения, т.е.

$$U_{VD\text{обр}} = U_{m.l} = \sqrt{3}U_{\phi}$$

Средний ток через диод равен

$$I_{VD\text{cp}} = \frac{I_{h\text{cp}}}{3}$$

К недостаткам этой схемы можно отнести:

- Высокий уровень обратного напряжения (среднее напряжение – фазное, обратное – линейное), что не позволяет использовать данную схему при повышенных уровнях напряжения.
- Ток во вторичной цепи трансформатора протекает в течение одной третьей части периода и имеет одностороннее направление, что увеличивает габаритные размеры трансформатора. Для исключения подмагничивания сердечника необходимо делать запас по намагниченности (уменьшать значение  $B_m$ ), что приводит к дополнительному увеличению габаритов трансформатора. Иногда в сердечник трансформатора вводят воздушный зазор.
- Более низкие качественные показатели ( $K_n$ ,  $K_0$ ) по сравнению с двухполупериодной схемой выпрямления.
- Индуктивность рассеяния трансформатора влияет на форму выпрямленного напряжения, что является ограничением по мощности. При этом снижается уровень выпрямленного напряжения и возрастают пульсации.
- С точки зрения монтажа схемы – исключена возможность соединения вторичной цепи треугольником из - за нулевого вывода.

Достоинствами схемы выпрямления являются:

- более высокие токи нагрузки по сравнению с двухтактной схемой (малые потери из-за того, что в работе участвует один вентиль в любой момент времени).
- с точки зрения монтажа – существует возможность размещения полупроводников на одном радиаторе.

*Трехфазный двухполупериодный выпрямитель* (схема Ларионова) инвариантен к схеме соединения трехфазного источника входного напряжения («звезда» или «треугольник») и требует для построения шести полупроводниковых диодов. Схема такого выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу приведены на рис. 5.

В схеме Ларионова имеется возможность использовать обе полуволны питающего трехфазного напряжения для обеспечения тока в нагрузке. Поэтому выпрямленное напряжение  $u_n$  отличается более высоким качеством, а продолжительность проводящих интервалов для последовательно соединенных диодных пар (VD1 и VD4; VD3 и VD6; VD2 и VD5) составляет  $T/6$ .

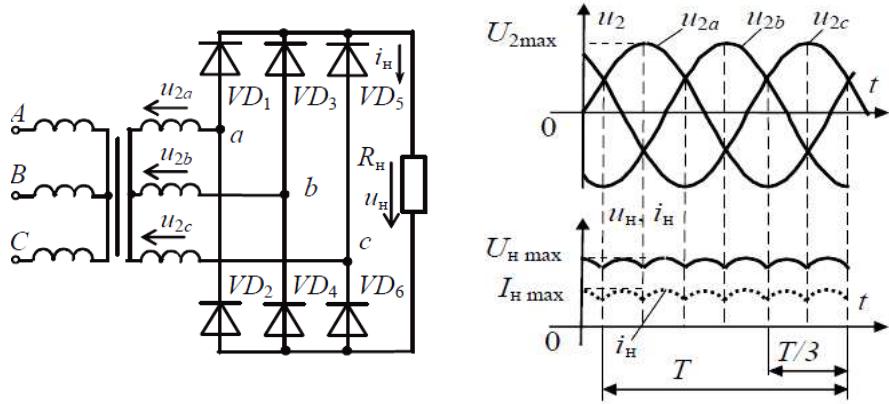


Рис. 5. Схема трехфазного двухполупериодного выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу

Основные параметры

$$U_{h\ cp} = \frac{3\sqrt{3}U_{m\ \phi}}{\pi} \approx 0,955U_{m\ \phi}$$

$$U_{VD\ obr} = U_{m\ l}$$

$$\varepsilon = \frac{U_{m6}}{U_{h\ cp}} = 0,057$$

К недостаткам схемы можно отнести:

- Большое падение напряжения на внутреннем сопротивлении выпрямителя за счет работы двух вентилей, что не позволяет использовать схему при высоких значениях тока нагрузки.

• Наличие двух радиаторов для анодной и катодной групп.

*Достоинствами* схемы выпрямления являются:

- Высокое значение коэффициента выпрямления и малый уровень обратного напряжения, что позволяет использовать схему при высоких уровнях напряжения.
- Малое значение коэффициента пульсаций по сравнению со схемой с нулевым выводом, что уменьшает габариты сглаживающего фильтра.
- Отсутствие одностороннего намагничивания сердечника трансформатора (ток во вторичной цепи трансформатора – двухполлярный).
- Хорошее использование трансформатора (ток во вторичной цепи трансформатора протекает 2/3 периода), что увеличивает КПД устройства.

Данная схема обладает высоким коэффициентом использования мощности трансформатора, малым значением обратного напряжения на диоде, повышенной частотой пульсаций выпрямленного напряжения. Эта схема применяется в широком диапазоне выходных мощностей и выпрямленных напряжений. Соединение вторичной обмотки трансформатора звездой позволяет избежать появления уравнительных токов при асимметрии фазных напряжений.

Для устранения нежелательного влияния переменной составляющей напряжения в цепях питания применяются фильтры, которые должны вносить максимально большое затухание для переменной составляющей и минимальное затухание для постоянной составляющей напряжения.

Основным показателем фильтра является коэффициент сглаживания, который, являясь безразмерной величиной, определяется как отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на его выходе. Обычно коэффициент сглаживания рассчитывается по первой гармонике переменной составляющей. Определяя коэффициент пульсаций через отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей (среднему значению) напряжения, можно коэффициент сглаживания представить в виде

$$q = \frac{K_{\Phi}}{K_{\Pi}}$$

где  $K_{\Phi}$  – отношение амплитуд первой гармоники на входе  $U_{m1}$  и на выходе  $U_{m2}$  фильтра, называемое коэффициентом фильтрации;  $K_{\Pi}$  – величина, обратная отношению среднего значения напряжения на выходе  $U_{02}$  и на входе  $U_{01}$  фильтра, которая называется коэффициентом передачи. С учетом принятых обозначений коэффициент фильтрации фильтра  $K_{\Phi}=qK_{\Pi}$ .

Эффект сглаживания в фильтре может быть достигнут либо введением в последовательную с нагрузкой цепь элемента с большим реактивным сопротивлением для спектра подавляемых частот, либо подключением параллельно нагрузке элемента с очень малым сопротивлением для указанных частот.

Сглаживающие фильтры делятся на две основные категории. К первой относятся фильтры, в состав которых входят только пассивные реактивные элементы (катушки индуктивности и конденсаторы), а к другой – фильтры, которые содержат также активные элементы, например транзисторы, работающие в усилительном режиме.

Если пульсация напряжения происходит на одной или нескольких фиксированных частотах, то целесообразно применять резонансные фильтры, у которых собственная частота LC-контуров совпадает с частотами пульсаций напряжения. В случае необходимости подавления спектра частот применяется фильтр, собственная частота которого выбирается меньше, чем частота наиболее низкой гармоники сглаживаемого напряжения.

Фильтрация переменной составляющей основана на том, что последовательно с нагрузкой включаются элементы, имеющие большое сопротивление для переменной составляющей выпрямленного тока и малое для постоянной, а параллельно нагрузке элементы, имеющие малое сопротивление для переменной составляющей и большое для постоянной составляющей. Последовательными элементами могут быть катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником или параллельный контур, настроенный в резонанс на частоту пульсаций. Элементом, включаемым параллельно нагрузке, может быть конденсатор большой емкости или последовательный контур, настроенный в резонанс на частоту пульсации.

Простейшие из фильтров состоят из одного конденсатора или одного дросселя. Более сложные – из одного Г-образного звена – соединения дросселя и конденсатора (звено L, C), или конденсатора и резистора (звено R, C) или одного П-образного звена. П-образное звено состоит из конденсатора и Г-образного звена. В Г-образном звене фильтра последовательно с нагрузкой включается дроссель или резистор и параллельно – конденсатор. П-образный фильтр имеет два звена. Первым является конденсатор, а вторым – какой-либо Г-образный фильтр.

Сглаживающие фильтры разделяются на однозвенные и многозвенные. Последние представляют собой фильтры, в которых последовательно включается несколько звеньев. В свою очередь, однозвенные фильтры могут содержать один или несколько реактивных элементов.

Рассмотрим примеры некоторых пассивных фильтров.

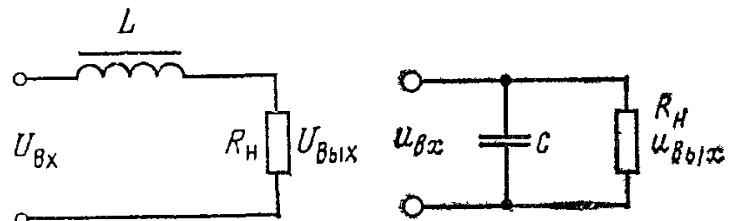


Рис. 6 Индуктивный и емкостной сглаживающие фильтры

Индуктивный фильтр состоит из дросселя, включенного последовательно с нагрузкой. Дроссель – это катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником. Любое изменение тока в цепи с индуктивностью вызывает появление ЭДС самоиндукции, препятствующей этому изменению, поэтому переменная составляющая выпрямленного тока будет уменьшаться (сглаживаться). Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, включенный параллельно сопротивлению нагрузки. Для получения достаточно большого коэффициента сглаживания необходимо выбрать емкость конденсатора такой, чтобы его сопротивление переменной составляющей тока было заметно меньше сопротивления нагрузки.

Коэффициент фильтрации фильтра с одним идеальным индуктивным элементом  $L$  равен  $K\Phi=1+2\pi fL/RH$ , где  $f$  – частота нижней гармоники фильтруемого напряжения. Учитывая, что второе слагаемое всегда значительно больше единицы, то с достаточной точностью  $K\Phi=2\pi fL/RH$ . Сглаживающий фильтр с одним индуктивным элементом не нашел широкого применения, так как его свойства сильно зависят от величины и характера нагрузки. Недостатком является и то, что конструкция фильтра требует применения громоздкого дросселя, стальной сердечник которого должен иметь воздушный зазор.

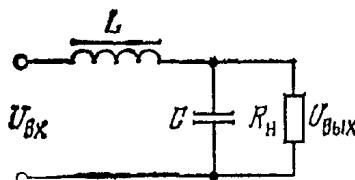


Рис. 7. LC-фильтр

LC-фильтр или Г-образный фильтр состоит из дросселя, включенного последовательно в цепь выпрямленного тока, и конденсатора, подключенного параллельно нагрузке. Применение двух реактивных элементов улучшает сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения. В Г-образном фильтре реактивное сопротивление конденсатора, так же как и в фильтре с конденсатором, выбирается значительно меньше сопротивления нагрузки, а индуктивное сопротивление дросселя фильтра делается много большим сопротивления конденсатора. Таким образом, Г-образный фильтр является реактивным делителем переменного напряжения. Практически все напряжение пульсаций падает на дросселе фильтра. Выпрямителю, работающему на Г-образный фильтр, обеспечивается индуктивная реакция нагрузки, так как реактивное сопротивление дросселя для первой гармоники больше сопротивления нагрузки и больше реактивного сопротивления конденсатора.

Чтобы потери выпрямленного напряжения в фильтре были малы, дроссель должен выполняться так, чтобы активное сопротивление его обмотки было незначительно по сравнению с сопротивлением нагрузки. Поэтому при выводе расчетных формул активным сопротивлением обмотки дросселя пренебрегают.

Коэффициент сглаживания данного фильтра будет равен:

$$q = m^2 \omega_c^2 L_{op} C - 1$$

$m$  – число фаз выпрямления.

При расчете фильтра необходимо обеспечить такое соотношение реактивных сопротивлений дросселя и конденсатора, при которых не могли бы возникнуть резонансные явления на частоте пульсаций выпрямленного напряжения. Для этого необходимо, чтобы собственная частота фильтра  $\omega_f$  была хотя бы в 2 раза меньше частоты пульсаций ( $\omega_f \leq 0,5 \omega_c$ ). Это условие всегда выполняется при  $q > 3$ .

Постоянный ток нагрузки, протекая по обмотке дросселя, создает по-стоянное подмагничивание его сердечника, что смещает рабочую точку на кривой намагничивания на пологий участок, соответствующий магнитному насыщению. Это приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, следовательно, индуктивности дросселя. Для снижения влияния подмагничивания на индуктивность дросселя сердечник дросселя выполняется с немагнитным зазором.

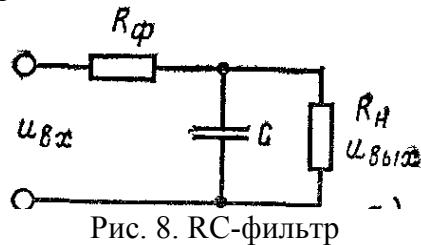


Рис. 8. RC-фильтр

Иногда в LC-фильтре заменяют индуктивность на сопротивление. Получается Г-образный RC-фильтр. Переменная составляющая тока будет проходить через сопротивление фильтра  $R_\phi$  и конденсатор  $C$ . Так как емкостное сопротивление конденсатора мало по сравнению с сопротивлением фильтра, то последним можно пренебречь. Выходное напряжение пульсаций определяется общим сопротивлением параллельного включения конденсатора и нагрузки. Коэффициент сглаживания данного фильтра будет равен:

$$q = \frac{m\omega_c CR_H R_\phi}{R_H + R_\phi}$$

Если сопротивление фильтра мало по сравнению с сопротивлением нагрузки, то коэффициент сглаживания одного Г-образного звена RC-фильтра

$$q = m\omega_c CR_\phi$$

Зная требуемый коэффициент сглаживания фильтра и определяя сопротивление фильтра  $R_\phi = (0,05 - 0,3)R_H$  находим емкость фильтра  $C$ :

$$C = \frac{q}{m\omega_c R_\phi}$$

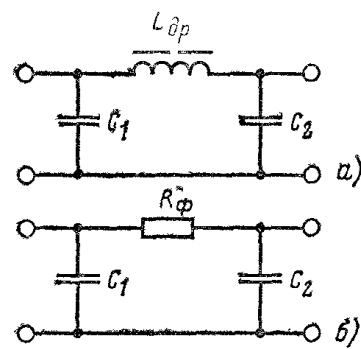


Рис. 9. П-образные фильтры: а) CLC; б) CRC.

П-образный фильтр состоит из двух звеньев: емкостного С, включенного на входе фильтра, и следующего за ним Г-образного LC- или RC-звена. Коэффициент сглаживания П-образного фильтра выше, чем у однозвенного, и равен произведению коэффициентов сглаживания первого и второго звеньев.

#### Электронные или активные фильтры

Электронными или активными фильтрами электропитания называются фильтры с применением активных усилительных элементов. В различных литературных источниках такие фильтры также называют транзисторными. Активные фильтры можно разделить на две основные группы:

- фильтры с линейным принципом регулирования энергии;
- фильтры с импульсным принципом регулирования энергии.

Рассмотрим пример транзисторного фильтра.

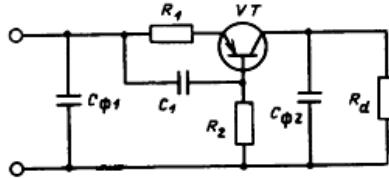


Рис. 10. Транзисторный последовательный фильтр

Принцип действия такого фильтра основан на нелинейности вольт-амперных характеристик транзистора. Зависимость коллекторного тока  $I_C$  от напряжения эмиттер-коллектор  $U_{CE}$  такова, что транзистор обладает весьма большим сопротивлением переменному току (большим динамическим сопротивлением). На рис. 3.10 приведена схема транзисторного П-образного фильтра. Первое звено фильтра представлено конденсатором  $C_{\phi 1}$ , а второе, Г-образное, состоит из транзистора VT и конденсатора  $C_{\phi 2}$ . Ток коллектора транзистора определяется током эмиттера  $I_E$ . Если последний поддерживается постоянным, то колебания входного напряжения, вызванные, например, пульсацией выпрямленного напряжения, не вызывают изменения  $I_C$  (следовательно, и напряжения на нагрузке), а приводят только к перемещению рабочей точки транзистора по пологой части его характеристики  $I_C=f(U_{CE})$ . Для того, чтобы ток эмиттера  $I_E$  не изменялся под воздействием пульсаций, в цепь транзистора введены сопротивление  $R_1$  и конденсатор  $C_1$ . Емкость конденсатора  $C_1$  выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить постоянство тока  $I_E$  при воздействии пульсаций. Режим работы транзистора по постоянному току задается в схеме фильтра сопротивлением в цепи базы  $R_2$ .

В рассмотренной схеме транзистор включен последовательно с нагрузкой, но существуют также схемы с параллельным включением транзистора, принцип действия которых также основан на нелинейности сопротивления транзистора.

Транзисторные фильтры целесообразно применять для согласования пульсаций низких частот в маломощных выпрямителях. В этих случаях использование их может дать выигрыш в массе и габаритах выпрямительного устройства. Основными недостатками транзисторных фильтров по сравнению с обычными пассивными являются более высокая стоимость, трудность обеспечения защиты транзистора в аварийных режимах и более низкая надежность.

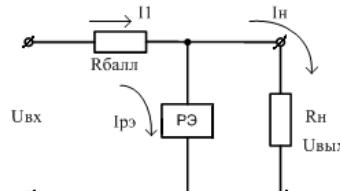
Фильтры с импульсными принципами регулирования нашли широкое применение в современных источниках питания и их количество постоянно растет. Коэффициент полезного действия таких фильтров весьма высок и практически не зависит от величины входного напряжения и пульсаций (или зависит много меньше, чем у линейных). Основную функцию фильтрации (сглаживания) низкочастотных пульсаций выполняют импульсные преобразователи. Одним из наиболее распространенных активных фильтров является корректор коэффициента мощности.

### 3. Стабилизаторы напряжения линейного типа.

Стабилизатор – устройство автоматического поддержания в заданных пределах напряжения или тока при воздействии дестабилизирующих факторов (напряжение, ток, температура, давление, влажность и пр.).

Стабилизатор должен обязательно иметь регулирующий орган (РЭ – регулирующий элемент). В зависимости от способа включения РЭ все стабилизаторы делят на параллельные и последовательные.

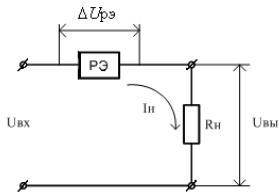
В параллельном стабилизаторе РЭ включен параллельно нагрузке. Эти стабилизаторы не боятся перегрузок по току и КЗ нагрузки.



$$I_1 = I_{PЭ} + I_H$$

Через балластный резистор  $R_{БАЛЛ}$  протекает ток  $I_1$ . Если изменяется входное напряжение, то путем изменения тока  $I_{PЭ}$  можно менять падение напряжения на  $R_{БАЛЛ} \rightarrow \Delta U = R_{БАЛЛ}(I_{PЭ} + I_H)$  и тем самым поддерживать выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  постоянным  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - \Delta U$ .

В последовательном стабилизаторе РЭ включен последовательно в цепь тока нагрузки



Здесь  $U_{ВХ} = \Delta U_{PЭ} + U_{ВЫХ}$ . Если изменяется входное напряжение, то путем изменения внутреннего сопротивления РЭ можно изменять падение напряжения на нём и поддерживать выходное напряжение постоянным  $U_{ВЫХ} = const$ .

В зависимости от того, чем управляется РЭ все стабилизаторы делят на параметрические и компенсационные.

В параметрических стабилизаторах управление РЭ производится тем же внешним воздействием, которое нарушает постоянство выходной величины. В них используются нелинейные свойства характеристик приборов (вольт-амперных, ампер-вольтовых, вебер-амперных, Ом-градусных, вольт-секундных и др.) – это стабилитроны, дроссели насыщения, термосопротивления и т.п.

В компенсационных стабилизаторах управление РЭ производится отклонением выходной величины от заданного значения независимо от того, чем вызвано это отклонение. Эти стабилизаторы содержат эталон и цепь обратной связи.

Стабилизаторы характеризуются рядом параметров, основными из которых являются:

1. Коэффициент стабилизации по входному напряжению в номинальном режиме:

$$K_U = \frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ}} \Big/ \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}}$$

иногда используется нестабильность выходного напряжения при неизменной нагрузке (или статическая ошибка)

$$\delta_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \quad \text{при } I_H = \text{const}$$

2. Внутреннее сопротивление стабилизатора:

$$R_i = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}} \quad \text{при } U_{\text{ВХ}} = \text{const.}$$

Зная  $R_i$  можно найти  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$  при изменении тока нагрузки.

Вместо  $R_i$  иногда используют нестабильность выходного напряжения по току нагрузки (или динамическая ошибка):

$$\delta_i = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \quad \text{при } U_{\text{ВХ}} = \text{const}$$

3. Температурная нестабильность:

$$\delta_T = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta T} \left[ \frac{\text{Вольт}}{\text{градус}} \right] \quad \text{или} \quad \delta_T = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta T} \left[ \frac{\%}{\text{C}} \right]$$

При  $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$

$R_H = \text{const}$

4. Коэффициент сглаживания пульсаций:

$$q = \frac{U_{m\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \Big/ \frac{U_{m\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}},$$

где  $U_m$  - амплитуда пульсаций.

Если пульсации считать нестабильностью входного напряжения определённой частоты, то  $q$  должен быть равным  $K_U$ , но обычно это не выполняется в компенсационных стабилизаторах из-за частотных свойств цепи обратной связи, поэтому  $q \neq K_U$ .

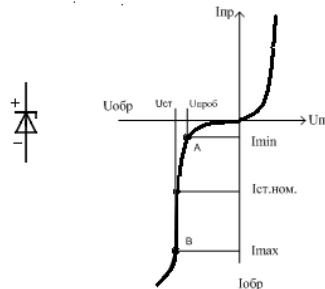
5. Коэффициент полезного действия:  $\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$ .

Стабилизаторы напряжения переменного тока дополнительно характеризуются нестабильностью по частоте сети ( $\delta_f$ ), нестабильностью входного импеданса ( $\delta_z$ ) и коэффициентом мощности. Существенны также их масса, объём и срок службы.

### Параметрические стабилизаторы

1. Параметрические стабилизаторы напряжения постоянного тока.

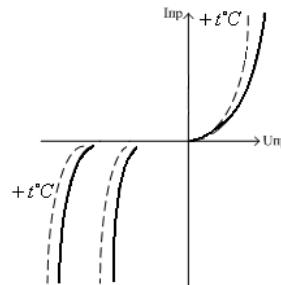
В качестве РЭ здесь, как правило, применяют стабилитроны, в которых используется обратный участок ВАХ – участок пробоя.



На рабочем участке значительным изменениям тока соответствует слабое изменение  $U_{\text{CT}}$ . Если превысить  $I_{\text{max}}$ , то мощность рассеиваемая на стабилитроне, будет больше допустимой и он выйдет из строя.

Недостатком стабилитронов является существенная зависимость напряжения от температуры, но теплового гистерезиса эти характеристики не имеют. Обычно

температурный коэффициент напряжения имеет величину около  $\alpha_T = 0,1\% / {}^\circ C$ , причем, его ВАХ в отличие от простого р-п перехода смещается по горизонтальной оси, как показано на рисунке.



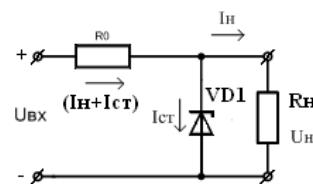
Это свойство используется для термокомпенсации. Поэтому путем последовательного включения стабилитронов можно получить температурный коэффициент до  $\alpha_T = 0,0005\% / {}^\circ C$  (прецизионные стабилитроны).



Хотя внутреннее сопротивление (дифференциальное) этой цепочки больше, чем у одного диода  $r_d = \frac{\Delta U_{CT}}{I_{\max} - I_{\min}}$ , но стабильность высокая.

Диапазон напряжений – от единиц до десятков вольт, токи – от долей мА до единиц Ампер. Емкость перехода порядка 1...7 нФ, поэтому стабилитрон практически безинерционен до частот  $\sim 1$  МГц, высокая надежность и большой срок службы. Стабилитроны с напряжением менее трёх вольт работают на прямом участке ВАХ и называются стабисторами.

Простейший параметрический стабилизатор состоит из балластного резистора  $R_0$  и стабилитрона VD1:



При заданных минимальных и максимальных значениях  $U_{BX}, I_H(R_H), R_0$  рабочая точка на ВАХ стабилитрона не должна выходить за пределы рабочего (линейного) участка.

Коэффициент стабилизации этой схемы по входному напряжению:  $k_{CT} = \frac{R_0}{r_d} \cdot \lambda$ ,

где  $\lambda = \frac{U_H}{U_{BX}}$  – коэффициент передачи постоянной составляющей (иногда его называют КПД, но это очень приближённо).

### 1.3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Усилители электрических сигналов. Операционные усилители»

#### 1.3.1 Вопросы лекции:

1. Классификация и основные параметры электронных усилителей. Обратные связи в усилителях.
2. Каскады усилителей низкой частоты. Транзисторные схемы усилителей.
3. Операционные усилители (ОУ), эквивалентная схема, типовые серии, параметры.
4. Примеры применения ОУ.

#### 1.3.2 Краткое содержание вопросов

*1. Классификация и основные параметры электронных усилителей. Обратные связи в усилителях.*

Усилителем называют устройство, предназначенное для усиления входного сигнала по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Как следует из определения, суть процесса усиления электрических сигналов состоит в преобразовании энергии источника питания усилителя в энергию выходного сигнала по закону, определяемому входным управляющим воздействием. Другими словами, любой усилитель модулирует энергию источника питания входным управляющим сигналом. Этот процесс осуществляется при помощи управляемого нелинейного элемента. Управляемые нелинейные элементы современных усилителей выполняются, как правило, с использованием биполярных и полевых транзисторов. Поэтому их часто называют транзисторными усилителями.

##### Классификация усилителей.

По роду усиливаемых сигналов их подразделяют на усилители гармонических сигналов и усилители импульсных сигналов.

По характеру изменения усиливаемого сигнала во времени усилители делят на усилители медленно изменяющихся сигналов, которые часто называют усилителями постоянного тока, и усилители переменного тока, подразделяемые на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные, избирательные, универсальные многофункциональные и пр.

В зависимости от характера нагрузки и назначения различают усилители напряжения, тока и мощности. Такое разделение условно, так как в любом случае в конечном счете усиливается мощность.

В зависимости от типа используемых в усилителе активных элементов различают усилители: ламповые, полупроводниковые, магнитные, оптоэлектронные, диэлектрические.

По виду соединительных цепей усилительных каскадов. Так как усилительные устройства строятся, как правило, на основе последовательного включения нескольких типовых каскадов, то различаются усилители с гальванической (непосредственной) связью, предусматривающие передачу между каскадами сигнала как переменного, так и постоянного токов; усилители с RC-связями, в которых между выходом предыдущего и входом последующего каскадов включают резистивно-емкостную цепь, исключающую передачу сигналов постоянного тока; усилители с индуктивной (трансформаторной) связью, в которых между каскадами включается трансформатор.

По виду нагрузки различают усилители с активной, активно-индуктивной, и емкостной нагрузкой. На практике также встречаются резонансные усилители, нагрузка которых обладает свойствами резонансного контура.

##### **Основные характеристики усилителя**

Важнейшими характеристиками усилителя являются: коэффициент усиления, полоса пропускания (диапазон рабочих частот усилителя), входное и выходное сопротивления, выходная мощность, степень искажения усиленного сигнала и др.

**Коэффициент усиления** – отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

по напряжению

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

по току

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$$

по мощности

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

где  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$  – действующие напряжения и токи

Так как  $P_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}I_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}I_{\text{вых}}$  то коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_u K_i$ .

При каскадном соединении нескольких усилительных устройств произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы, т.е.

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_n$$

В ряде случаев коэффициенты усиления выражают в логарифмических единицах – децибелах (дБ):

$$K_u = 20 \lg \left( \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right); K_i = 20 \lg \left( \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \right); K_p = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)$$

Логарифмические единицы удобны тем, что если известны коэффициенты усиления отдельных каскадов или узлов усилителя, общий коэффициент усиления которого равен произведению этих коэффициентов, то его находят как алгебраическую сумму логарифмических коэффициентов усиления отдельных каскадов.

Коэффициенты усиления по напряжению и току, как правило, комплексные величины, характеризуемые как модулем, так и фазой. Это связано с тем, что отдельные составляющие спектра сигнала усиливаются по-разному из-за наличия реактивных компонентов и инерционности активных приборов.

**Полоса пропускания усилителя** – диапазон рабочих частот  $\Delta f$ , в пределах которого коэффициент усиления не снижается ниже значения  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  от своего максимального значения  $K_{\text{max}}$ . Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) усилителя. Пример АЧХ показан на рис. 4.1.

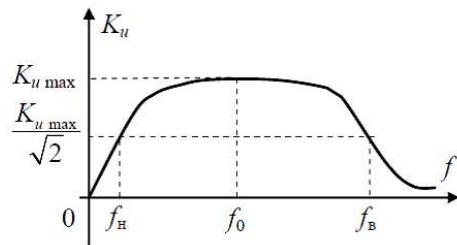


Рис. 1. Логарифмическая АЧХ

Если восстановить перпендикуляр из точки на ось абсцисс, соответствующей значению  $K_{\text{max}}/\sqrt{2}$ , до пересечения с АЧХ, то не представляет труда графическим путем определить полосу пропускания усилителя. Проекция на ось абсцисс первой точки

пересечения соответствует нижней ( $f_h$ ), а второй – верхней ( $f_b$ ) частотам пропускания усилителя. Тогда полоса пропускания

$$\Delta f = f_b - f_h.$$

Если коэффициент усиления измеряется в децибелах, то значениям граничных частот усиления  $f_h$  и  $f_b$  соответствует уменьшение коэффициента усиления на 3 дБ.

Для удобства взаимного сопоставления АЧХ усилителей с различными значениями  $K_{max}$  их обычно нормируют, представляя выходной параметр в виде относительной величины, т.е.

$$N(f) = \frac{K(f)}{K_{max}}$$

где  $K(f)$  и  $K_{max}$  - коэффициент усиления на частоте  $f$  и максимальное значение коэффициента усиления.

В зависимости от АЧХ, т.е. от диапазона частот усиливаемых сигналов (ширины полосы пропускания) усилители с линейным режимом работы бывают следующих типов:

- усилители постоянного тока (УПТ) - усилители медленно изменяющихся сигналов от 0 до сотен кГц;
- усилители низкой частоты (УНЧ) – от десятков Гц до десятков кГц;
- усилители высокой частоты (УВЧ) – от десятков кГц до десятков-сотен МГц;
- широкополосные усилители (ШПУ) – от десятков Гц до десятков и сотен МГц;
- узкополосные усилители (УПУ) – характеризуется пропусканием узкой полосы частот.

**Входное и выходное сопротивления** – важнейшие параметры усилительных устройств. Их значения должны учитываться при согласовании усилительного устройства как с источником входного сигнала (датчиком), так и с нагрузкой. В общем виде значения входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией частоты. Последняя зависимость особенно важна в случае действия на входе усилительного устройства непериодического сигнала.

Входное и выходное сопротивления определяются выражениями

$$Z_{bx}(\omega) = U_{bx}(\omega)I_{bx}(\omega) \text{ при } R_h = \text{const};$$

$$Z_{vых}(\omega) = [U_{вых\,x}(\omega) - U_{вых}(\omega)]/I_{вых}(\omega)$$

Часто на практике используют только активное входное и выходное сопротивления:

$$R_{bx} = R_1 = \left( \frac{U_1}{I_1} \right)_{R_h = \text{const}}$$

$$R_{вых} = R_2 = \frac{U_{вых\,x} - U_{вых}}{I_{вых}} = \frac{U_{2x}}{I_{2k}}$$

где  $U_{2x}$  – напряжение холостого хода на выходе усилителя ( $R_h = \infty$ );

$I_{2k}$  – ток короткого замыкания ( $R_h = 0$ ).

**Выходная мощность усилителя** – это та часть мощности, которая может быть выделена в нагрузочном устройстве. В случае активной нагрузки она равна

$$P_{вых} = P_2 = I_2^2 R_h$$

**Искажение сигналов в усилителе** связано, во-первых, с нелинейной зависимостью выходного сигнала от входного, обусловленной нелинейностью статических ВАХ применяемых элементов, и, во-вторых, с частотной зависимостью амплитуды и фазы усиливаемого сигнала. Поэтому при анализе работы усилителей рассматривают два вида искажений выходного сигнала по отношению к входному: статические (нелинейные) и динамические (амплитудные и фазовые), в результате которых изменяется как форма, так

и частотный спектр усиливаемого сигнала. Динамические искажения иногда называют линейными искажениями.

Количественно эти искажения оценивают коэффициентом нелинейных искажений  $K_{\text{ни}}$  и коэффициентом гармоник  $K_r$ .

Коэффициент нелинейных искажений определяется корнем квадратным из отношения мощностей всех высших гармоник выходного сигнала, появляющихся в результате нелинейных искажений, к полной выходной мощности:

$$K_{\text{ни}} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}} = \sqrt{\frac{I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots + I_{nm}^2}{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots + I_{nm}^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}{U_{1m}^2 + U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}$$

Коэффициент гармоник представляет собой корень квадратный из отношения мощностей всех высших гармоник выходного сигнала, появляющихся в результате нелинейных искажений, к мощности первой гармоники:

$$K_r = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots + I_{nm}^2}{I_{1m}^2}} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}{U_{1m}^2}}$$

где  $P_n$  – мощность  $n$ -ой гармонической составляющей выходного сигнала;  $U_{nm}$ ,  $I_{nm}$  – амплитуды напряжений и тока  $n$ -ой гармонической составляющей выходного сигнала.

**Переходная характеристика** – зависимость от времени выходного напряжения усилителя, на вход которого подан мгновенный скачок напряжения. Эта характеристика дает возможность определить переходные искажения, которые в области малых времен характеризуются фронтом выходного напряжения и оцениваются временем установления  $t_y$  и выбросом  $\delta$ .

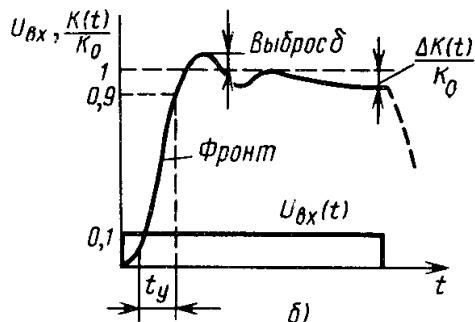


Рис. 2. Переходная характеристика усилителя

Все виды обратной связи могут очень сильно изменять свойства усилителя. Как внутренними, так и паразитными связями нельзя управлять, и они нередко изменяют свойства усилителя в нежелательном направлении, например, приводят к самовозбуждению усилителя. Внешняя же обратная связь легко управляется и ее вводят для улучшения свойств усилителя: повышения стабильности коэффициента усиления, снижения искажений всех видов, уменьшения собственных помех и т.д.

Замкнутый контур, образуемый цепью обратной связи и частью схемы усилителя, к которой эта цепь присоединена, называют петлей обратной связи. Если в усилителе имеется только одна петля обратной связи, связь называют одно-петлевой или одноканальной (рис. 3, а), если петель несколько, ее называют много-петлевой или многоканальной (рис. 3, б и в). Связь, охватывающую один каскад усилителя, нередко называют местной обратной связью (рис. 3, в).

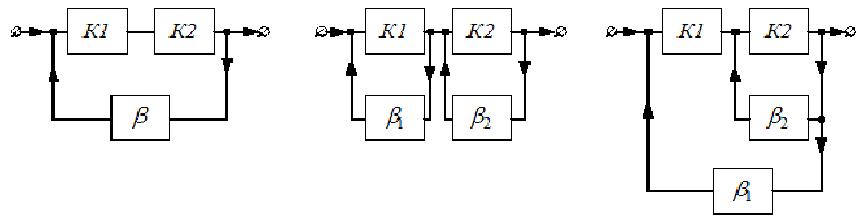


Рисунок 3 – Виды обратной связи: а – однопетлевая, б – двухпетлевая с независимыми петлями, в – многопетлевая с одной петлей

Цепь обратной связи можно присоединить к входу и выходу схемы разными способами. Если цепь обратной связи присоединить к выходу схемы параллельно нагрузке, то напряжение обратной связи будет пропорционально напряжению на нагрузке; такую обратную связь называют обратной связью по напряжению (рис. 4, а). Если же цепь обратной связи присоединить к выходу устройства последовательно с нагрузкой, напряжение обратной связи будет пропорционально току в нагрузке, и обратную связь называют обратной связью по току (рис. 4, б). Если в схеме осуществлена комбинация обоих способов (рис. 4, в), связь называют комбинированной по выходу или смешанной по выходу обратной связью.

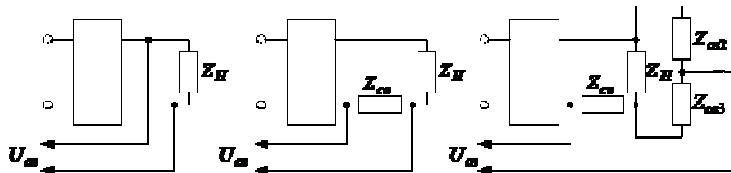


Рисунок 4 – Способы снятия обратной связи:  
а – по напряжению, б – по току, в – смешанная по выходу ОС

К входу устройства цепь обратной связи также можно подключить тремя способами: последовательно с источником сигнала (рис. 5, а), параллельно ему (рис. 5, б) и смешанным способом (рис. 5, в); в первом случае связь называют последовательной обратной связью, во втором – параллельной обратной связью, и в последнем – комбинированной по входу или смешанной по входу обратной связью.

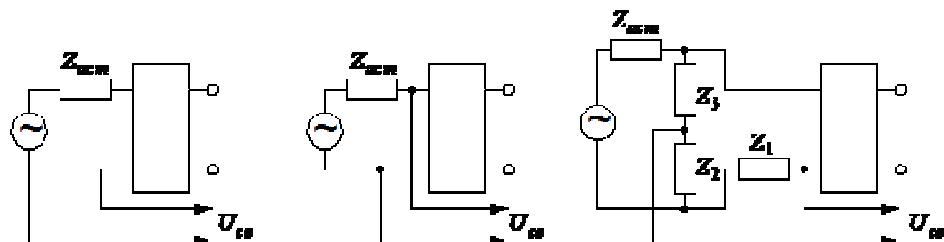


Рисунок 5 – Способы введения обратной связи:  
а – последовательная, б – параллельная, в – смешанная по входу ОС

Обратную связь называют положительной (ПОС), если ее напряжение находится точно в фазе с напряжением сигнала, подводимым ко входу устройства, и складывается с последним, увеличивая таким образом напряжение сигнала на входе. Если же напряжение обратной связи находится точно в противофазе с входным, а следовательно, вычитается из него, уменьшая сигнал на входе, обратную связь называют отрицательной ООС. При сдвиге фаз между напряжением обратной связи и входным напряжением, отличающимся как от  $0^\circ$ , так и от  $180^\circ$ , обратную связь называют комплексной.

Если цепь обратной связи не содержит реактивных сопротивлений (индуктивностей, емкостей), а поэтому отношение напряжения обратной связи на выходе цепи к напряжению на ее входе от частоты не зависит, обратную связь называют

частотно-независимой; если же цепь обратной связи содержит реактивные сопротивления и указанное отношение напряжений зависит от частоты, связь называют частотно-зависимой.

## 2. Каскады усилителей низкой частоты. Транзисторные схемы усилителей.

### Усилительный каскад с общим эмиттером (ОЭ)

Полупроводниковая электроника на дискретных (отдельных) компонентах содержит ряд вариантов выполнения усилительного каскада на транзисторе с ОЭ. Принцип действия усилительных каскадов с ОЭ рассмотрим на примере наиболее распространенной схемы (рис. 6). На входе каскада действуют усиливаемые переменные ток  $i_{ex}$  и напряжение  $u_{ex}$ , а на выходе – усиленные переменные ток  $i_h$  и напряжение  $u_{вых}$ .

В этой схеме усилительного каскада конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  – разделительные. Конденсатор  $C_1$  препятствует протеканию постоянного тока от источника питания  $E_k$  в цепь источника входного сигнала. Конденсатор  $C_2$  обеспечивает выделение из коллекторного напряжения переменной составляющей, поступающей на резистор нагрузки  $R_h$ . Резисторы базового делителя напряжения  $R_1$ ,  $R_2$  задают *режим покоя* транзистора, при котором в нем протекают только постоянные *токи покоя* базы  $I_{BП}$ , коллектора  $I_{KП}$  и эмиттера, а на его базе, коллекторе и эмиттере соответственно действуют постоянные  $I_{ЭП}$  напряжения покоя  $U_{BП}$ ,  $U_{KП}$ ,  $U_{ЭП}$ .

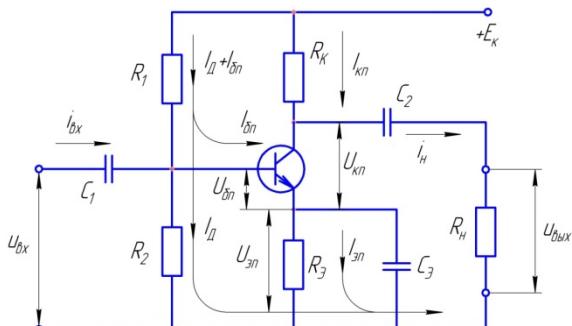


Рис. 6. Схема усилительного каскада с ОЭ

Резистор  $R_3$  и делитель  $R_1$ ,  $R_2$  составляют цепь отрицательной обратной связи (ООС), предназначенную для стабилизации режима покоя транзистора при изменении его температуры (для термостабилизации). Действие обратной связи объясняется следующим образом. При увеличении, например, из-за роста температуры тока коллектора покоя  $I_{KП}$  возрастают ток эмиттера покоя  $I_{ЭП}$  и падение напряжения на резисторе  $R_3$ , поскольку  $U_{ЭП} = I_{ЭП} R_3$ . Так как напряжение между базой и землей (база – земля)  $U_{БЗ}$  фиксировано базовым делителем  $R_1$ ,  $R_2$  и  $U_{БЗ} = U_{БП} + U_{ЭП}$ , то с увеличением напряжения  $U_{ЭП}$  уменьшает напряжение  $U_{БП}$ . Это приводит к призакрыванию транзистора, уменьшению тока базы покоя  $I_{BП}$  и, следовательно, снижению тока коллектора покоя  $I_{KП}$ . Тем самым производится компенсация первоначального увеличения тока коллектора покоя.

Включение резистора  $R_3$  в цепь эмиттера изменяет работу каскада и при усилении переменного сигнала. Переменный ток эмиттера создает на резисторе  $R_3$  падение напряжения  $u_3 = i_3 R_3$ , которое уменьшает усиливаемое напряжение, подводимое к базе транзистора, ведь  $u_{БЭ} = u_{ex} - u_3$ . При этом снижается и коэффициент усиления каскада, поскольку действует ООС по переменному току. Для ее исключения резистор  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$  достаточно большой емкости. Поскольку сопротивление конденсатора мало, то переменный ток протекает по нему и не создает падения напряжения на резисторе  $R_3$ .

В режиме покоя транзистора расчет параметров каскада по постоянному току (т.е. при отключенном входном сигнале) проводят графоаналитическим методом с использованием статических выходных и входных ВАХ транзистора (рис. 7). Этот метод

очень нагляден и удобен при нахождении связи параметров режима покоя каскада ( $U_{KП}$  и  $I_{KП}$ ) с амплитудными значениями его переменных составляющих – выходного напряжения  $U_{выхm}$  и коллекторного тока  $I_{km}$ .

При расчетах каскада с ОЭ на выходных характеристиках транзистора (рис. 7, а) проводят линию *нагрузки по постоянному току* (линия 1-2), положение которой определяется вторым законом Кирхгофа для коллекторной цепи каскада:

$$E_K = U_{K\bar{I}} + I_{K\bar{I}}(R_K + R_{\vartheta})$$

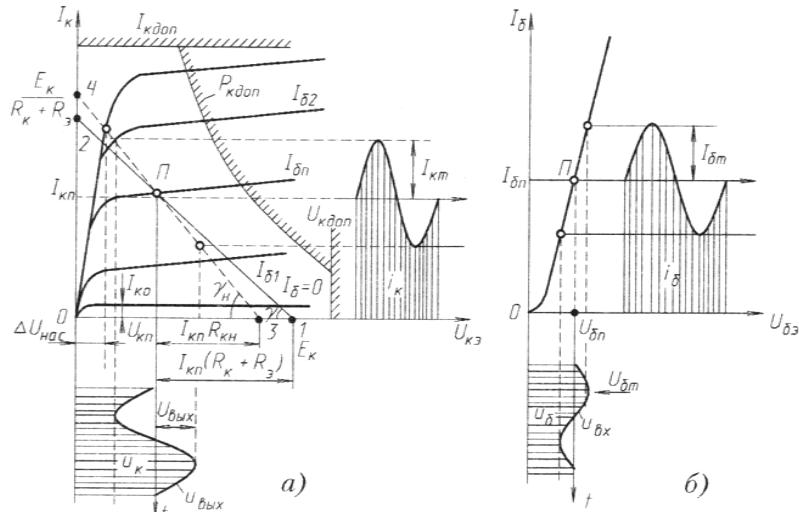


Рис. 7. Графический анализ работы каскада с ОЭ с помощью выходных (а) и входных (б) характеристик

Данную линию можно провести из точки  $E_K$  под углом  $\gamma=\text{arcctg}(R_K + R_s)$ , на практике же ее строят по двум точкам, характеризующим режимы *холостого хода* (точка 1) и *короткого замыкания* (точка 2) в коллекторной цепи транзистора. Для точки 1: ток и напряжение холостого хода  $I_{KX}=0, U_{KX}=E_K$ ; для точки 2: напряжение и ток короткого замыкания  $U_{K3}=0, I_{K3}=E_K/(R_K + R_s)$ .

При расчетах любые значения тока  $I_{КП}$  и напряжения  $U_{КП}$  определяются точками пересечения (*рабочими точками*) выходных характеристик с линией нагрузки по постоянному току. Одна из этих точек, полученная для заданного тока базы покоя  $I_{БП}$ , называется точкой покоя и обозначается буквой П (в некоторых источниках А или О). Используя координаты точки покоя П, можно определить ток коллектора покоя  $I_{КП}$ , напряжение коллектора покоя  $U_{КП}$  и падение напряжения на резисторе  $R_K$ , равное  $U_{RK}=I_{КП}R_K$ . Отметим, что транзистор работает в этом случае в активном режиме.

Для определения параметров выходного сигнала в динамическом режиме усиления (с подключенными входным сигналом и нагрузкой) используют линию нагрузки по переменному току (динамическую линию нагрузки). Если учесть, что сопротивление источника питания  $E_K$  и конденсатора  $C_2$  по переменному току малы, то сопротивление нагрузки по переменному току будет определяться параллельно включенными резисторами  $R_K$  и  $R_H$ :

$$R_{\text{KH}} = \frac{R_{\text{K}} R_{\text{H}}}{R_{\text{K}} + R_{\text{H}}}$$

Поскольку в режиме усиления входного сигнала токи и напряжения транзистора состоят из суммы постоянных и переменных составляющих, то линия нагрузки по переменному току тоже пройдет через точку покоя П. И поскольку  $R_{KH} < R_K$ , то линия будет находиться под углом  $\gamma_H = \arccos \frac{R_K}{R_{KH}}$ , большим, чем угол  $\gamma$ . Для ее построения на оси абсцисс отмечают точку 3, где формально напряжение равно сумме  $U_{KП} + I_{KП}R_{KH}$ , и через нее и точку П проводят прямую (пунктирная линия 3-4 на рис. 7, а).

С целью упрощения расчетов принцип действия каскада с ОЭ рассмотрим при отключенной нагрузке  $R_H$  (*режим холостого хода по переменному току*). При подаче на вход каскада переменного напряжения  $u_{ex}$  переменный ток базы  $i_B$  будет изменяться в соответствии с входной характеристикой (рис. 7, б). Одновременно с этим и по такому же закону станет менять свои значения переменный ток коллектора. Так, например, при увеличении амплитуды входного напряжения возрастает ток базы  $i_B$ . Поскольку ток коллектора  $i_K=h_{21}i_B$  ( $h_{21}$  составляет 50...75), то он тоже возрастет. В результате увеличивается падение переменного напряжения на резисторе  $R_K$  (ведь  $U_{RK}=i_KR_K$ ), а переменное напряжение на коллекторе  $u_{KЭ}=u_{вых}=E_K-i_KR_K$  уменьшается. При уменьшении же входного напряжения картина меняется на обратную. Из проведенного анализа следует, что каскад с ОЭ наряду с усилением мощности изменяет фазу входного сигнала на 180°.

Точно таким же образом работает схема и при подключении нагрузки  $R_H$ , однако переменный коллекторный ток при этом распределяется между резисторами  $R_K$  и  $R_H$ , что естественно снижает усиление.

При использовании каскада с ОЭ для усиления мощности необходимо учитывать параметры *предельно допустимых режимов* работы транзистора. Таких параметров три и они строятся на выходных характеристиках. Кривая допустимой мощности рассеяния строится по формуле  $P_{к.доп}=U_{кЭ}I_K$  и представляет собой гиперболу, а линии допустимых коллекторного тока  $I_{к.доп}$  и напряжения коллектор-эмиттера  $U_{к.доп}$  – прямые, параллельные осям координат.

В целях исключения искажений формы выходного сигнала необходимо обеспечить такой режим работы транзистора, чтобы рабочая точка, перемещаясь по линии нагрузки, не выходила за пределы *напряжения насыщения* ( $\Delta U_{нас}=0,3\dots0,7В$ ).

#### Усилительный каскад с ОЭ:

- позволяет получить наиболее высокий коэффициент усиления по напряжению (десятки единиц) и большой коэффициент усиления по току (десятки единиц);
- имеет невысокое входное (несколько сотен ом – десятков килоом) и относительно большое входное сопротивления (от нескольких до сотен килоом);
- имеет более узкий диапазон частот, в котором обеспечивается равномерное усиление, по сравнению с усилительным каскадом с ОБ;
- вносит фазовый сдвиг 180° в диапазоне средних (рабочих) частот.

#### Усилительный каскад с общей базой (ОБ)

Входной усиливаемый сигнал в схеме усилительного каскада с ОБ подключен между эмиттером и базой, причем последняя по переменному току соединена с корпусом через конденсатор  $C_B$ . Назначение резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_K$  и конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  такое же, как и в каскаде с ОЭ.

Усилительный каскад с ОБ (рис. 8) не инвертирует фазу входного сигнала. Воздействие, например, отрицательной полуволны входного напряжения приводит к увеличению коллекторного тока и падению напряжения на резисторе  $R_K$ . В результате коллекторное (входное) напряжение будет уменьшаться. При воздействии положительной полуволны входного напряжения картина меняется на обратную. Транзисторный каскад с ОБ имеет примерно такой же коэффициент усиления по напряжению, как и каскад с ОЭ, но коэффициент усиления по току меньше единицы, так как входным является эмиттерный, а выходным – коллекторный ток.

#### Усилительный каскад с ОБ характеризуется:

- малыми нелинейными искажениями;
- хорошими частотными и переходными характеристиками;
- низким входным (десятки ом) и высоким выходным (единицы - десятки мегаом) сопротивлениями;
- коэффициентом усиления по току меньшим единицы ( $K=0,8\dots0,9$ );
- коэффициентом усиления по напряжению, зависящим от сопротивления нагрузки.

Каскад с ОБ находит широкое применение в усилителях и генераторах диапазонов дециметровых и сантиметровых волн. Это связано с тем, что при включении транзистора по схеме с ОБ его предельная частота усиления в  $(h_{21}+1)$  раз больше, чем в схеме с ОЭ. Следует отметить, что с повышением частоты входного сигнала до СВЧ диапазона коэффициент усиления транзистора уменьшается.

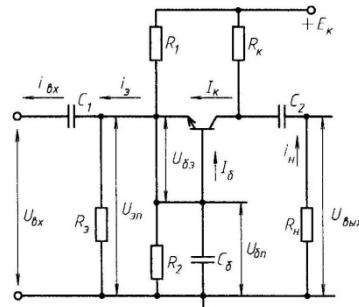


Рис. 8. Усилительный каскад с ОБ

### Усилительный каскад с общим коллектором (ОК)

Коллектор транзистора в схеме усилительного каскада с ОК по переменному току заземлен (т.е. соединен с корпусом) через источник питания  $E_K$  (рис. 9). При этом входное напряжение подключено между базой и коллектором, а выходное – снимается непосредственно с эмиттера транзистора.

Режим работы усилительного каскада с ОК по постоянному току определяется резистором  $R_3$ . Делитель напряжения  $R_1, R_2$  и разделительные конденсаторы  $C_1, C_2$  выполняют те же функции, что и в каскаде с ОЭ. Согласно принципу действия каскада с ОК, амплитуда выходного напряжения меньше амплитуды входного, поскольку они связаны соотношением  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{БЭ}}$ . Поэтому коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{БЭ}}}{U_{\text{вх}}} = 1 - \frac{U_{\text{БЭ}}}{U_{\text{вх}}}$$

Как правило,  $U_{\text{БЭ}} \ll U_{\text{вх}}$ , следовательно,  $K_U \approx 1$ , а  $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}$ .

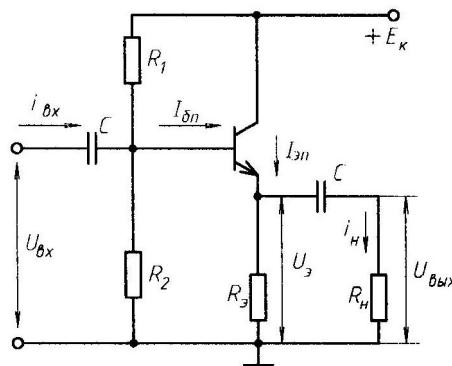


Рис. 9. Усилительный каскад с ОК

Выходное напряжение в каскаде с ОК совпадает с входным по фазе. Так, например, при поступлении положительного приращения входного напряжения ток базы увеличивается, вызывая возрастание токов коллектора и эмиттера. Это приводит к увеличению падения переменного напряжения на сопротивлении  $R_H$ , с которого снимается выходное напряжение. При подаче же отрицательного приращения входного напряжения выходное напряжение также получит отрицательное приращение.

Таким образом, выходной сигнал повторяет входной и по амплитуде и по фазе, поэтому усилительный каскад с ОК называют *эмиттерным повторителем*.

Коэффициент усиления по току эмиттерного повторителя почти такой же, как и у каскада с ОЭ:

$$K_I = \frac{I_H}{I_{\text{вх}}} \approx \frac{I_{\mathfrak{E}}}{I_B} \approx h_{21} + 1$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\mathfrak{B}\mathfrak{E}} - U_{\text{вых}}}{I_B} = h_{11} + (h_{21} + 1)R_{\mathfrak{E}\mathfrak{H}}$$

Выходное сопротивление при  $h_{21} \gg 1$ :

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_H} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\mathfrak{E}}} = \frac{h_{11}}{h_{21} + 1} \approx \frac{h_{11}}{h_{21}}$$

3. Операционные усилители (ОУ), эквивалентная схема, типовые серии, параметры.

Операционными усилителями (ОУ) называют высококачественные усилители постоянного тока (УПТ), предназначенные для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схеме с отрицательной обратной связью. При этом под аналоговой величиной подразумевается непрерывно изменяющееся напряжение или ток.

История названия операционного усилителя связана с тем, что подобные усилители постоянного тока использовались в аналоговой вычислительной технике для реализации различных математических операций, например суммирования, интегрирования и др.

В настоящее время ОУ – усилитель постоянного тока с полосой пропускания в несколько мегагерц с непосредственной связью между каскадами (т. е. без разделительных конденсаторов), с большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями, а также с низким уровнем шума при хорошей температурной стабильности, способный устойчиво работать при замкнутой цепи ОС.

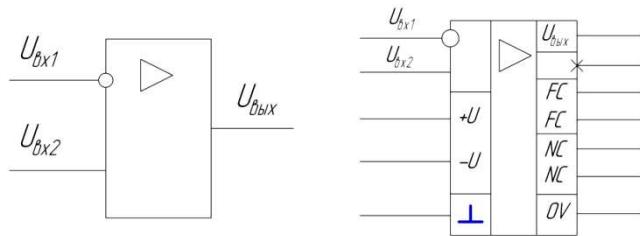
Входной каскад устройства выполняется в виде дифференциального усилителя, поэтому он имеет два входа и реагирует на разность приложенных к ним напряжений, т.е. на дифференциальный сигнал.

Современный ОУ содержит значительное число компонентов, в частности, несколько десятков транзисторов, находящихся в миниатюрном кремниевом кристалле. Все соединения между компонентами осуществляются с помощью литографической техники в процессе производства, что резко снижает вероятность повреждения внутренних соединений по сравнению с выполненными пайкой.

По габаритным размерам и стоимости ОУ мало отличаются от отдельно взятого транзистора. Реализация различных устройств с применением ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах, одновременно получается выигрыш в габаритных размерах и массе. Благодаря своим многосторонним возможностям ОУ вытесняет устройства на дискретных транзисторах и становится базовым (унифицированным) узлом в аналоговой схемотехнике.

Условные обозначения ОУ приведены на рис. 10.

Показанный усилитель имеет один выходной вывод (показывается справа) и два входных (изображается с левой стороны). Знак  $\triangleright$  характеризует усиление. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно выходного напряжения, называется *инвертирующим* и обозначается знаком инверсии  $\bigcirc$ , а вход, напряжение на котором совпадает по фазе с выходным напряжением, – *неинвертирующим*. Второй вывод, общий для обоих входов и выхода, часто не показывается. Это общая информационная шина, которая на принципиальных схемах иногда показывается в виде  $\perp$ . Для облегчения понимания назначения выводов и повышения информативности допускается введение одного или двух дополнительных полей с обеих сторон от основного поля, в которых указываются метки, характеризующие функции вывода (рис. 10, б).



а/

б/

Рис. 10. Условное обозначение ОУ: а – без дополнительного поля; б – с дополнительными полями; NC – выводы балансировки; FC – выводы частотной коррекции; U – выводы напряжения питания; х – вывод не несущей логической информации; OV – общий информационный вывод;  $\perp$  – корпус.

Также вместе с обозначением, приведенным на рис. 10, используется и условное обозначение, приведенное на рис. 11.

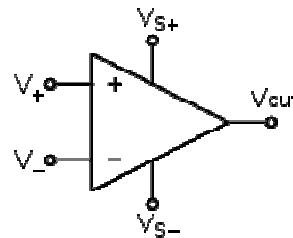


Рис. 11. Обозначение ОУ на схемах:  $V_{S+}$ ,  $V_{S-}$  – выводы питания;  $V_+$ ,  $V_-$  – неинвертирующий и инвертирующий входы соответственно;  $V_{out}$  – выход ОУ

В качестве источника питания ОУ используют двухполярный источник напряжения ( $+U$ ;  $-U$ ). Средний вывод этого источника, как правило, является общей шиной для входных и выходных сигналов и в большинстве случаев не подключается к ОУ. В реальных ОУ напряжение питания лежит в диапазоне  $\pm 3 \dots \pm 18$  В. Использование источника питания со средней точкой предполагает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжения ОУ.

Функциональная схема трехкаскадного ОУ включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усиления. Анализ электрических параметров ОУ показывает, что их практическая реализация предполагает использование в качестве входного каскада ОУ дифференциального усилительного каскада, что позволяет максимально уменьшить величину дрейфа усилителя, получить достаточно высокое усиление, обеспечить получение максимально высокого входного сопротивления и максимально подавить действующие на входе синфазные составляющие, обусловленные изменением температуры окружающей среды, изменением напряжения питания, старением элементов и т.п.

Согласующий каскад служит для согласования выходного сигнала дифференциального усилителя с выходным каскадом ОУ, обеспечивая необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование фаз сигналов.

Выходной каскад, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

На рис. 12 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема ОУ.

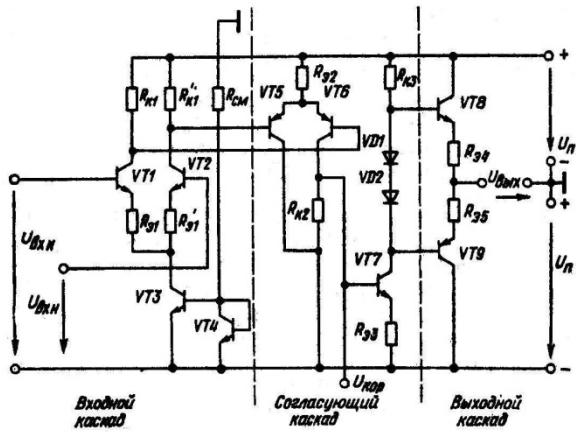


Рис. 12. Упрощенная схема трехкаскадного ОУ

Первый каскад устройства выполнен на дифференциальном усилителе (транзисторы VT1 и VT2), в котором для задания эмиттерного тока транзисторов использована схема «токового зеркала» на транзисторах VT3 и VT4. Для уменьшения мощности, рассеиваемой в усилителе, резистор смещения  $R_{cm}$  «токового зеркала» питается от одного источника питания ОУ. Резисторы  $R_{91}$  и  $R_{91}'$  обеспечивая введение в цепь каждого транзистора дифференциального каскада местной последовательной ООС по току нагрузки, увеличивают входное сопротивление усилителя.

Согласующий каскад усилителя также выполнен с использованием дифференциального каскада (транзисторы VT5 и VT6), на выходе которого подключен каскад по схеме с общим эмиттером (VT7). Особенностью этого каскада являются использование в дифференциальном усилителе транзисторов, проводимость которых противоположна проводимости транзисторов входного каскада, и применение несимметричного выхода. Вследствие этого нагрузочный резистор в коллекторной цепи транзистора VT6 отсутствует. Режим по постоянному току в каскаде на транзисторе VT7 стабилизируется введением цепи последовательной ООС по току нагрузки. Резистор  $R_{k3}$  является нагрузочным для каскада на транзисторе VT7.

В выходном каскаде усилителя использована схема двухтактного усилителя мощности, работающего в классе АВ. Необходимое для этого начальное смещение задается диодами VD1 и VD2. Эти же диоды обеспечивают температурную стабилизацию режима покоя выходного усилителя. Эмиттерные резисторы  $R_{94}$  и  $R_{95}$  обеспечивают согласование параметров комплементарной пары транзисторов выходного каскада ОУ и ограничивают его максимальный выходной ток.

#### Основные параметры операционных усилителей

Операционный усилитель является сложным электронным устройством, правильное применение которого зависит от понимания особенностей его работы и знания основных требований, которые он предъявляет к схемам разрабатываемого электронного устройства.

*Коэффициент усиления по напряжению*  $K_{U0}$  характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал

$$K_{U0} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$$

Типовое значение коэффициента усиления ОУ составляет до  $10^5 \dots 10^6$  или 100...120 дБ.

*Входное напряжение смещения* – это потенциал на выходе усилителя при нулевом входном сигнале, который поделен на коэффициент усиления. Данный параметр показывает, какой источник напряжения необходимо подключить к входу ОУ для того, чтобы на выходе получить  $U_{\text{вых}} = 0$ .

*Входной ток  $I_{ex}$*  (входной ток смещения) – ток, протекающий во входных выводах ОУ и необходимый для обеспечения требуемого режима работы его транзисторов по постоянному току. Типовое значение этого тока единицы микроампер – сотни наноампер.

*Разность входных токов  $\Delta I_{ex}$*  (ток сдвига) – возникает вследствие неодинаковости коэффициентов передачи тока  $h_{213}$  транзисторов входного каскада ОУ.

*Входное сопротивление  $R_{ex}$* . Различают дифференциальное входное сопротивление и  $R_{bx}$  диф и синфазное входное сопротивление  $R_{bx}$  син.  $R_{bx}$  диф определяется как сопротивление между входами усилителя, а  $R_{bx}$  син – как сопротивление между объединенными входными выводами и нулевой шиной. Типовое значение входного сопротивления – сотни килоом.

*Выходное сопротивление  $R_{vых}$*  – сопротивление усилителя, рассматриваемого как эквивалентный генератор. Типовое значение выходного сопротивления – сотни ом.

*Коэффициент подавления синфазного сигнала  $K_{n\,cf}$*  определяет степень подавления (ослабления) синфазной составляющей входного сигнала. Его типовое значение – 50...70 дБ.

*Максимальная скорость изменения выходного напряжения* характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах; измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы. Типовое значение скорости изменения выходного напряжения – единицы вольт/микросекунд.

*Частота единичного усиления  $F_{max}$*  – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице (0 дБ). Обычно эта частота не превышает нескольких мегагерц.

*Время установления выходного напряжения  $t_{yst}$*  – это время, за которое практически заканчивается переходный процесс. Оно обычно измеряется при максимальных значениях выходного напряжения и нагрузки и оценивается как промежуток времени  $\Delta t$ , прошедший с момента первого достижения уровня 0,1 до момента первого достижения уровня 0,9 установленногося значения выходного сигнала при подаче на вход импульса напряжения прямоугольной формы.

Кроме перечисленных обычно задаются и предельно допустимые значения основных эксплуатационных параметров: максимально допустимое напряжение питания; максимально допустимый выходной ток; диапазон рабочих температур; максимально допустимая рассеиваемая мощность; максимально допустимое входное синфазное напряжение и др. Большинство перечисленных параметров сильно зависят от условий эксплуатации. Эти зависимости обычно задаются графически.

В настоящее время ОУ находят широкое применение при разработке различных аналоговых и импульсных электронных устройств. Объясняется это тем, что, введя в цепи прямой и обратной передачи его сигналов различные линейные и нелинейные цепи, можно направленно синтезировать узлы с требуемым алгоритмом преобразования входного сигнала.

#### 4. Примеры применения ОУ.

##### Повторитель напряжения

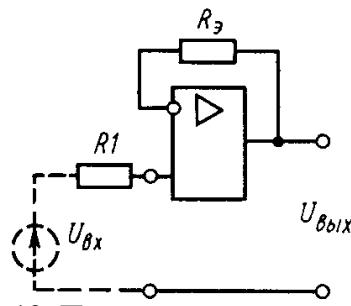


Рис. 13. Повторитель напряжения

Это усилитель, охваченный цепью последовательной ООС по выходному напряжению с коэффициентом передачи  $b_{oc}=1$ , т.е. 100%-ой ООС.

При таком использовании ОУ в его схеме действует 100%-я ООС по напряжению, следовательно, усиления по напряжению в схеме не будет; очень большое входное сопротивление, что позволяет не нагружать входной источник; усиление по току хорошее, так как при таком большом входном сопротивлении в ОУ  $I_{bx}=0$ ; происходит полная развязка нагрузки и источника сигнала. Находят практическое применение в качестве буферных и согласующих элементов.

### Неинвертирующий усилитель

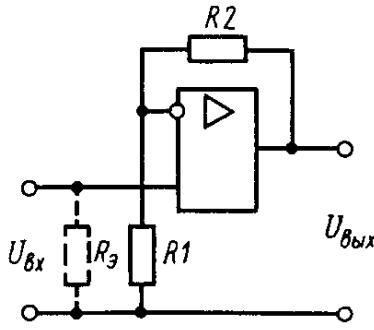


Рис. 14. Неинвертирующий усилитель

Схема повторителя не инвертировала входной сигнал. Однако вследствие единичной ООС ее коэффициент передачи равнялся единице. Для получения коэффициента передачи, превышающего единицу в схеме повторителя напряжения необходимо обеспечить  $b_{oc}<1$ . Для этого в цепь ООС необходимо ввести делитель напряжения. Тогда для получившейся схемы имеем: коэффициент передачи неинвертирующего усилителя обратно пропорционален коэффициенту передачи цепи ООС; при любых сопротивлениях резисторов в цепи ООС коэффициент передачи неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы. В данном усилителе фазы входного и выходного напряжений совпадают.

Коэффициент передачи делителя в цепи ООС определяется из выражения

$$b_{oc} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Коэффициент усиления

$$K_U \text{ OOC} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{b_{oc}}$$

### Инвертирующий усилитель

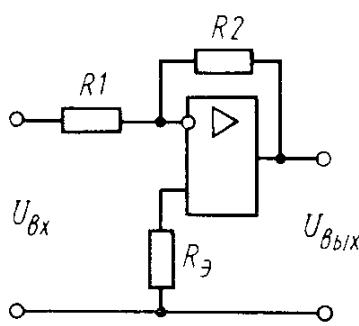


Рис. 15. Инвертирующий усилитель

В схемах повторителя и неинвертирующего усилителя сигнал ООС и входной сигнал подавались на различные входы ОУ. Для получения инвертирующего усилителя входной сигнал и сигнал обратной связи должны подаваться на один и тот же

инвертирующий вход, т.е. цепь ООС превращается из последовательной в параллельную. При этом неинвертирующий вход, как правило, соединяют с общей шиной.

Для данного усилителя в случае нулевого выходного сопротивления источника входного сигнала коэффициент передачи цепи ООС также определяется по выражению

$$b_{OC} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Однако в отличие от неинвертирующего усилителя входной сигнал попадает на вход ОУ не непосредственно, а через делитель напряжения, образованный этими же резисторами.

Коэффициент усиления

$$K_{U\text{ OOC}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Для инвертирующего усилителя фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на  $180^\circ$ .

**Измерительный усилитель** (иначе *инструментальный усилитель*, *электрометрический вычитатель*) — это тип дифференциального усилителя с характеристиками, подходящими для использования в измерениях и тестирующем оборудовании. Он используется для измерения разности потенциалов, т.е. он является разновидностью дифференциального усилителя. Особенность его заключается в значительном ослаблении синфазного сигнала и, следовательно, в высокой степени симметричности входа, а также способности усиливать слабый дифференциальный сигнал преимущественно в форме переменного напряжения. Такой усилитель обладает высоким входным и низким выходным сопротивлением. Измерительные усилители хорошо сопрягаются с мостовыми схемами, например, с температурно-зависимым элементом, применяемым для измерения температуры, и другими сложными видами источников сигнала.

Рассматриваемый усилитель обычно содержит три ОУ и семь резисторов, из них резистор  $R_2$  предназначен для изменения коэффициента усиления. С помощью резистора  $R_3$  осуществляется начальная подстройка с целью сведения к нулю синфазного сигнала с уровнем около долей вольта, подаваемого на соединенные вместе выводы 1, 2 относительно общего провода.

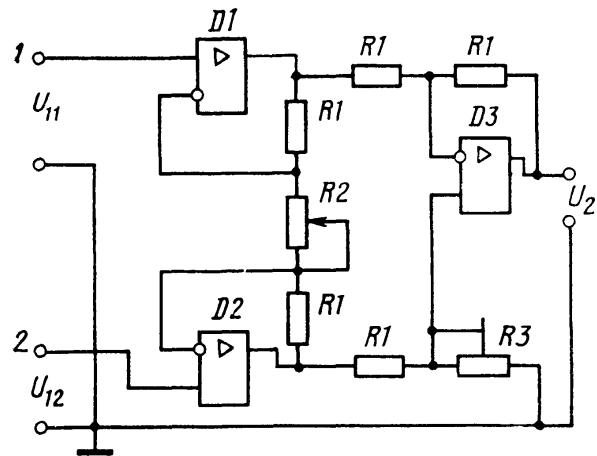


Рис. 16. Схема измерительного усилителя

## 1.4 Лекция №4 (2 часа).

### Тема: «Основы цифровой техники. Микропроцессорные средства»

#### 1.4.1 Вопросы лекции:

1. Цифровой сигнал. Системы счисления. Логические функции и логические элементы. Основные теоремы алгебры логики.
2. Триггеры в интегральном исполнении: R-S, D, T, J-K. Счетчики и распределители импульсов, мультиплексоры и демультиплексоры.
3. Микропроцессорные средства. Системы счисления и цифровые коды. Формат данных. Общие термины и определения микропроцессорных систем.
4. Микроконтроллеры.

#### 1.4.2 Краткое содержание вопросов

*1. Цифровой сигнал. Системы счисления. Логические функции и логические элементы. Основные теоремы алгебры логики.*

Цифровая электроника в настоящее время все более и более вытесняет традиционную аналоговую. Ведущие фирмы, производящие самую разную электронную аппаратуру, все чаще заявляют о полном переходе на цифровую технологию. Причем это относится как к бытовой технике (аудио-, видеоаппаратура, средства связи), так и к профессиональной технике (измерительная, управляющая аппаратура). Ставшие уже привычными персональные компьютеры также полностью реализованы на основе цифровой технологии.

**Интегральная микросхема** — микроэлектронное устройство — электронная схема произвольной сложности, изготовленная на полупроводниковом кристалле (или плёнке) и помещённая в неразборный корпус, или без такового, в случае вхождения в состав **микросборки**.

**Аналоговый сигнал** — это сигнал, который может принимать любые значения в определенных пределах (например, напряжение может плавно меняться в пределах от нуля до десяти вольт). Устройства, работающие только с аналоговыми сигналами, называются аналоговыми устройствами.

**Цифровой сигнал** — это сигнал, который может принимать только два значения. Причем разрешены некоторые отклонения от этих значений. Например, напряжение может принимать два значения: от 0 до 0,5 В (уровень нуля) или от 2,5 до 5 В (уровень единицы). Устройства, работающие исключительно с цифровыми сигналами, называются цифровыми устройствами.

В отличие от аналоговых, цифровые сигналы, имеющие всего два разрешенных значения, защищены от действия шумов, наводок и помех гораздо лучше. Небольшие отклонения от разрешенных состояний никак не искажают цифровой сигнал, так как всегда существуют зоны допустимых отклонений. Именно поэтому цифровые сигналы допускают гораздо более сложную и многоступенчатую обработку, гораздо более длительное хранение без потерь и гораздо более качественную передачу, чем аналоговые. К тому же поведение цифровых устройств всегда можно абсолютно точно рассчитать и предсказать. Цифровые устройства гораздо меньше подвержены старению, так как небольшое изменение их параметров никак не отражается на их функционировании. Кроме того, цифровые устройства проще проектировать и отлаживать.

Все цифровые устройства строятся из логических микросхем, каждая из которых обязательно имеет следующие выводы:

- выводы питания: общий (или «земля») и напряжения питания (в большинстве случаев +5 В или +3,3 В), которые на схемах обычно не показываются;

- выводы для входных сигналов (или «входы»), на которые поступают внешние цифровые сигналы;
- выводы для выходных сигналов (или «выходы»), на которые выдаются цифровые сигналы из самой микросхемы.

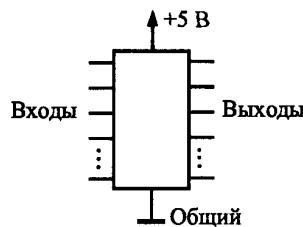


Рис. 1. Цифровая микросхема

Цифровые микросхемы или микросборки, их элементы или компоненты обозначаются на принципиальных схемах УГО в соответствии с ГОСТ 2.743-91. УГО микросхемы имеет форму прямоугольника, к которому подводят линии выводов. Оно может содержать три поля: основное и два дополнительных.

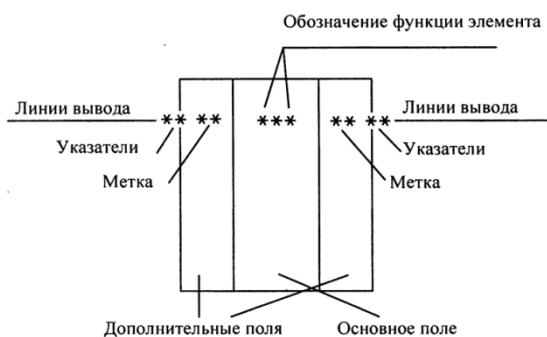


Рис. 2. УГО цифровых микросхем

Каждая микросхема преобразует тем или иным способом последовательность входных сигналов в последовательность выходных сигналов. Способ преобразования чаще всего описывается или в виде таблицы (так называемой *таблице истинности*) или в виде временных диаграмм, то есть графиков зависимости от времени всех сигналов.

Все цифровые микросхемы работают с логическими сигналами, имеющими два разрешенных уровня напряжения. Один из этих уровней называется *уровнем логической единицы* (или единичным уровнем), а другой - *уровнем логического нуля* (или нулевым уровнем). Чаще всего логическому нулю соответствует низкий уровень напряжения, а логической единице – высокий уровень напряжения. В этом случае говорят, что принята *«положительная логика»*. Однако при передаче сигналов на большие расстояния и в системных шинах микропроцессорных систем порой используют и обратное представление, когда логическому нулю соответствует высокий уровень напряжения, а логической единице – низкий уровень. В этом случае говорят о *«отрицательной логике»*.

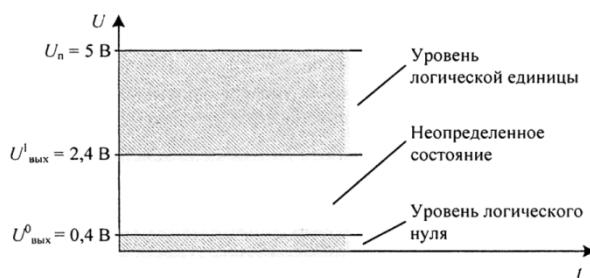


Рис. 3. Уровни логических сигналов на выходе цифровых ТТЛ-микросхем

Логическими элементами (ЛЭ) называются функциональные устройства, с помощью которых реализуются элементарные логические функции. Они обычно используются для построения сложных преобразователей цифровых сигналов комбинационного типа. В комбинационных устройствах отсутствует внутренняя память. Сигналы на их выходах в любой момент однозначно определяются сочетаниями сигналов на входах и не зависят от предыдущих состояний системы.

Практически все цифровые устройства без памяти (комбинаторные устройства) могут быть построены на основе трех простейших логических элементов. Все более сложные системы реализуются из этих простейших логических элементов как из кубиков. Остановимся на описании простейших логических элементов.

Работа всех цифровых устройств основана на *алгебре логики*. В ее основе лежат функции логического отрицания, логического сложения (дизъюнкция) и логического умножения (конъюнкция). Аксиомы алгебры логики:

1.  $\bar{\bar{x}} = x$
2.  $x + \bar{x} = 1$
3.  $x + 1 = 1;$
4.  $x + x = x;$
5.  $x + 0 = x;$
6.  $x * \bar{x} = 0$
7.  $x * x = x;$
8.  $x * 0 = 0;$
9.  $x * 1 = x;$

### Функция «не», инвертор

Простейшим логическим инвертором, который просто входит в таблицу истинности. Его функция записывается в виде:

$$F = \overline{X}$$

$$\begin{array}{llll} \overline{0} = 1 & 0 + 0 = 0 & 0 \cdot 0 = 0 \\ \overline{1} = 0 & 0 + 1 = 1 & 0 \cdot 1 = 0 \\ & 1 + 0 = 1 & 1 \cdot 0 = 0 \\ & 1 + 1 = 1 & 1 \cdot 1 = 1 \end{array}$$

элементом является изменяет значение противоположное значение. следующем виде:

где черта над входным значением обозначает изменение его на противоположное. То же самое действие можно записать при помощи таблицы истинности. Так как вход у этого логического элемента лишь один, его таблица истинности состоит только из двух строк.

X	F
0	1
1	0

Таблица истинности функции «не» (инвертор)

В качестве инвертора в простейшем случае можно использовать обычный усилитель с транзистором, включенном по схеме с общим эмиттером или истоком. Схема усилителя, выполненная на биполярном транзисторе n-p-n и позволяющая реализовать функцию логического инвертирования, приведена на рис. 4.

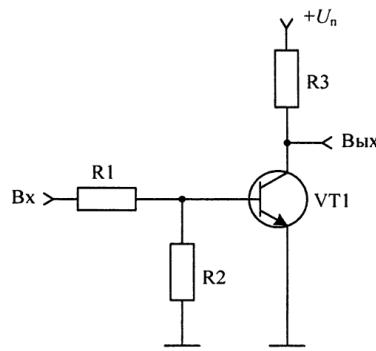


Рис. 4. Схема, позволяющая реализовать функцию логического инвертирования

Для того чтобы особенности включения транзисторов не затеняли выполняемую функцию, для цифровых микросхем введены специальные условно-графические обозначения. УГО инвертора приведено на рис. 5.

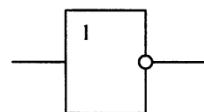


Рис. 5. УГО логического инвертора

В одном корпусе микросхемы обычно бывает шесть инверторов. Отечественное обозначение микросхем инверторов – ЛН. Примеры: КР1533ЛН1 (SN74ALS04).

Две основные области применения инверторов – это изменение полярности сигнала и изменение полярности фронта сигнала. То есть из положительного входного сигнала инвертор делает отрицательный выходной сигнал и наоборот, а из положительного фронта входного сигнала – отрицательный фронт выходного сигнала и наоборот. Еще одно важное применение инвертора – буферизация сигнала (с инверсией), то есть увеличение нагрузочной способности сигнала. Это бывает нужно в том случае, когда какой-то сигнал надо подать на много входов, а выходной ток источника сигнала недостаточен.



Рис. 6. Инверсия полярности сигнала и инверсия полярности фронта сигнала

### Функция «и», логическое умножение

Следующим простейшим логическим элементом является схема, реализующая операцию логического умножения «и»:

$$F = X \wedge Y$$

Где символ  $\wedge$  обозначает функцию логического умножения (конъюнкцию). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

$$F = X \wedge Y = X \cdot Y = X \& Y$$

То же самое действие можно записать при помощи таблицы истинности. В формуле, приведенной выше, использовано два аргумента. Поэтому элемент, выполняющий эту функцию, имеет два входа. Такой элемент обозначается «2И». Для элемента «2И» таблица истинности будет состоять из четырех строк.

X	Y	F
---	---	---

0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Как видно из приведенной таблицы истинности, активный сигнал на выходе этого логического элемента появляется только тогда, когда обоих входах будут присутствовать логические единицы.

УГО схемы, выполняющей логическую функцию «2И» изображено на рис. 7.

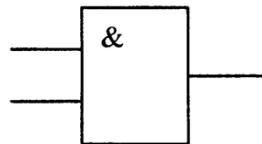


Рис. 7. УГО элемента, выполняющего функцию логического умножения

Проще всего понять, как работает такой элемент при помощи схемы, построенной на идеализированных ключах с электронным управлением, как это показано на рис. 7.8. В приведенной схеме ток будет протекать только тогда, когда оба ключа будут замкнуты, а значит, единичный уровень на выходе схемы появится только при подаче на ее вход двух логических единиц.

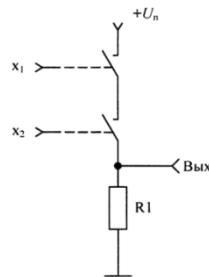


Рис. 8. Эквивалентная схема, реализующая логическую функцию «2И»

### Функция «или», логическое сложение

Следующим простейшим элементом является схема, реализующая операцию логического сложения «или»:

$$F = X \vee Y$$

Где символ  $\vee$  обозначает функцию логического сложения (дизъюнкция). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

$$F = X \vee Y = X + Y = X | Y$$

Таблица истинности для данного элемента:

X	Y	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Эквивалентная схема, реализующая таблицу истинности для данного элемента, приведена на рис. 9. Как видно из приведенной схемы, уровень логической единицы появится на ее выходе, как только будет замкнут любой из ключей.

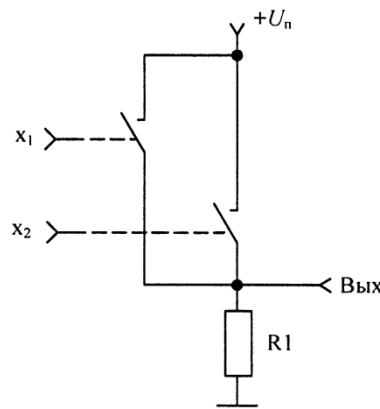


Рис. 9. Эквивалентная схема, реализующая логическую функцию «2ИЛИ»

УГО схемы, выполняющей логическую функцию «2ИЛИ» изображено на рис. 10.

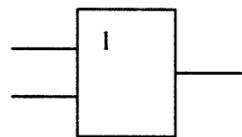


Рис. 10. УГО элемента, выполняющего функцию логического сложения

Инверсию логической суммы двух величин называют *стрелкой Пирса*:

$$F = \overline{X + Y} \text{ или } F = X \downarrow Y$$

а логического произведения – *штрихом Шеффера*:

$$F = \overline{X \cdot Y} \text{ или } F = X / Y$$

2. Триггеры в интегральном исполнении: R-S, D, T, J-K. Счетчики и распределители импульсов, мультиплексоры и демультиплексоры.

**Мультиплексором** называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через MUX, а также через MS. Функционально мультиплексор можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких входов (их называют информационными) к одному выходу устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы и разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов  $n$  и числом адресных входов  $m$  существует соотношение  $n=2^m$ , то такой мультиплексор называют полным. Если  $n < 2^m$ , то мультиплексор называют неполным.

Рассмотрим функционирование двухходового мультиплексора (2→1), который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов  $X_1$ ,  $X_2$  и выхода  $Y$  приведено в таблице (рис. 11).

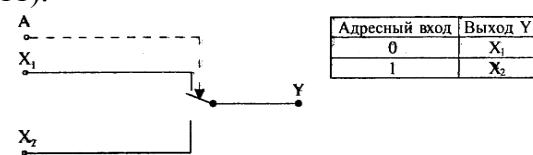


Рис. 11. Двухходовой мультиплексор

Исходя из таблицы, можно записать следующее уравнение:

$$Y = X_1 \cdot \overline{A} + X_2 \cdot A.$$

На рис. 12 показаны реализация такого устройства и его условное графическое обозначение. Основой данной схемы являются две схемы совпадения на элементах И, которые при логическом уровне «1» на одном из своих входов повторяют на выходе то, что есть на другом входе.

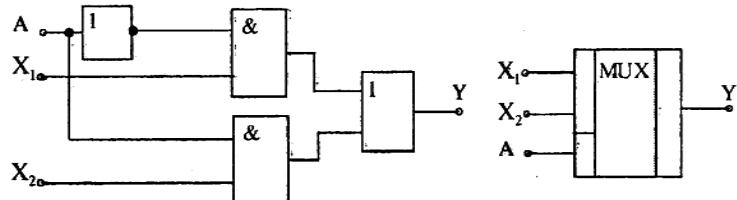


Рис. 12. Реализация двухходового мультиплексора на логических элементах И

Мультиплексоры являются универсальными логическими устройствами, на основе которых создают различные комбинационные и последовательностные схемы. Мультиплексоры могут использовать в делителях частоты, триггерных устройствах, сдвигающих устройствах, для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и др.

**Демультиплексором** называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультиплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультиплексоры обозначают через DMX или DMS.

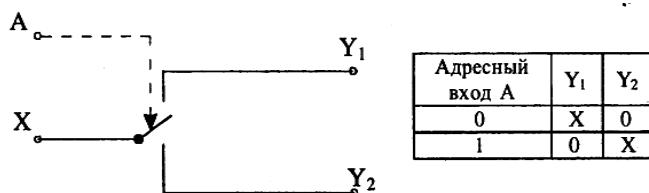


Рис. 13. Функциональная схема демультиплексора с двумя выходами

Если соотношение между числом выходов  $n$  и числом адресных входов  $m$  определяется равенством  $n=2^m$ , то такой демультиплексор называют полным, при  $n < 2^m$  демультиплексор является неполным.

Рассмотрим функционирование демультиплексора с двумя выходами, который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов приведено в таблице. Из этой таблицы следует:  $Y_1 = X \cdot \overline{A}$ ;  $Y_2 = X \cdot A$ , т.е. реализовать такое устройство можно так, как показано на рис. 7.19.

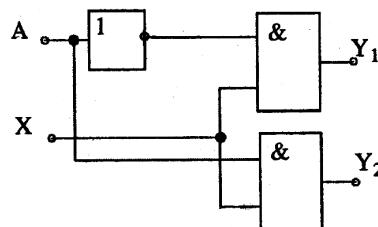


Рис. 14. Реализация демультиплексора с двумя выходами на логических элементах И

Функции демультиплексоров сходны с функциями дешифраторов. Дешифратор можно рассматривать как демультиплексор, у которого информационный вход поддерживает напряжение выходов в активном состоянии, а адресные входы выполняют роль входов дешифратора. Поэтому в обозначении как дешифраторов, так и демультиплексоров используются одинаковые буквы – ИД. Выпускают дешифраторы (демультиплексоры) К155ИД3, К531ИД7 и др.

*3. Микропроцессорные средства. Системы счисления и цифровые коды. Формат данных. Общие термины и определения микропроцессорных систем.*

**Система счисления** — символический метод записи чисел, представление чисел с помощью письменных знаков.

Система счисления:

- даёт представления множества чисел (целых и/или вещественных);
- даёт каждому числу уникальное представление (или, по крайней мере, стандартное представление);
- отражает алгебраическую и арифметическую структуру чисел.

Системы счисления подразделяются на *позиционные, непозиционные и смешанные*.

В позиционных системах счисления один и тот же числовой знак (цифра) в записи числа имеет различные значения в зависимости от того места (разряда), где он расположен. Изобретение позиционной нумерации, основанной на поместном значении цифр, приписывается шумерам и вавилонянам; развита была такая нумерация индусами и имела неоценимые последствия в истории человеческой цивилизации. К числу таких систем относится современная десятичная система счисления, возникновение которой связано со счётом на пальцах. В средневековой Европе она появилась через итальянских купцов, в свою очередь заимствовавших её у мусульман.

Под позиционной системой счисления обычно понимается  $b$ -ричная система счисления, которая определяется целым числом  $b > 1$ , называемым **основанием** системы счисления. Целое число без знака  $x$  в  $b$ -ричной системе счисления представляется в виде конечной линейной комбинации степеней числа  $b$ :

$$x = \sum_{k=0}^{n-1} a_k b^k$$

где  $a_k$  — это целые числа, называемые цифрами, удовлетворяющие неравенству  $0 \leq a_k \leq (b-1)$ .

Каждая степень  $b^k$  в такой записи называется весовым коэффициентом разряда. Старшинство разрядов и соответствующих им цифр определяется значением показателя  $k$  (номером разряда). Обычно, в ненулевых числах  $x$ , левые нули опускаются.

Если не возникает разночтений (например, когда все цифры представляются в виде уникальных письменных знаков), число  $x$  записывают в виде последовательности его  $b$ -ричных цифр, перечисляемых по убыванию старшинства разрядов слева направо:

$$x = a_{n-1}a_{n-2} \dots a_0.$$

Например, число *сто три* представляется в десятичной системе счисления в виде:

$$103 = 1 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0.$$

Наиболее употребляемыми в настоящее время позиционными системами являются:

- 1 — единичная (счёт на пальцах, зарубки, узелки «на память» и др.);
- 2 — двоичная (в дискретной математике, информатике, программировании);
- 3 — троичная;
- 8 — восьмеричная;
- 10 — десятичная (используется повсеместно);
- 12 — двенадцатеричная (счёт дюжинами);
- 13 — тринадцатеричная;
- 16 — шестнадцатеричная (используется в программировании, информатике);

- 60 — шестидесятеричная (единицы измерения времени, измерение углов и, в частности, координат, долготы и широты).

В позиционных системах чем больше основание системы, тем меньшее количество разрядов (то есть записываемых цифр) требуется при записи числа.

**Смешанная система счисления** является обобщением  $b$ -ричной системы счисления и также зачастую относится к позиционным системам счисления. Основанием смешанной системы счисления является возрастающая последовательность чисел  $\{b_k\}_{k=0}^{\infty}$ , и каждое число  $x$  в ней представляется как линейная комбинация:

$$x = \sum_{k=0}^{n-1} a_k b_k$$

где на коэффициенты  $a_k$ , называемые как и прежде *цифрами*, накладываются некоторые ограничения.

Записью числа  $x$  в смешанной системе счисления называется перечисление его цифр в порядке уменьшения индекса  $k$ , начиная с первого ненулевого.

В зависимости от вида  $b_k$  как функции от  $k$  смешанные системы счисления могут быть степенными, показательными и т. п. Когда  $b_k = b^k$  для некоторого  $b$ , смешанная система счисления совпадает с показательной  $b$ -ричной системой счисления.

Наиболее известным примером смешанной системы счисления является представление времени в виде количества суток, часов, минут и секунд. При этом величина « $d$  дней,  $h$  часов,  $m$  минут,  $s$  секунд» соответствует значению  $d \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 + h \cdot 60 \cdot 60 + m \cdot 60 + s$  секунд.

#### Факториальная система счисления

В **факториальной системе счисления** основаниями являются последовательность факториалов  $b_k = k!$ , и каждое натуральное число  $x$  представляется в виде:

$$x = \sum_{k=1}^n d_k k!$$

где  $0 \leq d_k \leq k$ .

Факториальная система счисления используется при декодировании перестановок списками инверсий: имея номер перестановки, можно воспроизвести её саму следующим образом: число, на единицу меньшее номера (нумерация начинается с нуля) записывается в факториальной системе счисления, при этом коэффициент при числе  $i!$  будет обозначать число инверсий для элемента  $i+1$  в том множестве, в котором производятся перестановки (число элементов меньших  $i+1$ , но стоящих правее его в искомой перестановке)

Пример: рассмотрим множество перестановок из 5 элементов, всего их  $5! = 120$  (от перестановки с номером 0 — (1,2,3,4,5) до перестановки с номером 119 — (5,4,3,2,1)), найдём 101-ую перестановку:  $100 = 4! * 4 + 3! * 0 + 2! * 2 + 1! * 0 = 96 + 4$ ; положим  $t_i$  — коэффициент при числе  $i!$ , тогда  $t_4 = 4$ ,  $t_3 = 0$ ,  $t_2 = 2$ ,  $t_1 = 0$ , тогда: число элементов меньших 5, но стоящих правее равно 4; число элементов меньших 4, но стоящих правее равно 0; число элементов меньших 3, но стоящих правее равно 2; число элементов меньших 2, но стоящих правее равно 0 (последний элемент в перестановке «ставится» на единственное оставшееся место) — таким образом, 101-я перестановка будет иметь вид: (5,3,1,2,4) Проверка данного метода может быть осуществлена путём непосредственного подсчёта инверсий для каждого элемента перестановки.

#### 4. Микроконтроллеры.

**Микроконтроллер** — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ или ПЗУ. По сути, это однокристальный компьютер, способный выполнять простые задачи.

С появлением однокристальных микро-ЭВМ связывают начало эры массового применения компьютерной автоматизации в области управления. По-видимому, это обстоятельство и определило термин «контроллер».

В связи со спадом отечественного производства и возросшим импортом техники, в том числе вычислительной, термин «микроконтроллер» (МК) вытеснил из употребления ранее использовавшийся термин «однокристальная микро-ЭВМ».

Первый патент на однокристальную микро-ЭВМ был выдан в 1971 году инженерам М. Кочрену и Г. Буну, сотрудникам американской Texas Instruments. Именно они предложили на одном кристалле разместить не только процессор, но и память с устройствами ввода-вывода.

При проектировании микроконтроллеров приходится соблюдать баланс между размерами и стоимостью с одной стороны и гибкостью и производительностью с другой. Для разных приложений оптимальное соотношение этих и других параметров может различаться очень сильно. Поэтому существует огромное количество типов микроконтроллеров, отличающихся архитектурой процессорного модуля, размером и типом встроенной памяти, набором периферийных устройств, типом корпуса и т. д. В отличие от обычных компьютерных микропроцессоров, в микроконтроллерах часто используется гарвардская архитектура памяти, то есть раздельное хранение данных и команд в ОЗУ и ПЗУ соответственно.

Кроме ОЗУ, микроконтроллер может иметь встроенную энергонезависимую память для хранения программы и данных. Во многих контроллерах вообще нет шин для подключения внешней памяти. Наиболее дешёвые типы памяти допускают лишь однократную запись. Такие устройства подходят для массового производства в тех случаях, когда программа контроллера не будет обновляться. Другие модификации контроллеров обладают возможностью многократной перезаписи энергонезависимой памяти.

Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

- универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод;
- различные интерфейсы ввода-вывода, такие как UART, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;
- аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
- компараторы;
- широтно-импульсные модуляторы;
- таймеры;
- контроллеры бесколлекторных двигателей;
- контроллеры дисплеев и клавиатур;
- радиочастотные приемники и передатчики;
- массивы встроенной флеш-памяти;
- встроенный тактовый генератор и сторожевой таймер;

Ограничения по цене и энергопотреблению сдерживают также рост тактовой частоты контроллеров. Хотя производители стремятся обеспечить работу своих изделий на высоких частотах, они, в то же время, предоставляют заказчикам выбор, выпуская модификации, рассчитанные на разные частоты и напряжения питания. Во многих моделях микроконтроллеров используется статическая память для ОЗУ и внутренних регистров. Это даёт контроллеру возможность работать на меньших частотах и даже не терять данные при полной остановке тактового генератора. Часто предусмотрены различные режимы энергосбережения, в которых отключается часть периферийных устройств и вычислительный модуль.

Использование в современном микроконтроллере достаточного мощного вычислительного устройства с широкими возможностями, построенного на одной микросхеме вместо целого набора, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость построенных на его базе устройств. Используются в управлении различными устройствами и их отдельными блоками:

- в вычислительной технике: материнские платы, контроллеры дисководов жестких и гибких дисков, CD и DVD;
- в электронике и разнообразных устройствах бытовой техники, в которой используется электронные системы управления — стиральных машинах, микроволновых печах, посудомоечных машинах, телефонах и современных приборах;

В промышленности:

- устройств промышленной автоматики — от программируемого реле и встраиваемых систем до ПЛК,
- систем управления станками

В то время как 8-разрядные процессоры общего назначения полностью вытеснены более производительными моделями, 8-разрядные микроконтроллеры продолжают широко использоваться. Это объясняется тем, что существует большое количество применений, в которых не требуется высокая производительность, но важна низкая стоимость. В то же время, есть микроконтроллеры, обладающие большими вычислительными возможностями, например цифровые сигнальные процессоры.

Программирование микроконтроллеров обычно осуществляется на языке ассемблера или Си, хотя существуют компиляторы для других языков, например, Форта. Используются также встроенные интерпретаторы Бейсика. Известные компиляторы Си для МК:

- CodeVisionAVR (для AVR)
- IAR (для любых МК)
- WinAVR (для AVR и AVR32)
- Keil (для архитектуры 8051 и ARM)
- HiTECH (для архитектуры 8051 и PIC от Microchip)

Для отладки программ используются программные симуляторы (специальные программы для персональных компьютеров, имитирующие работу микроконтроллера), внутрисхемные эмуляторы (электронные устройства, имитирующие микроконтроллер, которые можно подключить вместо него к разрабатываемому встроенному устройству) и интерфейс JTAG.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1 Лабораторная работа №1 (2 часа).

**Тема: «Изучение и физическое исследование вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов»**

**2.1.1 Цель работы:** снять зависимость тока от напряжения для различных типов полупроводниковых диодов и стабилитронов

**2.1.2 Задачи работы:** собрать электрическую схему лабораторной работы и провести ряд экспериментов по снятию вольт-амперной характеристики

**2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Стенд лабораторный «Промышленная электроника».
2. Мультиметр DT9205.

**2.1.4 Описание (ход) работы:**

Схема исследований входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме включения с общим эмиттером

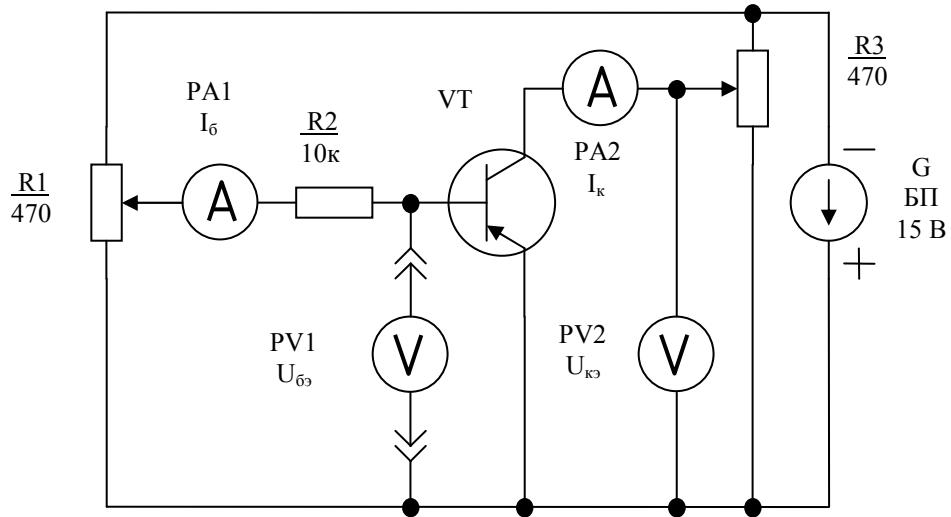


Рис. 1. Схема измерения входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме с ОЭ

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему.
2. Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором (на PV1 1 - 2 В). На потенциометрах R1 и R3, подключенных к блоку питания, ручки регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
3. После проверки схемы преподавателем включить схему.
4. Произвести измерения входных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали.

Установить потенциометром R3 напряжение  $U_{k\ominus} = 0$  В. Задавая потенциометром R1 ток базы транзистора  $I_b$  от 0 до максимального заданного значения определить напряжение база-эмиттер  $U_{b\ominus}$ . Результаты измерений занести в таблицу.

Установить потенциометром R3 напряжение  $U_{k\ominus} = 4$  В. Задавая потенциометром R1 ток базы транзистора  $I_b$  от 0 до максимального значения определить напряжение база-эмиттер  $U_{b\ominus}$ . Напряжение на коллекторе поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

5. Произвести измерения выходных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали.

Установить потенциометром R1 необходимый ток базы транзистора  $I_b$ . Задавая потенциометром R3 напряжение коллектора транзистора  $U_{k\ominus}$  от 0 до максимального значения определить ток коллектора транзистора  $I_k$ . Ток базы поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

Установить потенциометром R1 следующее необходимое значение тока базы транзистора  $I_b$ . Задавая потенциометром R3 напряжение коллектора транзистора  $U_{k\ominus}$  от 0 до максимального значения определить ток коллектора транзистора  $I_k$ . Ток базы поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

Повторить п. 5.2.

6. Отключить схему.

Для конкретных типов п/п транзисторов при измерениях рекомендуются установить следующие значения тока базы.

Таблица. Результаты измерений входных ВАХ транзистора типа МП42.

$U_{k3}$ , В	$I_b$	мкА	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0	$U_{b3}$	мВ									
4	$U_{b3}$	мВ									

Таблица. Результаты измерений выходных ВАХ транзистора МП42.

$I_b$ , мкА	$U_k$	В	0	0,25	0,5	1	2	4	6	8	10
0	$I_k$	мА									
25	$I_k$	мА									
50	$I_k$	мА									
75	$I_k$	мА									
100	$I_k$	мА									
125	$I_k$	мА									
150	$I_k$	мА									
175	$I_k$	мА									
200	$I_k$	мА									

### Представление и обработка результатов измерений

1. Привести полную схему лабораторного стенда исследований характеристик транзисторов. Для исследуемых схем входных и выходных характеристик ниже указать положение всех тумблеров схемы (включено/выключено). Привести упрощенную итоговую схему исследований.

2. На одном графике построить входные вольт-амперных характеристики транзисторов  $I_b = f(U_{b3})$ .

3. На другом графике построить семейство выходных вольт-амперных характеристик транзисторов  $I_k = f(U_{k3})$  при разных токах базы  $I_b$ .

4. Определить и вычислить:

- статическое входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $r_{stat\ \infty} = U_{b3}/I_b$ ;

- дифференциальное входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $r_{diff\ \infty} = \Delta U_{b3}/\Delta I_b$ ;

- статический коэффициент передачи транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $K_I\_{stat} = \beta_{stat} = I_k/I_b$ ;

- динамический коэффициент передачи тока транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $K_I = \beta = \Delta I_k/\Delta I_b$ ;

- произвести аналогичные вычисления для двух других точек, выбранных самостоятельно;

- результаты занести в таблицу;

5. Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов.

6. Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные входные характеристики приборов.

№	$I_\delta$	$U_\delta$	$\Delta I_\delta$	$\Delta U_\delta$	$r_{стам\ вх}$	$r_{диф\ вх}$		Прим.
пп	мкА	мВ	мкА	мВ	Ом	Ом		-
1								
2								
3								

Таблица. Экспериментальные выходные и передаточные характеристики приборов.

№	$I_\delta$	$U_{кэ}$	$\Delta I_\delta$	$I_k$	$\Delta I_k$	$\beta_{стам}$	$\beta$	Прим.
пп	мкА	В	мкА	мА	мА	о.е.	о.е.	-
1								
2								
3								

## 2.2 Лабораторная работа №2 (2 часа).

**Тема: «Исследование схем однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей»**

**2.2.1 Цель работы:** исследовать схемы однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей

**2.2.2 Задачи работы:** собрать схемы однофазных управляемых и неуправляемых выпрямителей и провести их исследование

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

### 2.2.4 Описание (ход) работы:

#### Неуправляемые выпрямители.

Выпрямителем называется устройство, преобразующее переменное напряжение, полярность которого изменяется, в пульсирующее, полярность которого остается постоянной. Для получения постоянного напряжения из пульсирующего на выходе выпрямителя ставят сглаживающие фильтры. Таким образом, выпрямитель совместно с фильтром является устройством, преобразующим переменное напряжение в постоянное. При питании от однофазной сети применяются следующие основные схемы выпрямителей:

однополупериодные;

двуухполупериодные:

- мостовая (схема Греца),

- с нулевым выводом трансформатора.

Однополупериодная схема наиболее проста и содержит всего один диод V1 (рис. 1, а.). В положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора диод V1 находится в проводящем состоянии и через него протекает ток в нагрузку; а в отрицательный - диод закрыт и тока в нагрузке нет. Следовательно, ток в нагрузке протекает в одном направлении и только в один положительный полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора T1.

Мостовая схема выпрямителя (рис. 4.1, б.) содержит четыре вентиля V1 - V4; в положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора T1 пропускает ток вентили V1, V4, а в отрицательный - вентили V2, V3. При этом ток в нагрузке протекает в одном направлении, указанном стрелкой. К закрытому вентилю прикладывается обратное напряжение  $U_{vd}$ , повторяющее по форме напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно  $E_{2m}$ , где  $E_{2m}$  - амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} = \frac{1}{\pi} \int E_{2m} \sin \omega t dt = 2 E_{2m} / \pi$$

Если учесть, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке  $E_2$  связано с амплитудным соотношением:

$$E_{2m} = E_2 \sqrt{2}$$

можно получить простое соотношение для определения среднего значения выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} = 0.9 E_2$$

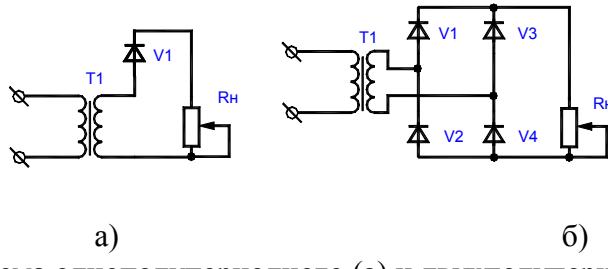


Рис. 1. Схема однополупериодного (а) и двухполупериодного мостового (б) выпрямителей

В мостовой схеме Греца в первичной и вторичной обмотках при работе на активную нагрузку протекает синусоидальный ток. Схема Греца характеризуется хорошим использованием элементов выпрямителя и трансформатора. Поэтому в настоящее время она находит наибольшее применение для выпрямления однофазного тока.

Схема со средней точкой содержит два вентиля V1 и V2 и трансформатор T1, имеющий две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно. В положительный полупериод сетевого напряжения открыт вентиль V1. В отрицательный полупериод открыт вентиль V2. При этом ток обоих вентилей протекает через нагрузку в одном направлении. Формы напряжения и тока такие же, как и в мостовой схеме. Однако амплитудное значение обратного напряжения на вентиле в два раза больше, чем в схеме Греца. Недостатком схемы является плохое использование трансформатора, так как имеются две вторичные обмотки, работающие по полпериода каждая. Основная область применения данной схемы - низковольтные выпрямители. В ней последовательно с нагрузкой включен только один вентиль, что при низких выпрямленных напряжениях позволяет получить более высокий к.п.д.

## Управляемые выпрямители

Управляемым называется такой выпрямитель, который, кроме выпрямления переменного напряжения, одновременно осуществляет регулирование напряжения. Управляемый выпрямитель (УВ) получается из обычного заменой в нем неуправляемых вентилей (диодов) управляемыми вентилями - тиристорами. Регулирование осуществляется задержкой отпирания очередного тиристора в пределах полупериода сетевого напряжения. Угол задержки отпирания тиристора, называемый углом управления  $\alpha$ , отсчитываемого от момента естественного отпирания вентиля, т.е. от момента, в который к вентилю начинает прикладываться положительное напряжение. Для выпрямителей, питающихся от однофазной сети, этот момент совпадает с моментом перехода сетевого напряжения через ноль.

Схема УВ, собранного по схеме с нулевой точкой трансформатора, показана на рис. 2.

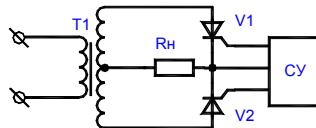


Рис. 2. Схема управляемого выпрямителя по схеме с нулевой точкой трансформатора

Преимущество этой схемы состоит в наличии общей точки катодов тиристоров V1 и V2. При этом упрощается подключение системы управления к выпрямителю. На вход выпрямителя переменное напряжение от двух вторичных обмоток T1. Эти напряжения сдвинуты на угол в 180 эл. градусов. Система управления (СУ) вырабатывает импульсы управления, временное положение которых можно изменять в пределах полупериода сетевого напряжения. До подачи импульса управления тиристоры закрыты и напряжение на нагрузке равно нулю. В момент подачи импульса управления открывается соответствующий тиристор и с этого момента к нагрузке прикладывается напряжение вторичной обмотки трансформатора. Изменяя угол управления  $\alpha$ , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения, которое определяется из выражения:

$$U_{cp} = U_{cp0} * (1 + \cos \alpha) / 2$$

где  $U_{cp0} = 2E2m/\pi = 0,9E2$  - среднее значение выпрямленного при угле управления  $\alpha = 0$ , т.е. выпрямленное напряжение обычного неуправляемого выпрямителя.

Последнее выражение определяет регулировочную характеристику УВ. Из него видно, что среднее значение выпрямленного напряжения при изменении угла от 0 до 180 градусов плавно уменьшается от значения  $U_{cp0}$  до 0. Таким образом, преимущество УВ состоит в возможности плавной регулировки среднего значения выпрямленного напряжения.

Недостатки УВ следующие:

1. Усложнение схемы, так как необходима система управления выпрямителя.
2. Увеличение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения и ухудшение его гармонического состава. Это происходит за счет искажения формы выпрямленного напряжения и появления скачков напряжения в момент отпирания тиристоров.
3. Появление сдвига по фазе между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Таким образом, даже при чисто активной нагрузке УВ потребляет из сети реактивную мощность.

Если нагрузка начинается с емкости и тиристоры управляются короткими импульсами, то из-за появления угла отсечки при малых углах управления могут быть пропуски включения тиристоров (напряжение на конденсаторе больше, чем питающее

напряжение). Поэтому УВ, как правило, не применяют для работы на нагрузку емкостного характера.

### Подготовка к работе.

1. Изучить принцип работы однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей.
2. Изучить принцип построения схемы управления УВ.
3. Нарисовать схемы исследуемых выпрямителей.
4. Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

### План работы

1. Собрать схему однополупериодного выпрямителя без фильтра в соответствии с рис. 3.

2. Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки ( $I_h = 100mA$ ) осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, анодного тока диода, тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

3. Снять и построить внешнюю характеристику выпрямителя, изменяя величину нагрузки сопротивлением  $R_{11}$ .

$$U_{cp} = f(I_{cp})$$

4. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$$

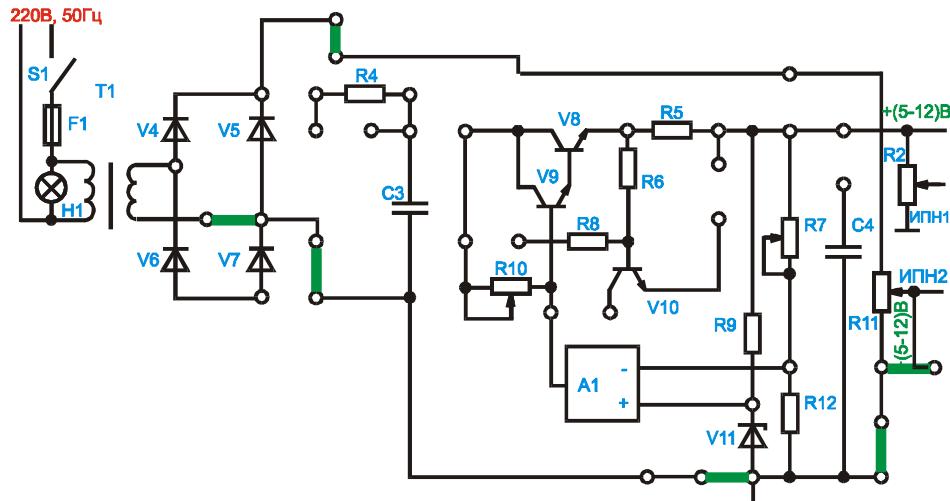


Рис. 3. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку

5. Собрать схему двухполупериодного мостового выпрямителя согласно рис. 4. и провести исследования, аналогичные п.п.2. - 4. ( $I_h = 200mA$ ).

6. Собрать на стенде схему управляемого выпрямителя согласно рис. 5.

7. Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки ( $I_h = 100mA$ ) осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на тиристорах, напряжения на управляющих электродах тиристоров (снимается относительно катодов тиристоров), тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

8. Снять и построить внешние характеристики  $U_{cp} = f(I_{cp})$  выпрямителя для заданных преподавателем углов управления, изменения величину нагрузки сопротивлением  $R_2$ .

9. Снять и построить регулировочную характеристику  $U_{cp} = f(\alpha)$  управляемого выпрямителя для номинального тока нагрузки. Угол управления изменяется резистором R3, а его величина определяется по осциллограмме выходного напряжения с помощью осциллографа.

10. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}.$$

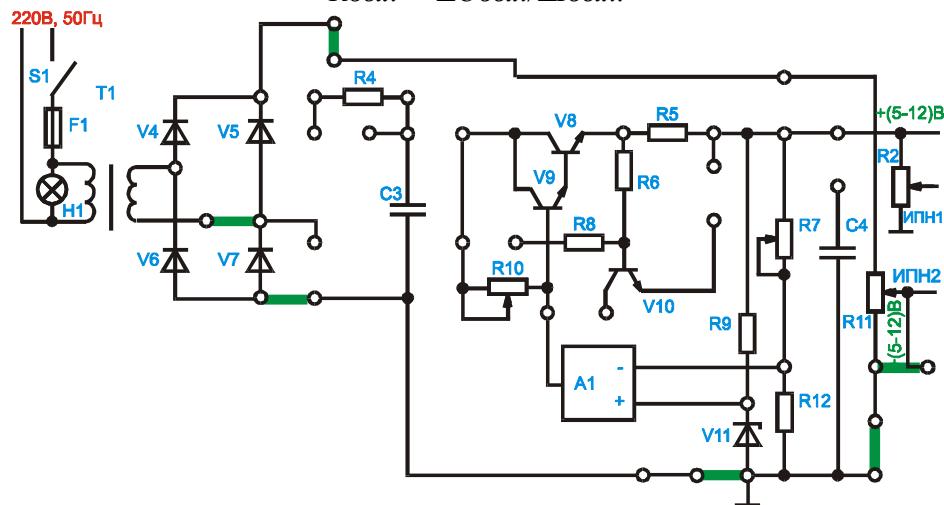


Рис. 4. Схема исследования однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку

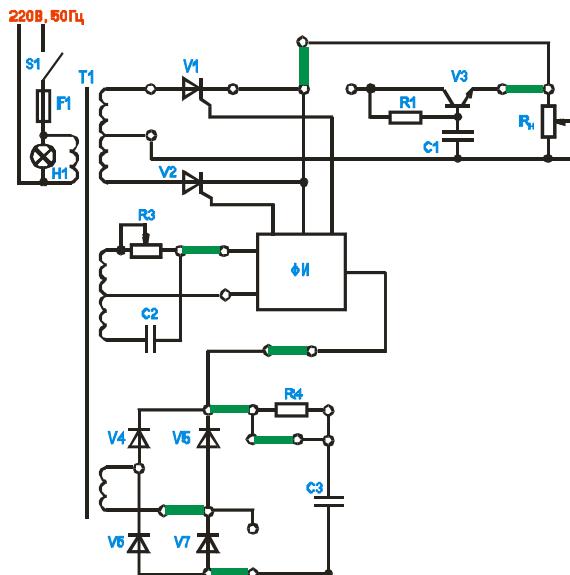


Рис. 5. Схема исследования однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора, работающего на активную нагрузку

## Контрольные вопросы.

1. Объясните принцип работы однофазной мостовой схемы выпрямителя и схемы со средней точкой.

2. Что такое внешняя характеристика выпрямителя? От чего зависит ее наклон?
3. Почему максимальное значение тока вентиля выпрямителя различно для разных видов нагрузки при одной и той же мощности в нагрузке?
4. Сравните мостовую схему выпрямителя со схемой со средней точкой.
5. Отчего зависит к.п.д. выпрямителя?
6. Объясните назначение и принцип работы УВ.
7. Объясните принцип построения и работу системы управления по принципиальной схеме.
8. Нарисуйте форму напряжений и токов в элементах схемы управления и силовой части при углах управления  $\alpha = 30^\circ$ .
9. Объясните внешнюю и регулировочную характеристики УВ.
10. В чем преимущества и недостатки УВ?

### 2.3 Лабораторная работа №3 (2 часа).

#### Тема: «Исследование типовых схем усилителей на биполярных транзисторах»

**2.3.1 Цель работы:** исследование характеристик и параметров усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схемах: с общим эмиттером (ОЭ) и отрицательной обратной связью (ООС) по току; с общим коллектором (ОК)

**2.3.2 Задачи работы:** собрать и провести исследование различных схем усилителей на биполярных транзисторах

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

#### 2.3.4 Описание (ход) работы:

##### Основные характеристики усилителей.

Усилитель - это устройство, предназначенное для усиления мощности входного сигнала за счет использования энергии источников питания.

В зависимости от схемы включения биполярного транзистора усилители делятся на: усилители с общим эмиттером - ОЭ, общим коллектором - ОК, общей базой - ОБ. К основным параметрам усилителей переменного тока относятся:

- коэффициент усиления по: напряжению  $K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ ,
  - току  $K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ ,
  - мощности  $K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ ,
  - входное сопротивление между входными зажимами усилителя для переменного входного тока  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ ,
  - выходное сопротивление - сопротивление между выходными зажимами усилителя для переменного тока при отключенном сопротивлении нагрузки  $R_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}/I_{\text{вых}}$ ,
  - коэффициент полезного действия усилителя - отношение мощности, поступающей в нагрузку, к мощности, потребляемой от источника питания:
- $$\eta = P_{\text{н}}/P_{\text{п}}$$

К основным характеристикам усилителя также относятся амплитудно-фазо-частотная (АФЧХ) и амплитудно-частотная (АЧХ) и амплитудная характеристики. В общем случае коэффициент усиления по напряжению и току является величиной

комплексной, характеризующейся модулем и фазой, которые зависят от частоты усиливаемого сигнала.

Из-за наличия в схеме усилителя реактивных элементов и зависимости свойств транзистора от частоты коэффициент усиления усилителя имеет различные значения на различных частотах. Это явление называется частотными искажениями усилителя. Для их оценки вводится параметр, называемый коэффициентом частотных искажений  $M(\omega)$ , равный отношению коэффициента усиления на данной частоте  $Ku(\omega)$  к коэффициенту усиления на средних частотах  $Kuo$ :

$$M(\omega) = Ku(\omega)/Kuo.$$

Частоты, на которых коэффициент усиления достигает предельно допустимого (граничного) значения  $Ku(\omega)_{gr} = Kuo/\sqrt{2} = 0,707 * Kuo$ , называется верхней гр.р и нижней фн.гр граничными частотами (частотами среза), а разность  $\omega = \omega_{gr} - \omega_{n.gr}$  – полосой пропускания усилителя.

Амплитудная характеристика усилителя - это зависимость амплитуды выходного сигнала  $U_{вых}$  от амплитуды входного сигнала  $U_{вх}$  на некоторой постоянной частоте.

Амплитудная характеристика идеального усилителя представляет прямую линию, проходящую через начало координат, а амплитудная характеристика реального усилителя совпадает с характеристикой идеального только на некотором участке. При больших входных сигналах  $U_{вх} > U_{вх, max}$  выходное напряжение усилителя перестает возрастать. Это связано с тем, что рабочая точка транзистора попадает в область насыщения или отсечки. При этом выходной сигнал искажается. Это явление называется нелинейными искажениями и оценивается коэффициентом гармоник:

$$Kg = \sqrt{EPn / P_1},$$

где  $Pn$  - мощность  $n$ -й гармонической составляющей выходного сигнала,

$P1$  - мощность первой гармоники.

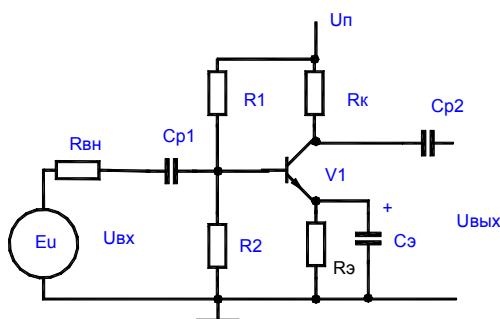
Если нагрузка усилителя активная, то коэффициент гармоник принимает вид:

$$Kg = \sqrt{EU^2 nm / U^2 1m} = \sqrt{EI^2 nm / I^2 1m}$$

При малых входных сигналах  $U_{вх} < U_{вх, min}$  выходное напряжение усилителя остается практически постоянным и равным  $U_{вых, min}$ . Напряжение  $U_{вых, min}$  называется напряжением собственных шумов усилителя. Собственные шумы усилителя обусловлены различными помехами и наводками, а также непостоянством электрических процессов во времени. Отношение  $U_{вх, max}/U_{вх, min} = D$  называется динамическим диапазоном усилителя.

### Усилительный каскад на БТ с ОЭ.

Наиболее распространенная схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ



показана на рис. 1.

Рис. 1. Схема усилителя на БТ с ОЭ

Входное усиливающее переменное напряжение  $U_{вх}$  подводится ко входу усилителя через разделительный конденсатор  $C_{р1}$ . Конденсатор  $C_{р1}$  разделяет источник входного сигнала и базовый вход усилителя по постоянному току, чтобы исключить нарушение начального режима работы транзистора VI. Усиленное переменное напряжение, выделяемое на коллекторе транзистора VI, подводится к внешней нагрузке с сопротивлением  $R_h$  через разделительный конденсатор  $C_{р2}$ . Этот конденсатор служит для разделения выходной (коллекторной) цепи транзистора и внешней нагрузки по постоянной составляющей коллекторного тока  $I_{ок}$ . Значение  $I_{ок}$  и других постоянных составляющих токов и напряжений в цепях транзистора зависят от режима работы по постоянному току (положения рабочей точки на нагрузочной прямой). Положение рабочей точки, т.е. значение начального тока базы  $I_{об}$  задается делителем  $R_1, R_2$ . При отсутствии входного переменного сигнала в цепи коллектора протекает постоянный ток  $I_{ок}$ , значение которого определяется из выражения:

$$U_{ок\varnothing} + I_{ок} \cdot R_k + I_{ок} \cdot R_{\varnothing} = U_{ок\varnothing} + I_{ок}(R_k + R_{\varnothing}) = E_k,$$

где  $R_k$  - сопротивление в цепи коллектора,  
 $R_{\varnothing}$  - сопротивление в цепи эмиттера.

Решив это уравнение относительно тока  $I_{ок}$ , получим динамическую характеристику транзистора по постоянному току

$$I_{ок} = E_k / (R_k + R_{\varnothing}) - U_{ок\varnothing} / (R_k + R_{\varnothing}).$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой линии, проходящей через точки с координатами:  $E_k, 0; 0, E_k / R_{ок\varnothing}$ , изображенными на выходных характеристиках транзистора.

Усилительные каскады могут работать в одном из режимов: А, В, С, АВ, определяемых начальным положением рабочей точки при отсутствии входного переменного сигнала. При работе транзистора в активном (усилительном) режиме (класс А) начальное положение рабочей точки должно быть таким, чтобы ток через активный элемент транзистора протекал в течение всего периода изменения входного сигнала, а амплитудное значение выходного тока  $I_{км}$  не превышало начального тока  $I_{ок}$ . Начальное положение рабочей точки обеспечивается делителем напряжения  $R_1, R_2$ , значения которых определяются соотношениями:

$$R_1 = (E_k - U_{об\varnothing} - U_{r\varnothing}) / (I_{дел} + I_{об});$$

$$R_2 = (U_{об\varnothing} + U_{r\varnothing}) / I_{дел},$$

где,  $I_{дел} = (2...5)I_{об}$  - ток в цепи делителя,  
 $U_{r\varnothing} = (0,1...0,25)E_k$  - для каскадов предварительного усиления.

При обеспечении режима работы транзистора необходимо осуществить температурную стабилизацию положения рабочей точки. С этой целью в эмиттерную цепь введен резистор  $R_{\varnothing}$ , на котором создается напряжение отрицательной обратной связи ООС по постоянному току  $U_{r\varnothing}$ . Для устранения ООС по переменному току при наличии входного переменного сигнала резистор  $R_{\varnothing}$  шунтируют конденсатором  $C_{\varnothing}$ , сопротивление которого на частоте усиливающего сигнала должно быть незначительным.

Аналитический расчет коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности, а также входного и выходного сопротивлений производится по эквивалентным схемам усилительного каскада для различных диапазонов частоты входного сигнала.

## Усилительный каскад на БТ с общим коллектором (эмиттерный повторитель).

Эмиттерный повторитель (ЭП) представляет собой усилитель тока и мощности, выполненный на транзисторе по схеме с ОК. Его схема представлена на рис. 2.

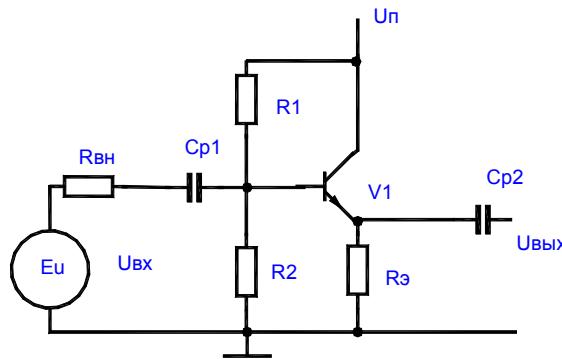


Рис. 2. Схема усилителя на БТ с ОК

Сопротивление нагрузки включается в эмиттерную цепь транзистора. ЭП обладает повышенным входным и пониженным выходным сопротивлениями. Его входное и выходное напряжения совпадают по фазе и незначительно отличаются по величине. Отмеченные свойства ЭП позволяют использовать его для согласования высококоомного источника напряжения с низкоомной нагрузкой.

ЭП можно рассматривать как усилительный каскад с ОЭ, у которого  $R_k = 0$ , а резистор в цепи эмиттера не зашунтирован конденсатором  $C_e$ . В этом случае все выходное напряжение, выделяемое на сопротивлении в цепи эмиттера, последовательно вводится во входную цепь усилителя, где вычитается из напряжения входного сигнала  $U_{вх}$ , снижая его. В схеме действует 100% последовательная отрицательная обратная связь по напряжению.

Коэффициент усиления по напряжению ЭП

$$K_u = u_{вых}/u_{вх} = (I_e * R_e)/(I_b * R_{вх}).$$

Коэффициент усиления по току в схеме ЭП без учета  $R_h$  (холостой ход)  
 $K_i = I_e/I_b = 1+\beta$ .

### Подготовка к работе.

1. Изучить принцип работы схем усилительных каскадов на БТ с ОЭ и ОК.
2. Изучить порядок расчета схем усилительных каскадов БТ с ОЭ и ОК.
3. По известным элементам схемы усилителей рассчитать величину сопротивления  $R_{23}$  с учетом наименьших нелинейных искажений.
4. Рассчитать значения основных параметров для названных схем включения усилителей  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ , работающих в области средних частот ( $f = 1000$  Гц).
5. Нарисовать схемы исследуемых усилительных каскадов.
6. Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

## **План работы.**

1. Собрать схемы источника питания и генератора синусоидальных колебаний (см. паспорт к стенду). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилительных каскадов.
2. Собрать схему усилителя без шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера, на основе схемы рис. 3, установив рассчитанное значение резистора  $R_{23}$ .
3. Подать на вход усилителя от генератора ГС1 синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$  и амплитудой  $U_{вхт} = 0,05\text{В}$ . Замерить с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала  $U_{выхт}$  и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.  
Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению, току и мощности.
4. Изменяя величину сопротивления  $R_{23}$  по осциллографу определить момент появления в выходном сигнале больших нелинейных искажений и зарисовать осциллограмму этого напряжения.
5. Включить емкость в цепь эмиттера и выполнить операции п.п. 3 и 4.
6. Установить амплитуду входного сигнала  $U_{вхт} = 0,05\text{В}$ .  
Изменяя частоту входного сигнала от 0 до 100кГц снять амплитудно-частотную характеристику усилителя и построить ее.
7. Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$ . Изменяя амплитуду входного сигнала  $U_{вхт}$  от 0 до 0,5В (порядка 10 значений) построить амплитудную характеристику усилителя. Для каждого значения  $U_{вхт}$  зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Определить  $U_{вых max}$  в момент появления существенных нелинейных искажений.
8. Собрать схему ЭП согласно рис. 4.
9. Для данной схемы провести исследования согласно п.п. 3, 6, 7.
10. Сравнить результаты теоретических расчетов и практических исследований, сформулировать выводы по каждому пункту рабочего задания.

## **Контрольные вопросы.**

1. Определить по принципиальной схеме усилительного каскада способ включения транзистора.
2. Сравните усилители с ОЭ, ОК, ОБ по коэффициентам усиления  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ .
3. В каком усилителе осуществляется усиление по напряжению и по мощности?
4. В каком усилителе осуществляется усиление по току и по мощности?
5. Какой усилитель обеспечивает максимальное усиление по мощности и почему?
6. Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК по значениям  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ . Чем обусловлено их различие?
7. Сравните частотные свойства каскадов с ОЭ, ОБ, ОК и объясните причины различия.
8. Объясните назначения отдельных компонентов схем усилителей с ОЭ, ОБ, ОК.
9. Как зависит  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$  усилителя с ОЭ от значений электрических параметров отдельных компонентов схемы?
10. Когда следует применять усилительные каскады, включенные по схеме с ОЭ, ОБ, ОК?
11. Назовите способы задания режима работы транзистора в усилительных каскадах.
12. Как построить нагрузочную линию транзистора по постоянному и переменному току?
13. Объясните влияние температуры на режим работы усилительных каскадов.
14. Какие вы знаете способы температурной стабилизации режима работы усилительных каскадов?

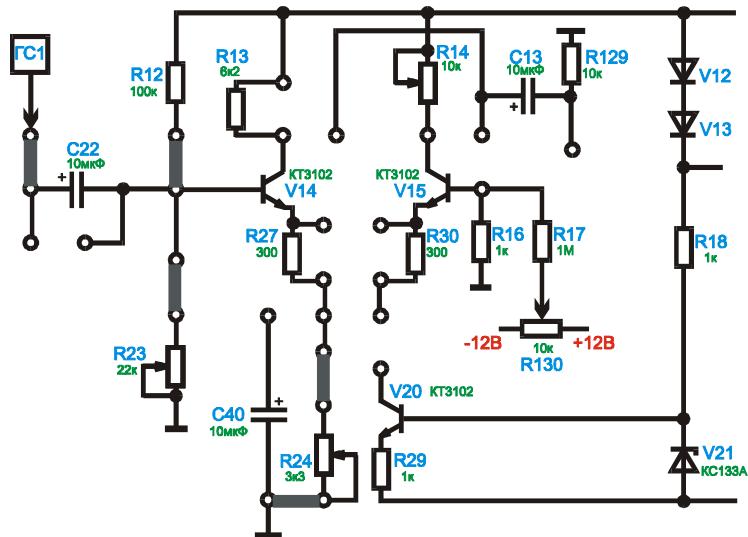


Рис. 3. Схема исследования усилителя на БТ, включенного по схеме с ОЭ

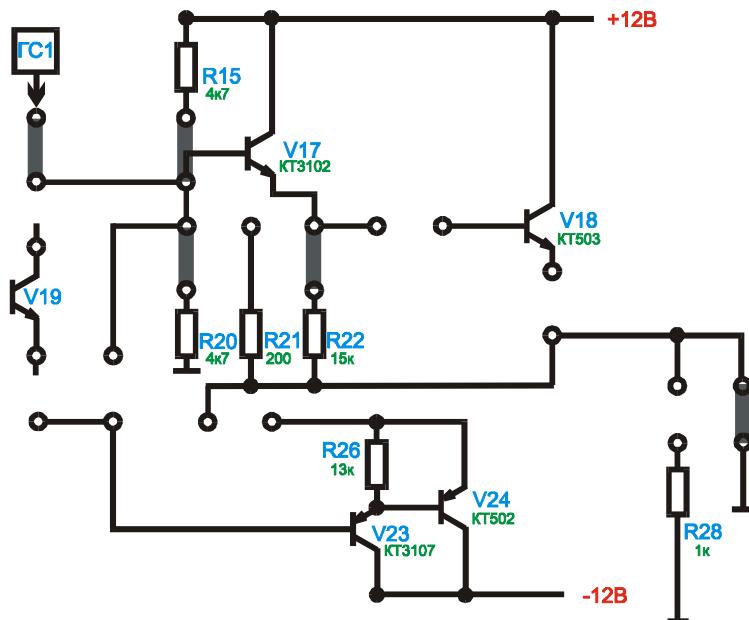


Рис. 4. Схема исследования усилителя на БТ, включенного по схеме с ОК

## 2.4 Лабораторная работа №4 (2 часа).

Тема: «Исследование операционного усилителя»

**2.4.1 Цель работы:** изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя (ОУ), исследование схем включения ОУ.

**2.4.2 Задачи работы:** собрать схему с использованием операционного усилителя и провести его исследование.

**2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**  
лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

#### 2.4.4 Описание (ход) работы:

Исследуемый усилитель называется операционным потому, что он может использоваться для выполнения различных математических операций над сигналами: алгебраического сложения, вычитания, умножения на постоянный коэффициент, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и т.д. Современный ОУ выполняется на базе интегральной микросхемы операционного усилителя, к выводам которой присоединяются источники питания, входных сигналов, сопротивление нагрузки, цепи обратной связи (ОС), коррекции частотных характеристик ОУ и другие цепи.

ОУ - это усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления по напряжению. Для получения возможности усиливать разнополярные сигналы ОУ запитывают, обычно симметричным, двухполярным источником питания.

На рис. 1. показано условное обозначение ОУ с одним выходом и двумя входами: прямым и инверсным. Инверсный вход обозначают знаком инверсии (кружком) или помечают знаком "-". Прямой вход не имеет знака инверсии или его помечают знаком "+".

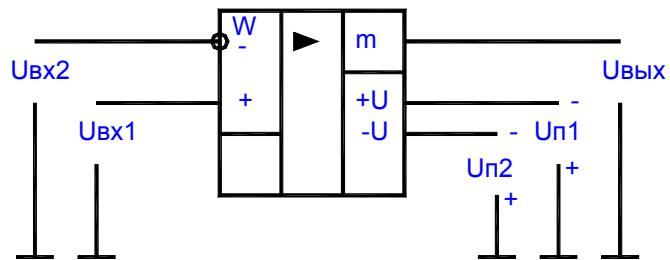


Рис. 1. Условное обозначение ОУ

В общем случае на входные выводы ОУ подаются либо синфазный

$$U_{c\phi} = (U_{bx1} + U_{bx2})/2,$$

либо дифференциальный сигналы.

$$U_{dif} = (U_{bx1} - U_{bx2})$$

ОУ предназначен для усиления небольшого разностного (дифференциального) сигнала. Синфазный сигнал схемой ОУ должен быть максимально ослаблен. Выходное напряжение  $U_{вых}$  находится в фазе (синфазно) с напряжением на входе "+"  $U_{bx1}$  и противофазно напряжению на входе "-"  $U_{bx2}$ .

На рис. 2. приведены амплитудные характеристики ОУ.

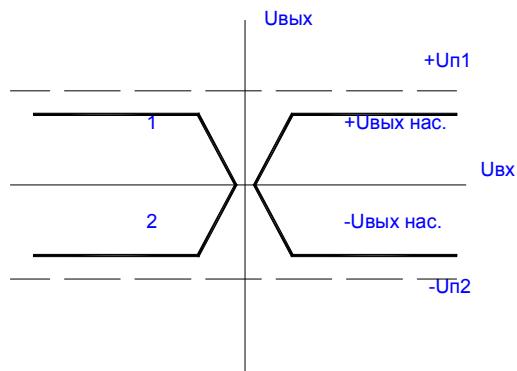


Рис.2. Амплитудные характеристики ОУ

## Инвертирующий усилитель.

В этой схеме входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход заземлен (см. рис. 3.).

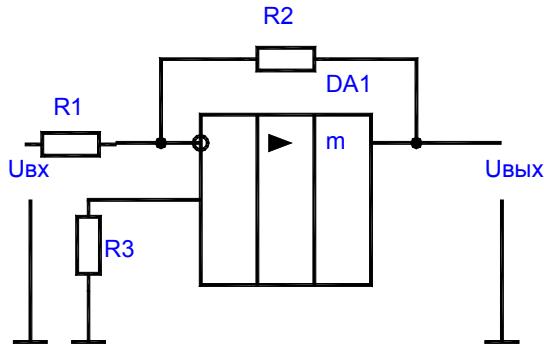


Рис. 3. Инвертирующий усилитель на ОУ

Усилитель называется инвертирующим, так как выходное напряжение  $U_{вых}$  инвертировано по отношению к выходному напряжению  $U_{вх}$ . Отрицательная обратная связь создается с помощью резисторов  $R_2, R_1$  (параллельная ООС по напряжению).

Коэффициент усиления напряжения схемы инвертирующего ОУ определяется выражением:

$$K_u = -R_2/R_1.$$

Если  $R_2 = R_1$ , то  $K_u = -1$  и ОУ становится инвертирующим повторителем напряжения, у которого  $U_{вых} = -U_{вх}$ . Входное сопротивление инвертирующего ОУ.

$$R_{вх} = R_1,$$

а выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_{вых\ oy} / (1 + K_{oy}/K_u).$$

Для компенсации различия входных токов в схему введен резистор  $R_3 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ .

## Неинвертирующий усилитель.

В этой схеме (см. рис. 4.) входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах  $R_1, R_2$ , подается напряжение ООС.

$$U_{оос} = U_{вых} \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

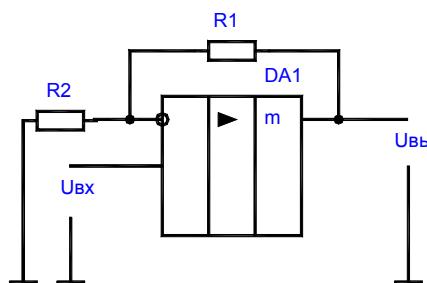


Рис. 4. Неинвертирующий усилитель на ОУ

В схеме действует последовательная ООС по напряжению. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.

$$K_u = 1 + R1/R2.$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя

$$R_{вх} = R_{вх\ oy} * (1 + K_{оу}/K_u),$$

а выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_{вых\ oy} / (1 + K_{оу}/K_u).$$

При выполнении условия  $R1 = 0$ ,  $R2 = \infty$  ОУ будет выполнять функцию практически идеального повторителя напряжения, у которого

$$K_u = 1, \text{ а } U_{вых} = U_{вх}.$$

### ***Подготовка к работе.***

1. Изучить принцип работы, параметры, характеристики, схемы включения и возможности применения ОУ.
2. Определить входное, выходное сопротивления и коэффициент усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей для заданных преподавателем значений параметров исследуемых схем.
3. Нарисовать схемы исследуемых усилителей.
4. Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

### ***План работы.***

1. Собрать схемы двух источников питания и генератора синусоидальных колебаний (см. паспорт к стенду). Выставить заданное преподавателем напряжение питания схем усилителей.
2. Собрать схему инвертирующего усилителя, представленную на рис. 5.
3. Подать на вход усилителя постоянное напряжение не более 1В от источника ИПН1 (выходное напряжение ИПН1 регулируется резистором R2). Замерить с помощью цифрового вольтметра выходное напряжение и рассчитать коэффициент усиления схемы.
4. Снять и построить амплитудную характеристику усилителя, изменяя напряжение от источника ИПН1 от 0 до  $U_{вх\ max}$  при котором усилитель входит в насыщение. Определить значение  $U_{вых\ нас.}$  исследуемого ОУ. Входное и выходное напряжения замеряются цифровым вольтметром.
5. Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1кГц$  и амплитудой не более 1В от генератора ГС1. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.
6. Подать на вход усилителя сигнал с амплитудой более  $U_{вх\ max}$  и зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Пояснить полученный результат.
7. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику усилителя при  $U_{вх} = 1В$ , изменяя частоту входного сигнала от 200 Гц до 2 МГц.
8. Собрать схему неинвертирующего усилителя, представленную на рис. 6.
9. Для исследования данной схемы усилителя выполнить указания пунктов 3. – 7.
10. Сравнить результаты практического исследования схем на ОУ с теоретическими и сделать выводы.

### ***Контрольные вопросы.***

1. Охарактеризуйте назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.

2. Сравните схемы усилителей на ОУ по основным параметрам.
3. Охарактеризуйте неинвертирующий и инвертирующий повторители напряжения и приведите их схемную реализацию.
4. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику ОУ и поясните ее.
5. Как осуществляется и для чего предназначена коррекция частотных характеристик ОУ?
6. Чем определяется максимальное выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  ОУ?

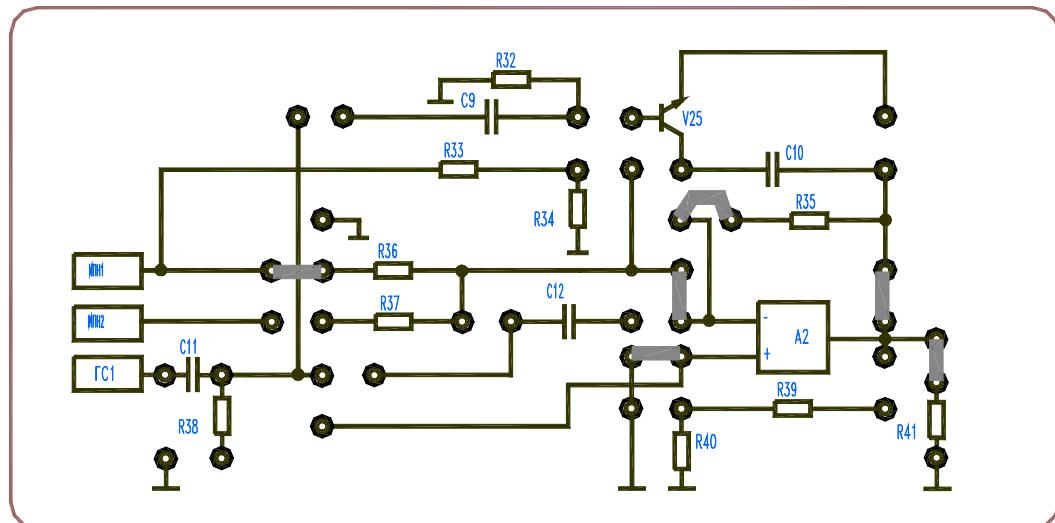


Рис. 5. Схема исследования инвертирующего усилителя на ОУ

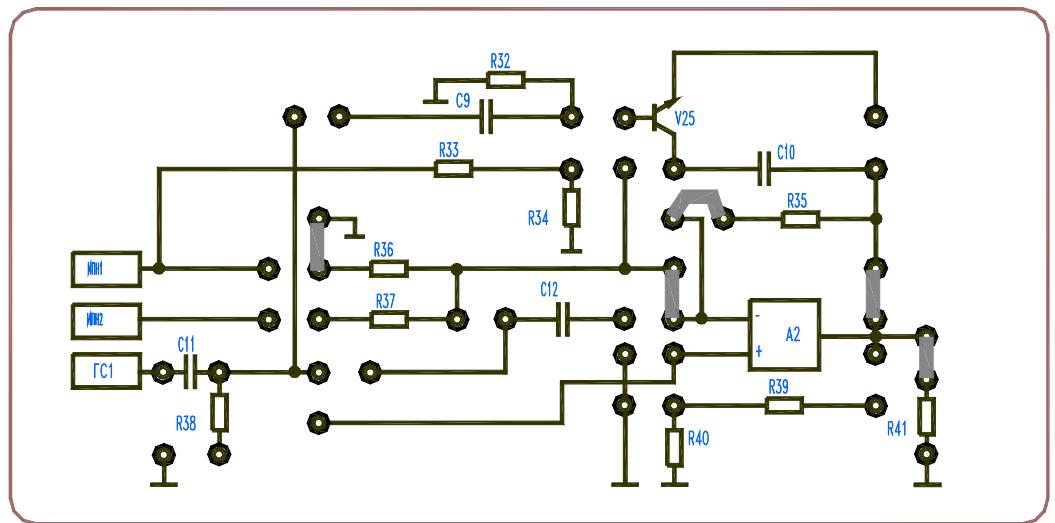


Рис. 6. Схема исследования неинвертирующего усилителя на ОУ