



**Министерство образования и науки
Российской Федерации
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»**

Г.В. Плеханов

**ЭЛЕКТРОНИКА
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности
Электроснабжение по направлению
Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения

Рубцовск 2014

УДК 621

Плеханов Г.В. Электроника и информационно-измерительная техника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности Электроснабжение по направлению Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт, – Рубцовск 2014. – 50 с.

В учебном пособии обобщены единой областью знания об электронике, научные и практические разработки в области измерительной техники, сведения о информационной технике. Дано общее представление об измерениях и испытаниях.

Рассмотрено и одобрено
на заседании НМС РИИ.
Протокол №6 от 01.09.14.

Рецензент: к.т.н.

Э.С. Маршалов

© Рубцовский индустриальный институт, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ЭЛЕКТРОНИКА	4
Глава 1.1. Полупроводниковые приборы	4
Глава 1.2. Усилители постоянного тока	11
Глава 1.3. Операционные усилители	25
Раздел 2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА	34
ВИДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	50

Раздел 1. ЭЛЕКТРОНИКА

Глава 1.1. Полупроводниковые приборы

Полупроводниковые приборы классифицируют в зависимости от механизма работы и функционального назначения.

По принципу действия полупроводниковые приборы делятся на следующие основные виды: диоды, тиристоры, стабилитроны, транзисторы. Внутри каждого из указанных видов приборы подразделяются на типы: диоды – по значениям максимально допустимого среднего прямого тока, тиристоры – по значениям максимально допустимого прямого тока в открытом состоянии, стабилитроны – по значениям максимально допустимой мощности рассеяния.

Приборы одного типа подразделяются на классы:

- диоды – по значениям повторяющегося импульсного обратного напряжения;

- тиристоры – по значениям повторяющегося импульсного обратного напряжения и повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии; тиристоры, проводящие в обратном направлении, и симметричные тиристоры – по значениям повторяющегося напряжения в закрытом состоянии;

- стабилитроны – по значениям напряжения стабилизации.

Кроме того, виды диодов и тиристоров подразделяются на подвиды в зависимости от коммутационных параметров. Для диодов:

- а) диод – время обратного восстановления не нормируется;

- б) быстровосстанавливающийся диод – время обратного восстановления равно или менее нормы.

Для тиристоров:

- а) тиристор – время включения и время выключения не нормируется;

- б) быстровыключающийся тиристор – время выключения равно или менее нормы;

- в) быстровключающийся тиристор – время включения равно или менее нормы;

- г) быстросрабатывающий тиристор – время включения и время выключения равно или менее нормы.

В зависимости от отличительных признаков диоды и тиристоры подразделяются следующим образом:

- тиристор, управляемый с помощью внешнего светового сигнала, – фототиристор;

- тиристор, управляемый с помощью внутреннего светового сигнала от светоизлучающего диода при воздействии внешнего электрического сигнала, – оптоотиристор (тиристорная оптопара);

- тиристор, проводящий в обратном направлении, допускающий работу в обратном направлении в качестве диода, – тиристор-диод;

- диод (тиристор), имеющий лавинные вольт-амперные характеристики, – лавинный диод (лавинный тиристор).

Кроме того, приборы подразделяются по конструктивным признакам и по полярности.

Рассмотрим состав полупроводниковых приборов.

Диоды

Двухэлектродный преобразовательный прибор, в котором используется то или иное свойство одного $p-n$ перехода.

В свою очередь среди диодов можно выделить:

а) Выпрямительные диоды

Полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в пульсирующий однонаправленный ток (для выпрямления переменного тока).

б) Высокочастотные диоды

Предназначены для выпрямления переменного тока в радиочастотных устройствах. Основным критерием является минимизация емкости $p-n$ перехода. Для минимизации перехода используется планарная и точечная технологии.

в) Импульсные диоды

Полупроводниковый диод, предназначенный для применения в импульсных режимах. Диод, адаптированный для работы с импульсными сигналами, имеющими ступенчатый характер изменения во времени.

г) Стабилитроны

Полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя (обратной ветви ВАХ) слабо зависит от тока и который используется для стабилизации напряжения. Используют стабилитроны в качестве источника опорного напряжения. Помимо обычных стабилитронов выпускают серию термокомпенсированных стабилитронов, в которых к последнему присоединяют обычный полупроводниковый диод. При этом положительный температурный коэффициент (ТКН) компенсируется отрицательным ТКН прямого смещенного перехода. Также диод, в котором для стабилизации напряжения используют прямую ветвь ВАХ, называют **стабистором**. Напряжение стабилизации примерно 0,7 В. Для увеличения напряжения собирают цепочки из последовательно соединенных диодов и монтируют в одном корпусе.

д) Туннельные и обращенные диоды

Полупроводниковый диод, использующий при работе помимо инжекционного (диффузионного) туннельный механизм перехода через $p-n$ переход. На ВАХ туннельного диода появляется участок отрицательного динамического сопротивления. Наличие такого участка позволяет строить различные генераторные и триггерные схемы. Обращенные диоды – диоды Шоттки, разновидности туннельных диодов, у которых технологическими приемами на ВАХ устранен участок отрицательного динамического сопротивления. В результате диоды Шоттки имеют меньшее значение прямого

падения напряжения, по сравнению с обычными диодами, при одинаковых значениях протекающих токах.

е) **Варикап**

Полупроводниковый диод, работающий в режиме обратного смещения, у которого используется зависимость емкости перехода от величины приложенного обратного напряжения. Приборы широко используют в цепях электронной настройки радиочастотных сигналов.

ж) **Фотодиод**

Фотодиод – это полупроводниковый оптопреобразовательный прибор, основанный на внутреннем фотоэффекте, содержащий один *p-n* переход и имеющий два вывода. Прибор имеет оптически прозрачное окно.

з) **Светодиод**

Полупроводниковый оптоэлектронный прибор, преобразующий энергию протекающего прямого тока в оптическое излучение инфракрасного или видимого светового излучения.

и) **Магнитодиод** – полупроводниковый диод, в котором используется изменение ВАХ под действием магнитного поля. Эффект Холла.

Транзисторы

Полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности.

Среди транзисторов различают:

а) **Биполярный транзистор** – (обычно его называют просто транзистором) представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами электропроводности, пригодный для усиления мощности. Области разделяются электронно-дырочными переходами. Особенность транзистора состоит в том, что между его электронно-дырочными переходами существует взаимодействие – ток одного из переходов может управлять током другого. Такое управление возможно, потому что носители заряда, инжектированные через один из электронно-дырочных переходов, могут дойти до другого перехода, находящегося под обратным напряжением, и изменить его ток.

б) **Однопереходный транзистор** – трехэлектродный полупроводниковый прибор с одним *p-n* переходом и двумя невыпрямляющими контактами к базовой области, предназначенный для усиления и генерации электромагнитных колебаний при модуляции сопротивления базы в результате инъекции через *p-n* переход неосновных носителей заряда.

в) **Полевой транзистор** – это электропреобразовательный прибор, в котором ток через канал управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком, и который предназначен для усиления мощности электромагнитных колебаний.

г) **IGBT-транзистор**. Аббревиатура IGBT – это сокращение названия Insulated gate bipolar transistor. В переводе это значит **биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ)**.

д) **Биполярный магнитотранзистор** – это транзистор, в котором используется зависимость его характеристик от магнитного поля. Физической причиной изменения параметров биполярных транзисторов в магнитном поле является изменение сопротивления базы транзистора. Для увеличения чувствительности магнитотранзисторы делают с двумя коллекторными переходами. Магнитное поле отклоняет носители от одного коллектора к другому. По изменению токов коллекторов можно оценить или измерить магнитную индукцию поперечного магнитного поля.

Тиристоры

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя или более $p-n$ переходами, ВАХ которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, который используется для переключения.

а) **Двухэлектродный тиристор (динистор)** – тиристор, имеющий два внешних вывода. Состоит из четырех слоев кристалла полупроводника с чередующимся типом электропроводности. Динистор может находиться в двух состояниях: выключенном, или закрытом, которое характеризуется большим падением напряжения на динисторе и прохождением малых токов через него, то есть большим сопротивлением, и включенном или открытом, которое характеризуется малым падением напряжения на динисторе и прохождением больших токов через него, то есть малым сопротивлением. В открытом состоянии динистор находится до тех пор, пока за счет проходящего тока поддерживается количество избыточных зарядов в $p-n$ переходах, необходимое для понижения высоты потенциального барьера до величины, соответствующей прямому его включению. Если же ток через тиристор уменьшить до некоторой величины, то в результате рекомбинации и рассасывания количество избыточных зарядов уменьшится, произойдет перераспределение падений напряжений на $p-n$ переходах тиристорной структуры, и динистор перейдет в закрытое состояние.

б) **Трехэлектродный тиристор (тринистор)** – тиристор, имеющий три внешних вывода. Чтобы перевести динистор в открытое состояние, необходимо увеличение анодного напряжения на динисторе до величины напряжения включения. Однако тот же эффект можно получить, если есть управляющий электрод. При подаче на управляющий электрод напряжения такой полярности, что прилегающий переход будет включен в прямом направлении, произойдет переключение тринистора в открытое состояние при анодном напряжении меньшем напряжения, включения.

в) **Симметричный тиристор (симмистор)** – это тиристор, имеющий практически одинаковые ВАХ при различных полярностях приложенного напряжения. Таким образом, симметричный тиристор можно представить в виде двух тиристоров, включенных встречно и шунтирующих друг друга. Симметричный тиристор можно сделать управляемым, если у одной из областей с электропроводностью p -типа осуществить невыпрямляющий контакт с соответствующим управляющим выводом.

Схемы включения и применение фотоэлектронных приборов

Фотоэлектронные (фотоэлектрические) приборы предназначены для преобразования световой энергии в электрическую.

Все полупроводниковые фотоэлектрические приборы основаны на внутреннем фотоэффекте – возбуждении атомов и росте концентрации свободных носителей заряда под воздействием светового излучения. При этом в полупроводнике растет проводимость, а на *p-n* переходах появляется ЭДС.

К фотоэлектронным приборам относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Фоторезистор – это полупроводниковый фотоэлектрический прибор, сопротивление которого изменяется под действием светового излучения. На рис. 1.1 показана схема включения фоторезистора и его характеристики.

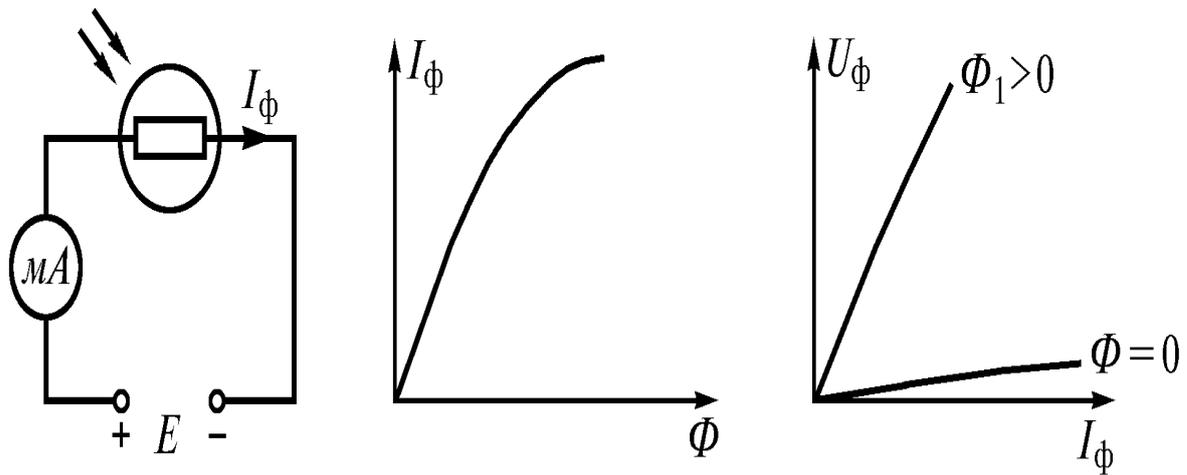


Рисунок 1.1. Схема включения фоторезистора

Фоторезисторы, как и другие фотоэлектрические приборы, характеризуются **световой характеристикой**, т.е. зависимостью фототока I_Φ , протекающего через прибор от светового потока Φ . Она нелинейная, и это является недостатком фоторезистора. ВАХ фоторезистора линейны, а их наклон зависит от величины светового потока.

Фоторезисторы могут работать и на переменном токе. Фоторезисторы являются самыми простыми и дешевыми фотоэлектрическими приборами.

Фотодиод – это полупроводниковый фотоэлектрический прибор, основанный на внутреннем фотоэффекте, содержащий один *p-n* переход и имеющий два вывода.

Фотодиоды могут работать в двух режимах: без внешнего источника электроэнергии (**режим фотогенератора**) и с внешним источником (**режим фотопреобразователя**). На рис. 1.2, *a, б* показаны схемы включения.

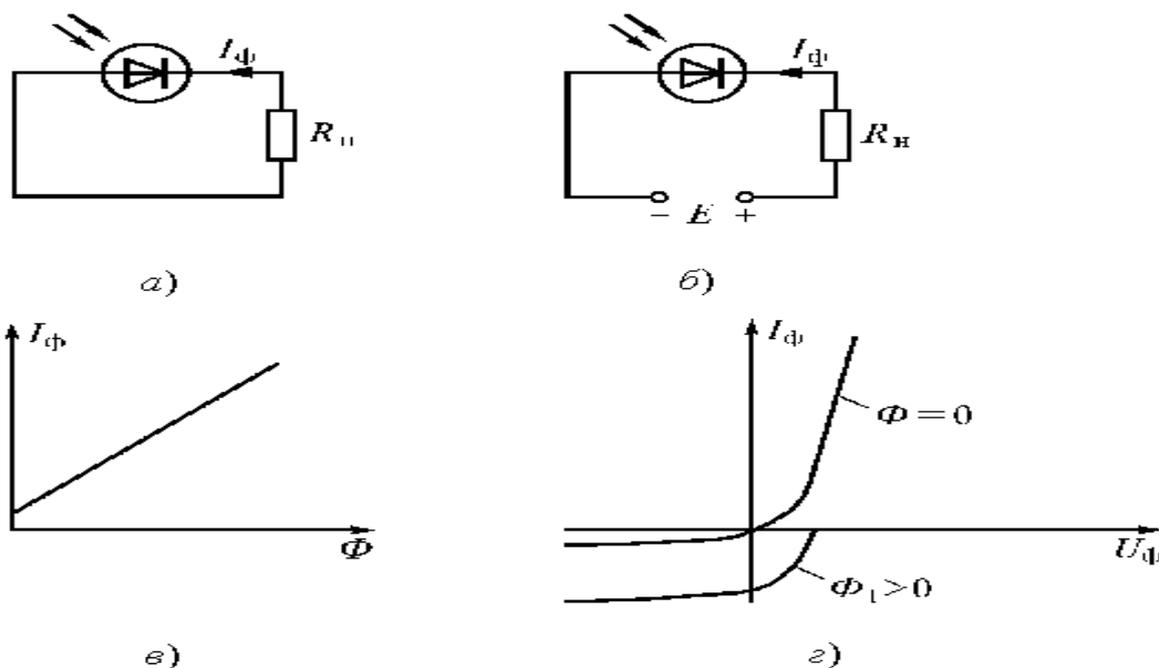


Рисунок 1.2. Схемы включения фотодиода в режиме фотогенератора (а) и фотопреобразователя (б); его световая (в) и вольтамперная (г) характеристики

При освещении фотодиода в режиме фотогенератора на его выводах появляется фото-ЭДС с полярностью слева «+», справа «-». При подключении сопротивления нагрузки под действием ЭДС по нему идет фототок. Именно в таком режиме работают солнечные батареи. В режиме фотопреобразователя через *p-n* переход протекает обратный ток, зависящий от светового потока, определяющего число неосновных носителей. Световая характеристика в режиме фотопреобразователя (рис. 1.2, в) линейна и выражается уравнением

$$I_{\Phi} = K \cdot \Phi + I_{\Phi T},$$

где K – чувствительность (до 20 мА/лм),
 $I_{\Phi T}$ – темновой ток (начальный ток в темноте).

ВАХ фотодиода в темноте не отличаются от ВАХ *p-n* перехода (рис. 1.2, г), а при освещении опускается вниз. Режиму фотопреобразователя соответствуют участки в третьем квадранте, а режиму фотогенератора – в четвертом.

Фотодиоды имеют большее быстродействие, чем фоторезисторы (работоспособны при частоте 1 ГГц и выше), но менее чувствительны.

С целью повышения чувствительности вместо фотодиодов применяют фототранзисторы.

Фототранзистор – фотоэлектронный прибор, имеющий трехслойную структуру, как обычный транзистор, в котором ток зависит от освещения базы.

Схема включения фототранзистора показана на рис. 1.3.

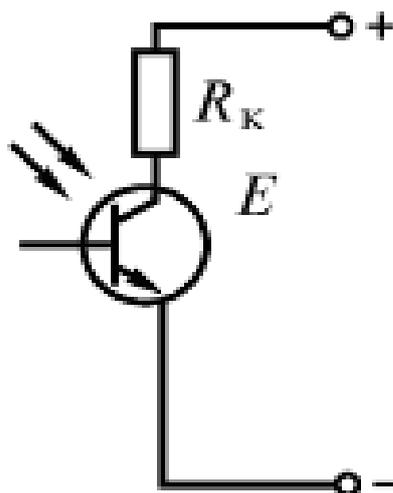


Рисунок 1.3. Схема включения

Они имеют линейную световую характеристику, а выходные ВАХ аналогичны ВАХ обычного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, но в качестве параметра вместо тока базы выступает световой поток. Чувствительность фототранзисторов достигает 1 А/лм. Параметры фототранзисторов существенно зависят от температуры.

Фототиристор – фотоэлектронный прибор, имеющий четырехслойную структуру, как обычный тиристор, но управляемый световыми импульсами. При освещении тиристора он включается.

Динамические свойства АИМС

Аналоговые интегральные микросхемы предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. В них любому допустимому значению входного сигнала соответствует определенное значение выходного.

Параметры, которые характеризуют качество аналоговых интегральных микросхем, весьма многочисленны. Все параметры аналоговых интегральных микросхем делятся на статические, динамические и эксплуатационные.

К динамическим свойствам (характеристикам) относятся следующие параметры:

1. Полоса единичного усиления. Обозначается – f_T , ω_T , размерность характеристики, МГц, рад/с. Определяется как частота, на которой коэффициент усиления операционного усилителя уменьшается до единицы. Значения у большинства аналоговых интегральных микросхем лежат в диапазоне от десятых долей мегагерца до нескольких десятков мегагерц.

2. Частота среза, частота по уровню 3дБ. Обозначается – f_{cp} , ω_{cp} , размерность характеристики, Гц, рад/с. Определяется как частота первого полюса амплитудно-частотной характеристики.

3. Полоса пропускания максимальной мощности, обозначается – f_p , размерность – КГц. Определяется как частота, до которой сохраняется максимальная амплитуда выходного напряжения.

4. Максимальная скорость нарастания выходного напряжения. Обозначается – U . Размерность В/мкс. Определяется при подаче на вход импульсов прямоугольной формы. Для типовых интегральных операционных усилителей максимальная скорость нарастания лежит в диапазоне 0,3-50 В/мкс. Так как наибольшая скорость изменения выходного сигнала пропорциональна амплитуде и частоте этого сигнала, то ограничение скорости изменения выходного сигнала приводит к ограничению амплитуды выходного неискаженного гармонического сигнала на высоких частотах.

5. Время установления выходного напряжения. Размерность – мкс. Обозначается – $t_{уст}$. Определяется для заданной относительной погрешности от полной шкалы.

Данные параметры, характеризующие быстродействие операционных усилителей, можно разделить на две категории. К первой относятся частота среза АЧХ на уровне 3дБ $f_{ср}$, частота единичного усиления f_T и время установления – $t_{уст}$. Их обычно называют малосигнальными динамическими параметрами, подразумевая их измерение в линейном режиме работы ОУ ($U_{вх} = 50$ мВ в ОУ на биполярных транзисторах и $U_{вх} < 1$ В с полевыми транзисторами на входе). Ко второй категории относятся скорость нарастания U и мощностная полоса пропускания f_p , их обычно называют динамическими параметрами большого сигнала, подразумевая их измерение при $U_{вх} > 1$ В.

Динамические показатели ОУ зависят от использованного в нем метода коррекции и параметров элементов корректирующих цепей.

Глава 1.2. Усилители постоянного тока

Общие сведения

В устройствах автоматического управления, регулирования и контроля часто регистрируются величины, изменение которых во времени происходит чрезвычайно медленно, т.е. их частота составляет всего лишь единицы или даже доли герца. Для усиления таких медленно изменяющихся напряжений или токов необходимы усилители, полоса пропускания которых имеет нижнюю границу $f_n = 0$. Усилители, обладающие этим свойством, носят название *усилителей постоянного тока (УПТ)* независимо от того, какая из величин – ток или напряжение – подлежит усилению, а также независимо от значения верхней частоты рабочего диапазона частот. При этом необходимо подчеркнуть, что обычно основная информация заключается не в исходном постоянном напряжении, а в его последующих изменениях, не важно в каких, медленных или быстрых (с частотами до $f_с$).

Типичная АЧХ таких усилителей приведено на рисунке 1.4.

Следует обратить внимание на то, что в области высших частот АЧХ не отличается от характеристики усилителей с резистивно-емкостной связью.

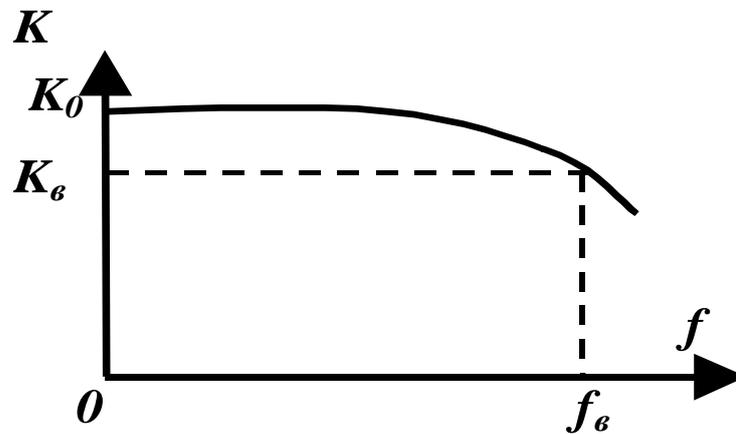


Рисунок 1.4. Амплитудно-частотная характеристика УПТ

При усилении слабых электрических сигналов одного каскада обычно оказывается недостаточно, поэтому приходится применять, как и в случае усилителя переменных сигналов, усилитель, состоящий из нескольких каскадов.

Соединение каскадов между собой, не представляющее сложности в усилителях переменного напряжения, при усилении постоянного тока или напряжения сопряжено с преодолением больших сложностей. Это, прежде всего, обусловлено тем, что в усилителях постоянного тока для связи выхода предшествующего каскада с входом последующего не могут быть применены ни трансформаторы, ни разделительные конденсаторы. Поэтому единственной схемой межкаскадной связи, пригодной для усилителей постоянного тока прямого усиления, является схема гальванической связи. Такая связь вносит в усилитель постоянного тока ряд специфических особенностей, затрудняющих как построение усилителя, так и его эксплуатацию.

Усиление постоянных напряжений и токов можно осуществляется двумя принципиально различными методами: непосредственно по постоянному току и с предварительным преобразованием постоянного тока в переменный. В соответствии с этим усилители постоянного тока делятся на два основных типа: усилители прямого усиления и усилители с преобразованием.

УПТ прямого усиления

Все схемы усилителей, рассмотренные в предыдущих разделах, для УПТ не годятся, т.к. в них связь между каскадами осуществляется через разделительные конденсаторы или трансформаторы, через которые невозможно пропустить ультранизкочастотные колебания. Для межкаскадной связи здесь пригодны элементы, сопротивление которых в широком диапазоне частот от $f_n = 0$ и выше остаются практически неизменными. В качестве таких элементов могут быть использованы резисторы, стабилитроны, диоды. Применяется также непосредственное присоединение выхода предыдущего каскада к входу последующего. Примеры построения таких схем приведены на рисунке 1.5

(показано только два каскада, на элементах которых поставлены необходимые для анализа обозначения).

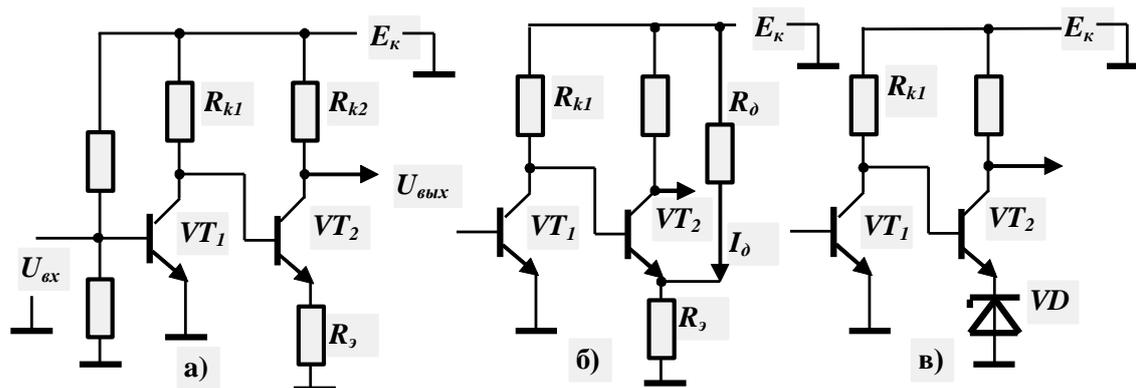


Рисунок 1.5. Схема УПТ с непосредственной связью и увеличением напряжения на эмиттере

Как видно из рисунка, высокое выходное постоянное напряжение предыдущего каскада непосредственно подается на базу последующего. Это не только необходимо учитывать при расчете напряжения смещения второго транзистора, но и также может привести к выходу его из строя. Поэтому в схемах УПТ прямого усиления необходимо либо увеличивать напряжение на его эмиттере, либо уменьшать напряжение на базе последующего каскада.

В схемах рисунка 1.5 использован первый подход: в цепь эмиттера введены дополнительные элементы – резистор или стабилитрон. Кроме повышения напряжения эмиттера это приводит к образованию отрицательной обратной связи, которая уменьшает коэффициент усиления схемы. Например, в первых двух схемах коэффициент усиления второго каскада

$$K_u \approx \frac{R_{k2}}{R_э} \quad (1.1)$$

Избавиться от обратной связи, как это было в эмиттерной стабилизации с помощью шунтирующего конденсатора невозможно, т.к. нижняя частота каскада $f_H = 0$. Для ослабления обратной связи необходимо уменьшить величину резистора $R_э$. На схеме рисунка 1.5, б это сделано в результате пропускания через него тока от источника питания ($E_к$). В таком случае, при

$$\left(R_э = \frac{U_{R_э}}{I_{Э2} + I_д} \right)$$

одинаковом напряжении $U_э$, сопротивление резистора будет меньше, чем в предыдущей схеме, когда через него протекал только ток эмиттера $I_{Э2}$. На схеме рисунка 1.5, в в цепи эмиттера использован стабилитрон. В этом случае величина сопротивления в цепи эмиттера будет определяться динамическим сопротивлением стабилитрона. Можно вместо стабилитрона включать источник ЕДС.

Уменьшение напряжения на базе последующего транзистора осуществляется с помощью делителя выходного напряжения первого каскада (рисунок 1.6).

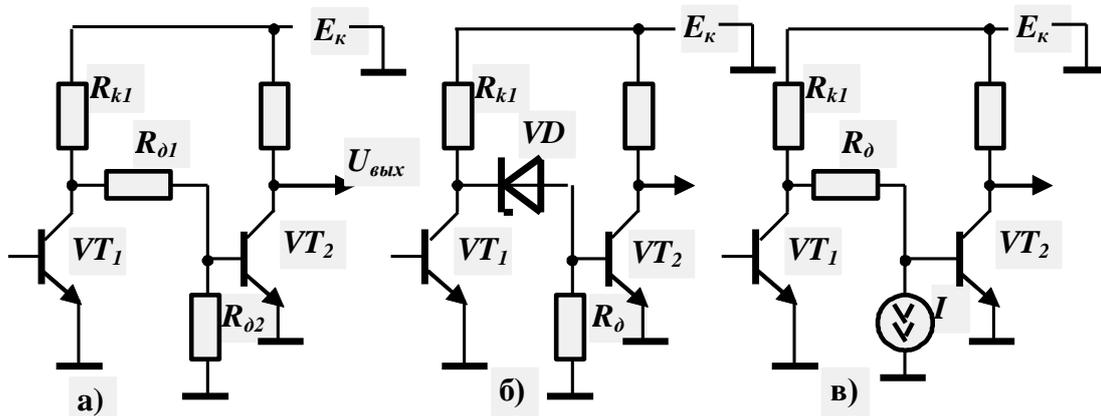


Рисунок 1.6. Схема УПТ с непосредственной связью и уменьшением напряжения на базе

Уменьшение напряжения, получаемое за счет использования простейшего резистивного делителя (рисунок 1.6, а) нецелесообразно. В этом случае во столько раз уменьшается постоянное напряжение на базе, во столько же раз уменьшается суммарный коэффициент усиления всей схемы. Для того, чтобы это не происходило, можно в качестве верхнего плеча делителя напряжения включать источник ЭДС или стабилитрон (рисунок 1.6, б) или в нижнее плечо – источник тока (рисунок 1.6. в). Необходимо отметить, что включение стабилитрона по рисунку 1.5, б предпочтительнее, чем в схеме рисунка 1.6, б, т.к. ток эмиттера существенно больше тока базы и стабилитрон работает в лучшем режиме.

Напряжение смещения нуля и его дрейф

При разработке усилителя обычно задают начальный (исходный) уровень входного сигнала и диапазон его изменения в определенном частотном диапазоне. Как частный случай начальный входной сигнал может быть равен нулю ($U_{вх\ нач} = 0$). Этому начальному сигналу должен соответствовать какой-то выходной сигнал. Частный случай выходного сигнала – $U_{вых} = 0$ при $U_{вх\ нач} = 0$, что можно добиться в результате использования нескольких источников питания, различных схемных решений, подобных, например, тем, которые использованы в операционных усилителях. Для более простых схем исходное выходное напряжение ($U_{вых}$ при $U_{вх\ нач}$) обычно отличается от нуля. Например, в схемах оно будет равно напряжению на коллекторе второго транзистора при $U_{вх} = U_{вх\ нач}$. Показана зависимость этого напряжения от разброса номиналов резисторов и параметров транзистора даже для одного каскада. Конечно, можно опытным путем определить величину выходного напряжения при подаче на вход исходного начального сигнала и последующие изменения определять

относительно этого значения. Но при большом количестве экземпляров однотипных усилителей такой подход будет нерациональным. Обычно указывают определенную величину выходного напряжения при исходном уровне входного. Ее определяют на основе статистических измерений и расчетов.

Каждый экземпляр усилителя может иметь индивидуальное выходное напряжение (при $U_{вх\ нач} = 0$), отличающееся от нормативного. Это отклонение называют *напряжением смещения нуля*. Объяснение такому наименованию следует искать в операционных усилителях – наиболее массовом типе УПТ. У них за начальный уровень входного сигнала принято напряжение, равное нулю, а соответствующее выходное при двуполярном симметричном питании также должно быть равно нулю. Поэтому для них напряжение смещения нуля – это напряжение на выходе при закороченном (нулевом) входе, причем оно отсчитывается относительно земли (нуля).

Более выгодным является пересчет напряжения смещения нуля во входную цепь:

$$U_{см\ вх} = \frac{U_{см\ вых}}{K}, \quad (1.2)$$

где $U_{см\ вх}$ – приведенное (ко входу) напряжение смещения нуля;

$U_{см\ вых}$ – напряжение смещения нуля на выходе усилителя;

K – коэффициент усиления.

Можно считать, что это напряжение всегда приложено ко входу УПТ (рисунок 1.7), вызывая появление на выходе дополнительного напряжения, не обусловленного входным полезным сигналом.

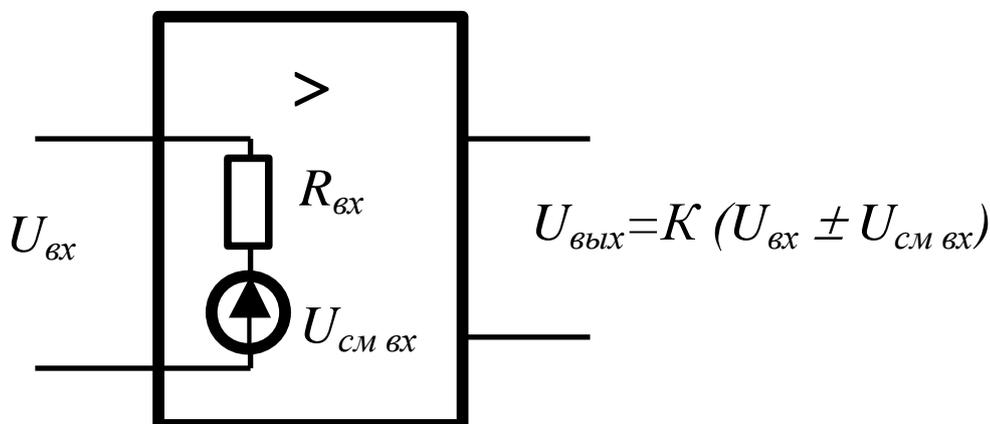


Рисунок 1.7. УПТ с источником напряжения смещения нуля, приведенного ко входу

Такой подход сразу же показывает один из методов борьбы с напряжением смещения нуля – надо на вход усилителя подать (кроме входного полезного сигнала) еще дополнительное напряжение, по величине равное $U_{см\ вх}$, но

противоположное ему по знаку. Дополнительное напряжение скомпенсирует $U_{см\ вх}$, и изменение выходного напряжения будет отображать изменение входного информационного сигнала. В операционных усилителях, которые, как было указано выше, являются самыми распространенными типами УПТ, приводимые в технической литературе значения напряжения смещения нуля являются напряжениями смещения нуля, приведенными ко входу. В определении этого параметра операционных усилителей указывается, что $U_{см}$ – это то напряжение, которое необходимо подать на вход в отсутствие информационного сигнала, при котором выходное напряжение становится равным нулю.

Большим недостатком УПТ прямого усиления, которое резко сужает их область применения, является зависимость их характеристик и параметров от дестабилизирующих факторов – температуры, напряжения источника питания, сопротивления нагрузки и т.п. Их влияние, прежде всего, проявляется в нестабильности положения рабочей точки. Подобная зависимость наблюдается и в каскадах усилителей переменного тока. Однако в них она не приводила к ухудшению параметров всей схемы. Даже если рабочая точка какого-либо каскада и изменилась, то это изменение не сказывалось на рабочей точке последующих каскадов, так как элементы межкаскадной связи (конденсаторы, трансформаторы) не пропускали на вход последующих каскадов постоянную составляющую. Поэтому никаких дополнительных мер, кроме стабилизации точки покоя отдельного каскада, в усилителях переменного тока обычно не предпринимается.

Для УПТ прямого усиления изменение напряжения на входе первого каскада (неважно, по каким причинам – из-за изменения входного полезного сигнала или из-за изменения положения рабочей точки, например, в связи с изменением температуры, старения элементов или любых других дестабилизирующих факторов) усиливается этим и последующими каскадами. Это приводит к тому, что даже при отсутствии входного сигнала и компенсации $U_{см\ вх}$ напряжение на выходе УПТ изменяется. Это явление получило название *дрейфа нуля*. Характеристика дрейфа для наиболее значимых дестабилизирующих факторов обычно приводится в технической документации на УПТ. Например, в параметрах операционных усилителей имеется показатель изменения напряжения смещения нуля при изменении температуры на один градус.

Напряжение дрейфа на выходе усилителя, даже при компенсации $U_{см}$, может оказаться одного порядка с напряжением сигнала или даже больше его. Поэтому наряду с такими методами уменьшения дрейфа, как стабилизация напряжения источников питания, применение глубокой отрицательной обратной связи и другие, используют сугубо схемотехнические меры, связанные с рациональным выбором элементов и построением самих схем усиления.

Основными методами повышения устойчивости УПТ являются:

1. Применение балансных (мостовых) схем.
2. Преобразование постоянного напряжения в переменное и усиление

переменного напряжения с последующим выпрямлением (усиление с модуляцией и демодуляцией сигнала – МДМ).

Балансные схемы УПТ

Балансные УПТ строятся на основе схемы сбалансированного четырехплечного уравновешенного моста: два одинаковых усилительных элемента, работающие в идентичном режиме, образуют два плеча моста, а другими двумя плечами являются два одинаковых резистора R_k в их коллекторной цепи. Каскады могут быть выполнены на основе как биполярных, так и полевых транзисторов. Типовая балансная схема транзисторного УПТ приведена на рисунке 1.8.

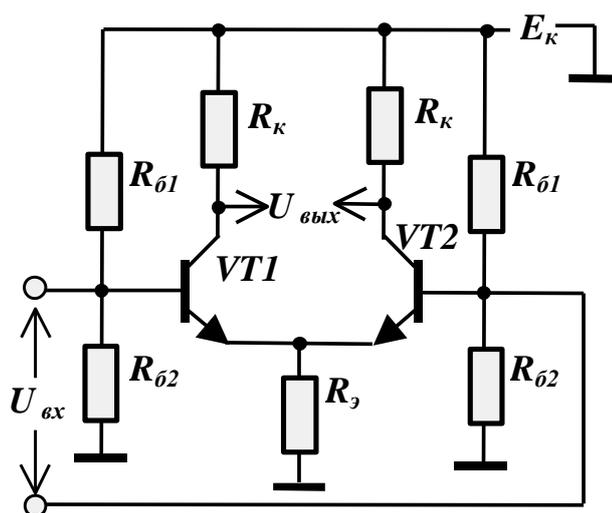


Рисунок 1.8. Балансная схема УПТ

Данная схема по существу представляет собой мост, плечами которого являются коллекторные резисторы R_k и внутренние сопротивления транзисторов $VT1$ и $VT2$. Резисторы $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ входят в делители напряжения источника питания и служат для выбора исходного режима работы транзисторов. В объединенную эмиттерную цепь включен резистор $R_э$. К одной из диагоналей моста подведено напряжение источника питания E_k , а с другой – снимается выходное напряжение (нагрузку каскада подключают между коллекторами транзисторов):

$$U_{вых} = U_{KVT1} - U_{KVT2}. \quad (1.3)$$

Для нормальной работы схемы необходима полная симметрия плеч. В этом случае в исходном состоянии (до поступления входного сигнала) мост окажется сбалансированным, а напряжение на его выходе будет равно нулю. Реально симметрия достигается, прежде всего, выбором согласованной пары

(идентичных) транзисторов и вспомогательных элементов каскада (резисторов цепей смещения, стабилизации и т.п.). Нередко используются транзисторные сборки, в которых оба активных элемента выполняются в едином технологическом процессе на одной подложке, в непосредственной близости друг от друга. Если в схеме обеспечена абсолютная симметрия, то выходное напряжение не изменяется из-за действия дестабилизирующих факторов (температуры и других внешних факторов).

При полной симметрии плеч токи покоя обоих транзисторов, а также их отклонения в случае изменения режима (например, при изменении напряжения E_k , изменении температуры и т.п.) имеют равную величину. Потенциалы коллекторов при этом также равны или получают одинаковые приращения напряжений. Поэтому при одинаковом воздействии дестабилизирующих факторов на оба транзистора одновременно баланс моста не нарушается и выходное напряжение не появляется, т.е. напряжение дрейфа равно нулю.

При подаче входного сигнала любой полярности состояние транзисторов меняется в разных направлениях (один транзистор приоткрывается, другой прикрывается), так как на их базы действуют разные по знаку напряжения. Мост разбалансируется. Следовательно, потенциалы коллекторов транзисторов получают одинаковые по величине, но противоположные по знаку приращения. Появляется выходное напряжение, величина и полярность которого зависят только от величины и полярности входного напряжения. Таким образом, амплитудная характеристика балансной схемы принципиально не должна отличаться от прямой линии, проходящей через начало координат.

Вместе с тем на резисторе R , не создается напряжение обратной связи для переменных составляющих токов $\Delta I_{\beta 1}$ и $\Delta I_{\beta 2}$, вызванных действием полезного сигнала. Это объясняется тем, что токи эмиттеров обоих транзисторов под воздействием сигнала получают равные, но противоположные приращения ($\Delta I_{\beta 1} = -\Delta I_{\beta 2}$), так как потенциалы баз всегда противоположны друг другу (когда на базу $VT1$ от источника сигнала подается плюс, на базу $VT2$ – минус и наоборот). Следовательно, коэффициент усиления схемы не уменьшается. Обратите внимание на то, что входное и выходное напряжения не связаны с потенциалом земли (общим проводом). Конечно, можно оперировать напряжением на каждом из таких входов или выходов по отношению к земле, однако в таких случаях принято использовать понятия дифференциального и синфазного напряжений. *Дифференциальное напряжение* представляет собой разность входных (выходных) напряжений:

$$U_{диф} = U_1 - U_2.$$

Синфазное напряжение можно определить как полусумму напряжений:

$$U_{син} = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (1.4)$$

В таком случае напряжения на входе балансного усилителя можно представить следующим образом (рисунок 1.9).

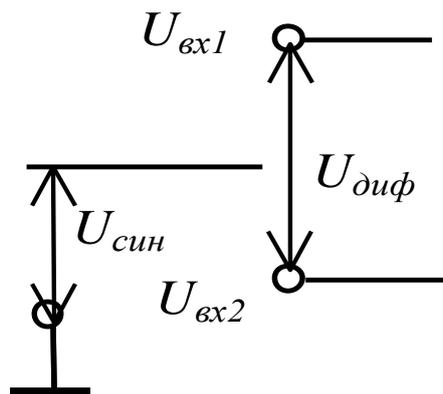


Рисунок 1.9. Дифференциальное и синфазное напряжение

Дифференциальное напряжение равно нулю, если два входа каскада соединить между собой. В таком случае все входное напряжение представляет собой синфазное входное напряжение. В полностью сбалансированном балансном каскаде в этом случае выходное напряжение будет равно нулю, причем для любого значения синфазного сигнала. Таким образом, балансные усилители усиливают только дифференциальную составляющую и не усиливают синфазную составляющую.

При рассмотрении балансовых схем выделяют дифференциальные и синфазные коэффициенты усиления. Их величину можно определить таким образом.

При подаче на входы двух одинаковых, но противоположных по знаку напряжений (в этом случае синфазное напряжение равно нулю) транзисторы работают в противофазе. Поэтому при одинаковом воздействии на каждый из транзисторов одинакового напряжения баланс моста не нарушается и выходное напряжение не появляется. Воздействие дифференциальной составляющей приводит к разбалансу моста (было описано выше).

В реальных балансных схемах всегда имеется некоторая асимметрия. Поэтому напряжение дрейфа на выходе полностью не исчезает. Однако дрейф нуля в балансных схемах определяется разностью токов обоих транзисторов и поэтому значительно меньше, чем в обычных схемах прямого усиления. Также на выходе появляется сигнал, определяемый синфазной составляющей входного сигнала.

Дифференциальный усилитель. Входные токи смещения

При построении многокаскадных схем УПТ балансные каскады можно соединять друг с другом непосредственной связью. При этом коллекторы предыдущего каскада соединяются с базами последующего.

В некоторых случаях выходной сигнал в балансном каскаде снимается с одного из коллекторов, а входные сигналы поступают на базы обоих транзисторов (рисунок 1.10). Такая схема имеет симметричный вход и несимметричный выход (либо с коллектора $VT1$, либо с коллектора $VT2$). Фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала $U_{вх1}$ и противоположна фазе сигнала $U_{вх2}$. Элементы схемы можно подобрать так, что выходное напряжение будет пропорционально разности входных напряжений и в идеальном случае не будет изменяться, если напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ получают равные приращения одного знака. Такой усилительный каскад называют *дифференциальным*.

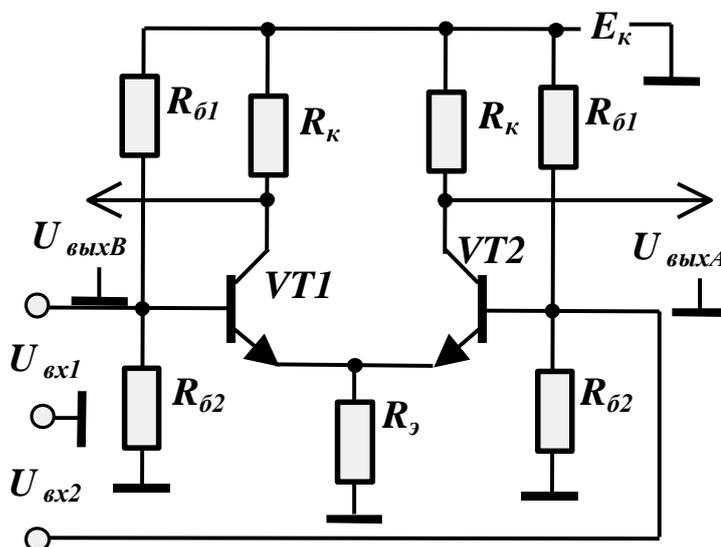


Рисунок 1.10. Балансная схема УПТ

Так как такие усилители усиливают разность входных сигналов, то можно считать, что один из входов усиливается с положительным коэффициентом усиления, а другой – с отрицательным. Поэтому часто такие входы называются соответственно неинвертирующим (прямым) и инвертирующим (инверсным).

Дифференциальный усилитель характеризуется коэффициентом усиления разности входных напряжений, а также коэффициентом усиления среднего уровня входных напряжений (синфазный сигнал):

$$K_{диф} = \frac{K_1 + |K_2|}{2}, \quad (1.5)$$

$$K_{син} = K_1 - |K_2|, \quad (1.6)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты усиления по первому и второму входам (с учетом возможной асимметрии каналов).

Разностный сигнал (т.е. дифференциальная составляющая входного напряжения) есть полезный сигнал, который необходимо усилить, синфазная же составляющая является помехой, которая не должна проникать на выход,

т.е. должна быть ослаблена. Подобная ситуация возникает при передаче информации (например, сигналов от датчиков) по длинным линиям связи (проводам). На оба эти провода действуют одни и те же напряжения помех и шумов, которые образуют синфазную составляющую входного сигнала. Дифференциальные каскады на входе усилителя резко уменьшают величину помех и шумов и усиливают полезный сигнал.

Для того чтобы усилитель реагировал только на разность входных напряжений, необходимо выполнение неравенства $K_{син} \ll K_{диф}$. А для этого, как следует из выражений (1.5) и (1.6), необходимой является одинаковость значений коэффициентов усиления по обоим каналам.

Рассмотрим некоторые варианты построения каскадов дифференциальных усилителей (ДУ). Дифференциальный каскад может иметь два выхода, сигналы на которых противофазные, поэтому их можно использовать в качестве фазоинверсных каскадов (рисунок 1.11, а). Если используется только один вход дифференциального усилителя, то коллекторный резистор противоположного плеча можно исключить из схемы (рисунок 1.11, б).

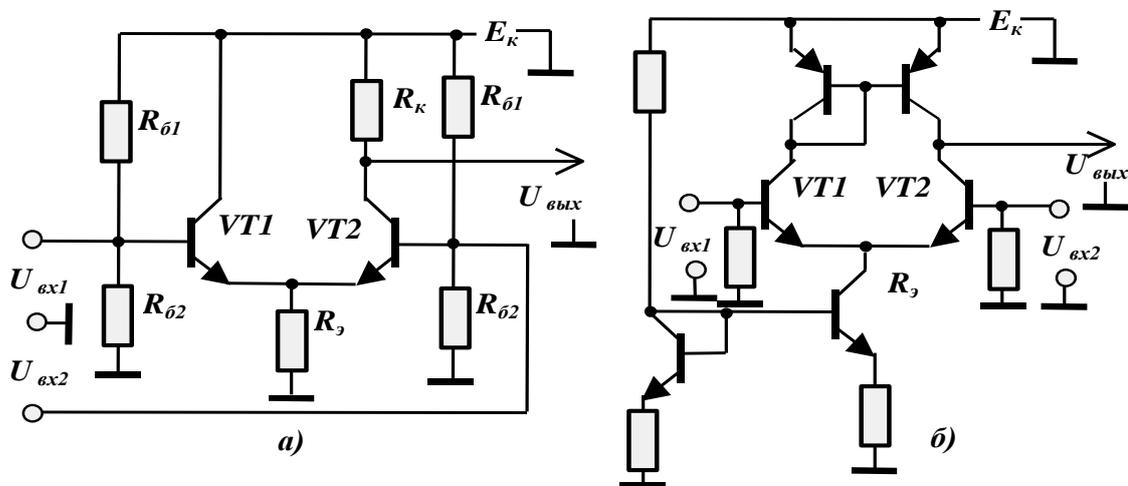


Рисунок 1.11. Модифицированные схемы дифференциальных усилителей

Для увеличения дифференциального коэффициента необходимо увеличить сопротивление в цепи коллектора, а для уменьшения синфазного – увеличить сопротивление в цепи эмиттера. Просто увеличить этот резистор нецелесообразно, так как это приводит к уменьшению коллекторного тока транзисторов. Поэтому очень часто в эти цепи вводят источники тока (рисунок 1.11), которые строят на основе транзисторных структур. В этих случаях наиболее часто применяют двухполярный источник питания. Наличие двухполярного источника позволяет не только более гибко организовать питание всех элементов схемы, но и более жестко привязать входные сигналы к нулевому потенциалу (земле).

Причиной появления не равного нулю напряжения на выходе ($U_{вых} \neq 0$) при $U_{вхнач} = 0$ может быть не только напряжение смещения нуля и его дрейф, но также входные токи ДУ. Эти токи появляются в цепях, через которые подаются сигналы на входы. Например, в схемах токи во входных цепях будут

обусловлены их подсоединением через делитель в цепях баз транзисторов к источнику питания. В схеме рисунка 1.12 – перераспределением токов баз входных транзисторов. Необходимо отметить, что величина этих токов не определяется подаваемыми входными сигналами, а определяется схемотехникой входных каскадов ДУ. Обычно считают, что во входных цепях каждого входа имеется отдельный источник тока. Для определения влияния этих токов на выходное напряжение представим дифференциальный усилитель, на входы которого подано два сигнала U_1 и U_2 (рисунок 1.12).

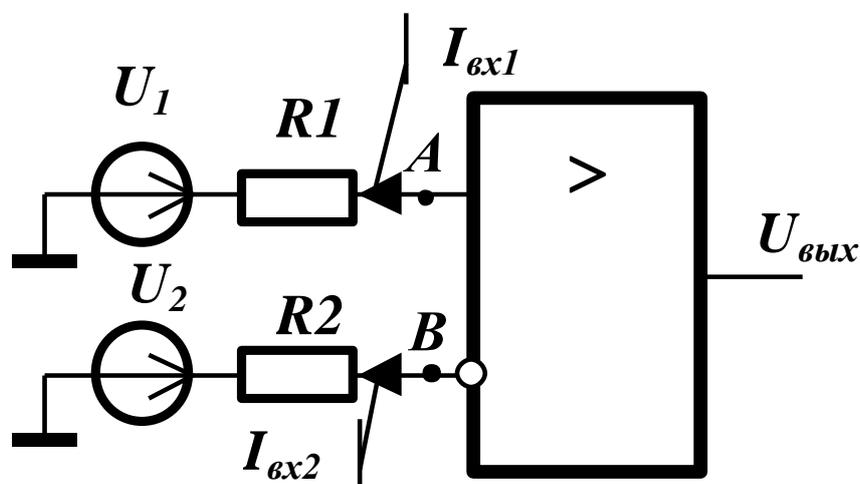


Рисунок 1.12. Влияние входных токов смещения

Сигналы поступают на прямой и инверсный входы через резисторы $R1$ и $R2$. Эти резисторы формируются за счет внешних резисторов и выходного сопротивления источников сигнала. Как частный случай, одно из них (или оба) могут быть равны нулю.

Пусть ДУ имеет нулевое напряжение смещения нуля ($U_{см\ вх} = 0$) и $K_{сип} = 0$, поэтому

$$U_{вых} = K_{диф}(U_A - U_B), \quad (1.7)$$

где U_A и U_B – напряжения в точках A и B (на прямом и инверсном входе ДУ), которые равны:

$$U_A = U_1 - I_1 \cdot R1; \quad U_B = U_2 - I_2 \cdot R2.$$

Подставляя их в (1.7), получаем

$$U_{вых} = K_{диф}(U_1 - U_2) - K_{диф}(I_1 \cdot R1 - I_2 \cdot R2). \quad (1.8)$$

Из последнего выражения следует, что даже в отсутствие входного дифференциального напряжения ($U_1 - U_2 = 0$) напряжение на выходе может отличаться от нулевого:

$$U_{вых} = -K_{диф} (I_1 \cdot R1 - I_2 \cdot R2) \quad (1.9)$$

Как было указано выше, при конструировании балансных схем стремятся к максимальной симметрии каналов, поэтому можно предположить, что в реальных усилителях и токи должны быть близкими по величине. Это подсказывает путь для уменьшения напряжения смещения нуля, обусловленного входными токами: необходимо сделать одинаковыми сопротивления резисторов во входных цепях ($R1 = R2 = R$). Тогда напряжение смещения нуля будет определяться разностью входных токов:

$$U_{вых} = K_{диф} R \cdot (I_2 - I_1) = K_{диф} R \cdot \Delta I \quad (1.10)$$

Реально разность входных токов сдвига примерно в 10 раз меньше, чем сам входной ток. Типичные соотношения между ними приводятся в справочниках [2-5].

Дифференциальные усилительные каскады являются в настоящее время распространенной конфигурацией многих схем в интегральном исполнении, в частности, они используются во входных каскадах интегральных операционных усилителей.

УПТ типа МДМ

Применение балансных схем и стабилизация источников питания позволяют снизить дрейф нуля УПТ прямого усиления до величины, в лучшем случае 10 мкВ/час. Поэтому для усиления сигналов меньшей величины применяется УПТ с преобразованием (УПТ МДМ – усилители постоянного тока типа «модулятор демодулятор»), структурная схема которого представлена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13. Структурная схема УПТ с преобразованием

¹ Полярность выходного напряжения зависит от реального направления входных токов.

На вход модулятора кроме медленно меняющегося напряжения сигнала поступает еще и сигнал от генератора. Обычно это синусоидальный сигнал ($U_2 = U_m \sin(\omega t + \varphi)$), частота которого должна быть значительно выше верхней частоты входного сигнала. В модуляторе происходит изменение (модуляция) одного из параметров сигнала генератора в соответствии с входным сигналом. Если изменяется амплитуда (U_m), то имеет место так называемая амплитудная модуляция, если частота (ω), – то частотная, если фаза (φ), – то фазовая. Может быть использована и комплексная модуляция, например, амплитудно-фазовая или иная. В результате модуляции информация о входном сигнале переходит на результирующий (промодулированный) высокочастотный сигнал, который поступает на вход усилителя переменного напряжения. На рисунке 1.14 приведены графики сигналов в узловых точках усилителя: входного ($U_{вх}$), генератора (U_2) и сигнала на выходе модулятора (U_m) при использовании амплитудной модуляции. Как видно из графиков, огибающая выходного сигнала модулятора в этом случае изменяется в соответствии с входным сигналом.

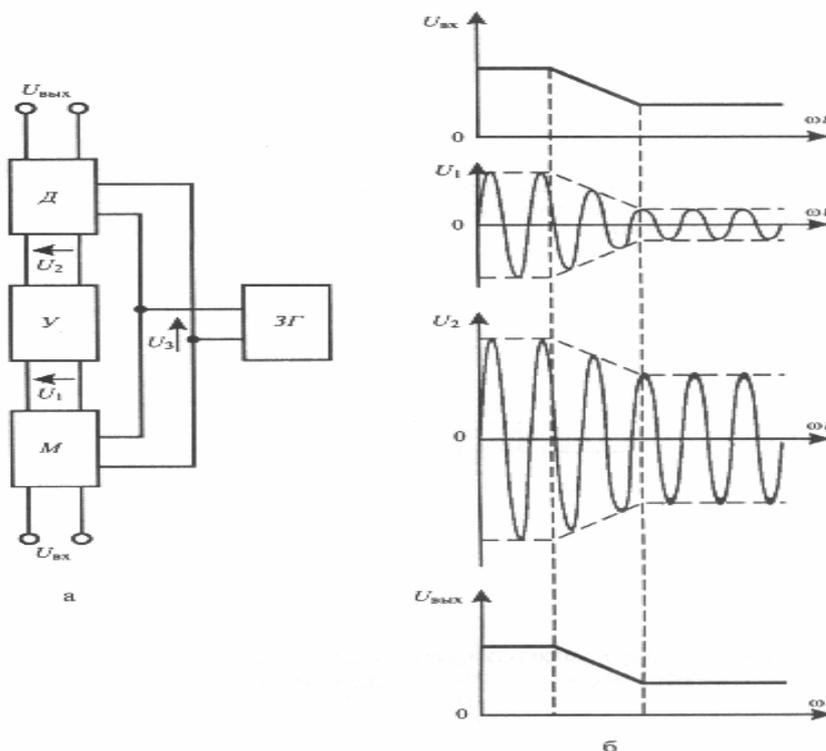


Рисунок 1.14. Временные диаграммы УПТ с преобразованием

В схеме используется усилитель переменного тока, который обеспечивает увеличение амплитуды сигнала U_m в K раз. В демодуляторе происходит процесс, обратный модуляции: из высокочастотного промодулированного сигнала выделяется его низкочастотная составляющая, которая теперь оказывается усиленной. Подача на демодулятор (в радиотехнике его часто называют детектором) также сигнала генератора позволяет повысить эффективность процесса демодуляции.

Дрейф нуля УПТ с преобразованием определяется фактически только дрейфом модулятора, потому что усилитель переменного напряжения практически не имеет дрейфа, а дрейфом демодулятора можно пренебречь, так как на его вход подается сравнительно большое напряжение, значительно превышающее напряжение возможных помех. На рисунке 1.14 приведены временные диаграммы, характеризующие работу схемы УПТ.

УПТ типа МДМ выполняются обычно в виде законченных интегральных схем, имеющих в своем составе все необходимые блоки.

Глава 3. Операционные усилители

Общие сведения

Операционным усилителем (ОУ) называется усилитель, который характеризуется определенным набором параметров, позволяющих ему выполнять математические операции (сложения, вычитания, интегрирования и т.д. и т.п.). Это свойство и определило наименование «операционный усилитель». Первоначально усилители такого класса предназначались для выполнения математических операций в аналоговых вычислительных машинах. Основными параметрами, обеспечивающими его «математические способности», являются:

- ◆ большой коэффициент усиления по напряжению (в идеале $K \Rightarrow \infty$);
- ◆ большое входное сопротивление (в идеале $R_{вх} \Rightarrow \infty$);
- ◆ нижняя частота усиливаемых сигналов $f_n = 0$.

Последний параметр указывает на то, что ОУ должен быть усилителем постоянного тока. Объясняется это требование тем, что одной из распространенных математических операций есть действия с константами, например, сложения переменных с константами. В этом случае математическая переменная будет реализовываться изменяющимся сигналом, константа – постоянным. В настоящее время сфера применения ОУ значительно расширилась и во многих случаях требование $f_n = 0$ не является обязательным и даже иногда вредным. Однако превратить УПТ в усилитель переменного тока можно достаточно просто (например, вводя разделительные емкости). Поэтому большинство массовых операционных усилителей выпускаются как усилители постоянного тока.

Условное обозначение ОУ приведено на рисунке 1.15. В обозначении функции ($\infty >$ – усилитель с бесконечно большим коэффициентом усиления) первый символ (∞) часто опускается.

Операционные усилители имеют два входа (инвертирующий и неинвертирующий) и один выход. Таким образом, ОУ является дифференциальным усилителем. Это позволяет при «математическом» варианте использования усилителя достаточно просто осуществить операцию вычитания, при иных – улучшить многие параметры устройства, например, избавляться от синфазного сигнала, реализовывать цепи как положительной,

так и отрицательной обратной связи и т.п. На схеме инвертирующий вход обозначают кружком.

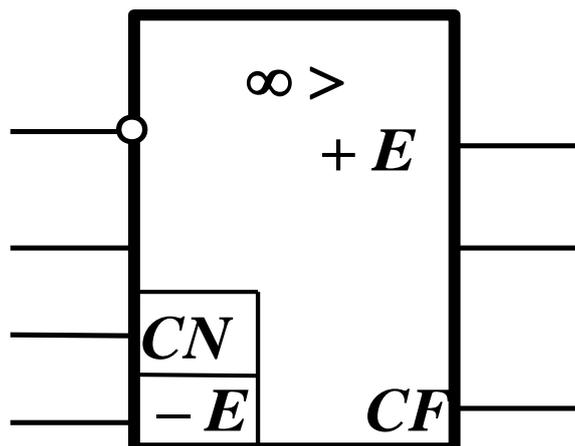


Рисунок 1.15. Условное обозначение операционного усилителя

Обычно операционные усилители имеют два вывода подключения питания *минус E* и *плюс E*. Выводы, служащие для коррекции нуля операционных усилителей, обозначаются символами *NC* (**N**ull **C**orrection) а те, к которым подключаются элементы частотной коррекции, — *FC* (**F**requency **C**orrection). Более подробная информация о назначении таких выводов будет приведена далее. Следует отметить, что в некоторых типах **ОУ** выводы коррекции могут отсутствовать. Обозначения функций выводов могут быть как отделены от основного поля, так и не иметь ограничительных линий.

Первые операционные усилители выполнялись на электронных лампах, в настоящее время они изготавливаются в интегральном исполнении в виде микросхем (**МС**). Благодаря своим отличным характеристикам и параметрам, универсальности применения, низкой стоимости, операционные усилители в настоящее время вытесняют транзисторные схемы при проектировании аналоговых устройств. Многие **МС**, выполняющие сложные функции по обработке аналоговых сигналов, строятся на основе схем, близких к схемам **ОУ**, либо включают в себя **ОУ** в виде собственных фрагментов.

Структурная схема **ОУ**

Операционный усилитель обычно выполняется по схеме усилителя напряжения из нескольких каскадов и состоит из нескольких десятков биполярных или полевых транзисторов, резисторов и иногда конденсаторов. Очень широко в **ОУ** используются источники тока (для увеличения коэффициентов усиления, задания рабочих точек и т.п.). Входной каскад выполняется по дифференциальной схеме. Использование двуполярных источников питания позволяет обеспечить подачу двух входных сигналов, напряжение которых отсчитывается относительно общей земли. Во многих

применениях один из входов непосредственно (или через внешний резистор) соединен с землей.

Выходной каскад строится по одной из схем двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности затем включается каскад с общим эмиттером и на выходе **ОУ** – эмиттерный повторитель. Как правило, выходной каскад имеет схему защиты от перегрузок по току.

Для того, чтобы обеспечить нулевое значение выходного напряжения при отсутствии входных сигналов, в **ОУ** имеется узел, задачей которого является понижение напряжения с выхода **ДУ** (с коллектора выходного транзистора) до нуля. Зачастую этот «преобразователь уровня» выполняется в виде активного усилительного каскада.

Следует отметить, что иногда в категорию **ОУ** включаются усилители, выполненные как усилители тока или как **УПТ МДМ**, имеющие другую внутреннюю структуру, но характеризующиеся значениями параметров, указанными выше.

Основные характеристики и параметры **ОУ**

Подавляющее большинство **ОУ**, как было сказано ранее, имеет на входе дифференциальный каскад, поэтому в **ОУ** различают инвертирующий и неинвертирующий входы (так же, как и в дифференциальных **УПТ**). Операционный усилитель усиливает разность входных сигналов, его дифференциальный коэффициент усиления $K_{диф}$, как уже отмечалось выше, является весьма большим. Обычно его значение лежит в диапазоне 10000 ... 100000 (80 ... 100 дБ), и в новых **ОУ** имеет место тенденция к увеличению. Типовая амплитудно-частотная характеристика **ОУ** приведена на рисунке 1.16.

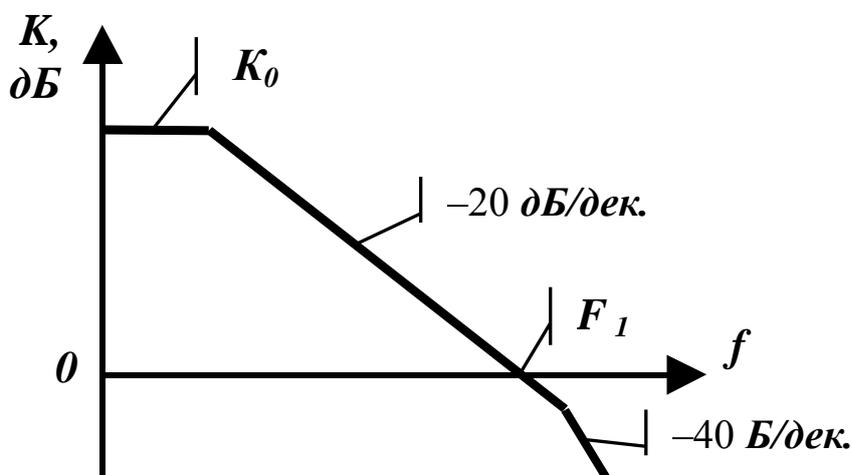


Рисунок 1.16. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика **ОУ**

Так как операционный усилитель представляет собой **УПТ**, поэтому его **АЧХ** имеет ненулевой коэффициент усиления на нулевой частоте. И указанные выше (и/или в технических условиях) коэффициенты усиления соответствуют

весьма узкому диапазону частот – от нуля до примерно нескольких десятков/сотен герц. Затем коэффициент усиления начинает уменьшаться со «скоростью» минус 20 дБ/декаду (6 дБ/октаву). Возможно увеличение скорости спада до минус 40 дБ/дек. и более. Эти точки перегиба стараются разместить на частотах выше так называемой *частоты единичного усиления* F_1 – частоты, на которой модуль коэффициента усиления равен единице. Типичное значение F_1 равно 1 ... 10 МГц. Точки перегиба соответствуют верхним частотам отдельных каскадов усилителя и устанавливаются при проектировании **ОУ**.

Кроме дифференциального входного сигнала, на **ОУ** может быть подан и синфазный входной сигнал, который, в результате несовершенства реальных схем, также проходит на выход. Характеристикой такого возможного проникновения является *коэффициент ослабления синфазной составляющей* **КОСС**, который показывает, во сколько раз коэффициент усиления синфазного сигнала меньше коэффициента усиления дифференциального сигнала:

$$КОСС = \frac{K_{син}}{K_{диф}} \quad (1.11)$$

Типичные значения **КОСС** – 60 ... 80 дБ, некоторые **ОУ** имеют – не менее 120 дБ.

Значительные величины как дифференциального, так и синфазного сигнала могут привести к пробоем входных цепей и к выходу усилителя из строя. Поэтому их максимальные значения регламентируются в технической документации на **ОУ**. Обычно максимальные значения дифференциального входного напряжения равны значению источника питания **ОУ**, однако для некоторых схем **ОУ** их величина не может превышать $\pm 0,5$ В.

Такие же ограничения необходимо выдерживать и для синфазного входного напряжения, но в большинстве **ОУ** их величина может быть большей, чем дифференциальное входное напряжение. Типичное значение максимального синфазного напряжения обычно равно напряжению питания, однако в некоторых случаях одно из них (положительное или отрицательное в зависимости от схемы входного каскада) может быть и больше.

При рассмотрении входных сопротивлений различают дифференциальное и синфазное входные сопротивления. Дифференциальное входное сопротивление обычно составляет величину порядка 1 ... 10 МОм, а синфазное – на несколько *порядков* больше. Входные сопротивления значительно увеличиваются в **ОУ** с полевыми транзисторами на входе.

Дифференциальное входное сопротивление измеряется между инвертирующим и неинвертирующим входом, а синфазное – между закороченными входами и землей. Эквивалентные схемы входных цепей **ОУ** представлены на рис. 1.17.

На рисунке синфазное входное сопротивление показано в виде двух

резисторов, сопротивление которых в два раза больше $R_{сшн}$.

Операционный усилитель является усилителем постоянного тока, поэтому для него характерны ограничения, свойственные всем УПТ. В частности, как и для любых УПТ, ему свойственны параметры, приводящие к появлению на выходе напряжения даже при нулевом дифференциальном напряжении на входе. Как показано в предыдущем разделе, к таким параметрам относятся:

- ◆ приведенное ко входу напряжение смещения (нуля);
- ◆ входные токи (смещения);
- ◆ разность входных токов (смещения),

а также изменение этих параметров (дрейф) от воздействия различных дестабилизирующих факторов. В справочниках наиболее часто приводят дрейф параметров при изменении температуры.

Разброс значений этих параметров, прежде всего, определяется типом используемых в ОУ транзисторов. Типичные значения входного напряжения сдвига для ОУ общего назначения – 1 ... 10 мВ при построении на биполярных транзисторах и больше 10 мВ – на полевых. Обусловлено это большей сложностью обеспечить идентичность параметров полевых транзисторов. Для прецизионных ОУ, в которых используются специальные технологические меры для балансировки каскадов (например, лазерная подгонка резисторов) или специальные схемотехнические меры (динамическая компенсация входных погрешностей), эта величина может быть на порядок меньше. Типичные величины дрейфа нуля при изменении температуры – 1 ... 10 мкВ/°С, а для прецизионных ОУ – в десятки раз меньше.

Входные токи ОУ – это токи баз или затворов транзисторов входного каскада. Соответственно, в ОУ на полевых транзисторах входные токи будут меньшими. Типичная величина входного тока составляет величину порядка 0,1 ... 1 нА (для схем ОУ с входным каскадом на биполярных транзисторах) и 1 пА (для схем ОУ с полевыми транзисторами на входе). У ОУ с полевыми транзисторами разность входных токов практически не отличается от величины самих входных токов. Это обусловлено тем, что в связи с незначительностью токов затворов полевых транзисторов, как сами входные токи, так и их разность соизмеримы с токами утечек, которые зависят от качества монтажа и состояния поверхности корпуса транзистора. Поэтому для ОУ на полевых транзисторах неэффективен предложенный выше метод снижения погрешности за счет обеспечения равенства сопротивлений резисторов во входных цепях.

Все вышеперечисленные параметры входят в эквивалентную схему, характеризующую вход ОУ. Она приведена на рисунке 1.17.

Широкое и разноплановое использование операционных усилителей обусловило большое разнообразие его характеристик и параметров. Приведем некоторые из них.

Для питания ОУ необходимо использовать двуполярные источники питания. Типовое значение напряжения этих источников – ± 15 В, однако большинство современных ОУ могут работать в широком диапазоне напряжений питания ± 6 ... 18 В. Существуют также ОУ, работающие как при

очень низких напряжениях – до $\pm 1,2$ В, так и при весьма больших – до ± 48 В. Некоторые **ОУ** (обычно специализированные) используют однополярный источник питания.

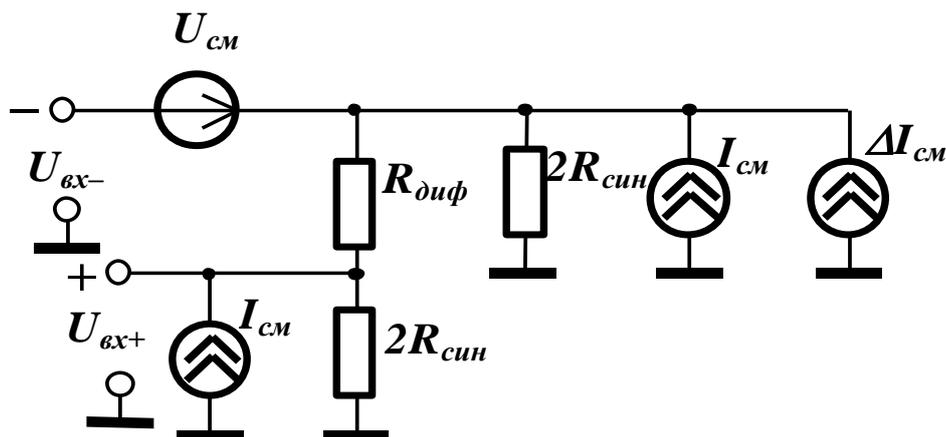


Рисунок 1.17. Эквивалентная схема замещения входной цепи **ОУ**

При отсутствии двуполярного источника питания или при нецелесообразности его использования (например, в переносной аппаратуре) можно с помощью дополнительных схем обеспечить работу **ОУ** одного источника питания. На рисунке 1.18 приведены упрощенные варианты подачи питающих напряжений на **ОУ** при использовании двух и одного источника питания.

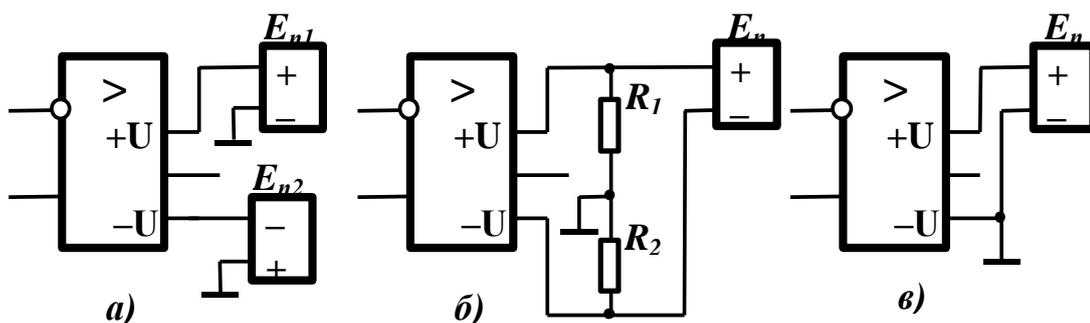


Рисунок 1.18. Подача питающих напряжений на **ОУ**

Наиболее распространенным является питание от двух симметричных источников с номинальным (типовым) напряжением. Однако на каждом из источников может быть установлено напряжение в пределах, допустимых для используемого типа **ОУ**. При питании от одного источника величина его напряжения должна лежать в диапазоне:

$$U_{+мин} + U_{-мин} \leq E_n \leq U_{+мак} + U_{-мак} \quad (1.12)$$

где $U_{+мин}$, $U_{-мин}$, $U_{+мак}$, $U_{-мак}$ – минимальные и максимальные значения питания по положительному и отрицательному источнику, указанные в

технических условиях на используемый ОУ.

Амплитудная характеристика ОУ при симметричном питании приведена на рисунке 1.19.

Кривая *A* соответствует подаче напряжения на инвертирующий вход при заземленном прямом, *B* – на неинвертирующий. Реальные кривые зачастую несимметричны. Напряжение насыщения обычно на 1 ... 2 В меньше, чем напряжение источника питания.

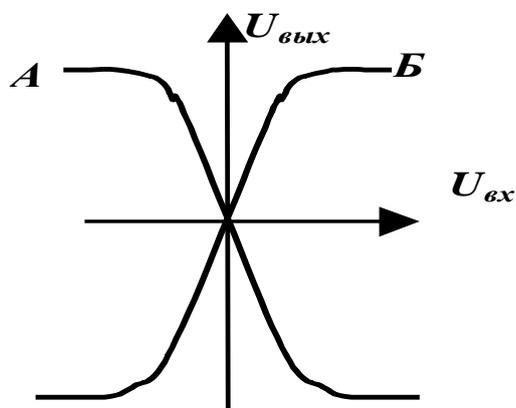


Рисунок 1.19. Амплитудная характеристика

Выходное сопротивление ОУ представляет собой собственно внутреннее сопротивление ОУ без обратной связи. Величина выходного сопротивления определяет максимальный выходной ток ОУ, поэтому эти две величины взаимосвязаны и часто в параметрах ОУ приводится только один из них (чаще приводится максимально допустимый выходной ток). Типичное значение выходного сопротивления – 10...1000 Ом, а выходного тока – 10 ... 20 мА. Иногда в параметрах ОУ приводится значение минимального сопротивления нагрузки, по которому можно также определить выходной ток, зная максимально допустимое напряжение на выходе:

$$I_{\text{вых макс}} = \frac{U_{\text{вых макс}}}{R_{H \text{ мин}}} \quad (1.13)$$

Превышение выходного тока (или, что то же самое, чрезмерное уменьшение сопротивления нагрузки) может вывести некоторые ОУ из строя. Однако подавляющее большинство современных ОУ имеет внутреннюю защиту оконечного каскада от перегрузок по току. Такие ОУ выдерживают короткие замыкания выхода ОУ не только на землю, но и на источники питания ОУ.

В технических условиях обычно указываются предельные значения входного дифференциального и синфазного напряжения, превышение которых может вызвать необратимые изменения во входных цепях усилителя.

Несколько параметров определяют «скоростные» свойства ОУ.

Скорость нарастания выходного напряжения ОУ показывает, как быстро может изменяться выходной сигнал. Этот параметр тесно связан с **АЧХ ОУ** – для более высокочастотных усилителей скорость нарастания увеличивается. Типичное значение этой величины равно 1 ... 100 В/мкс.

Время установления выходного напряжения – время, в течение которого выходное напряжение изменяется от уровня 0,1 до уровня 0,9 от установившегося значения.

Время восстановления – время с момента снятия входного напряжения до момента, начиная с которого выходное напряжение не будет превышать уровня 0,1 от установившегося значения после пребывания **ОУ** в режиме насыщения.

Типы ОУ

В настоящее время промышленность выпускает сотни типов **ОУ**. Все они в первом приближении соответствуют идеальному **ОУ** – имеют очень большой коэффициент усиления, широкую полосу пропускания, большое входное сопротивление и т.д. Все **ОУ**, в принципе, взаимозаменяемы, это значит, что в типовых схемах усилителей, генераторов, фильтров и т.д. в подавляющем большинстве случаев можно использовать любые **ОУ**.

Однако при проектировании специализированных электронных схем (например, высокочастотных, высокостабильных, миниатюрных и т.п.) целесообразно использовать специализированные **ОУ**, в которых улучшены те или иные параметры. В связи с этим различают обычно следующие виды **ОУ**:

- **ОУ** общего назначения;
- Прецизионные, высокочастотные **ОУ**;
- Микромощные, потребляющие незначительные токи от источников питания, иногда такие **ОУ** называются программируемыми;
- Мощные **ОУ**, способные формировать сравнительно большие токи и напряжения.

Еще одним критерием сравнения **ОУ** является количество таких усилителей в одном корпусе (обычно один, два или четыре).

ОУ общего назначения предназначены для применения в аппаратуре, где нет необходимости в выполнении каких-либо специальных условий или требований. Такие **ОУ** имеют низкую стоимость, широкий диапазон напряжения источников питания, нередко при их использовании не требуется никаких дополнительных элементов, кроме источников питания, входных и выходных цепей. Очень часто такие **ОУ** имеют защиту входных и выходных цепей и внутреннюю частотную коррекцию, обеспечивающую работу **ОУ** во всех режимах. Частотный диапазон таких **ОУ** не очень большой – единицы, десятки МГц.

Прецизионные, высокочастотные ОУ характеризуются малыми входными погрешностями: низким уровнем входного напряжения сдвига и его дрейфа и незначительной величиной входного тока сдвига. Нередко такие **ОУ** имеют низкий уровень шумов, сравнительно большой дифференциальный

коэффициент усиления и коэффициент ослабления синфазной составляющей. Как правило, имеют невысокое быстродействие. К этой группе можно также отнести **ОУ** с предельно малыми значениями входных токов (так называемые электрометрические **ОУ**), входные каскады которых выполняются на полевых транзисторах. В некоторых случаях в прецизионных **ОУ** используются вспомогательные схемы для динамического измерения и компенсации входного напряжения сдвига. И, наконец, для получения экстремально низких значений погрешностей по напряжению и току используют **ОУ**, выполненные по схеме **МДМ** (модуляция-демодуляция).

Быстродействующие ОУ позволяют работать с быстроизменяющимися сигналами. Среди них различают широкополосные **ОУ**, которые применяются в высокочастотных усилителях, фильтрах, генераторах и т.п. Кроме того, известны **ОУ** с быстрым установлением входного напряжения, предназначенные, прежде всего, для обработки импульсных сигналов (импульсные усилители, устройства выборки-хранения, пиковые детекторы, цифроаналоговые преобразователи).

Микромощные ОУ применяются в тех случаях, когда определяющим требованием является потребление минимальной мощности от источника питания. Это в первую очередь характерно для переносной или бортовой аппаратуры, работающей от батарей или аккумуляторов. Потребляемый ток таких **ОУ** может составлять несколько микроампер, и нередко существует возможность изменять его величину внешними элементами.

Мощные ОУ позволяют получать на выходе сравнительно большие напряжения (до нескольких десятков вольт) и тока (до одного ампера). Это позволяет строить схемы на основе таких **ОУ**, которые работают на сравнительно низкоомные нагрузки (например: головные телефоны в бытовой звуковой аппаратуре, двигатели постоянного тока небольшой мощности и т.п.). Для предотвращения теплового разрушения при выделении большой мощности такие **ОУ** всегда имеют специальные выводы для крепления к теплопроводу.

Для нормального построения схемы на основе **ОУ** необходимо иметь точку (землю), напряжение которой равно половине суммарного напряжения источников питания **ОУ**. Получить такую точку можно с помощью простейшего резистивного делителя напряжения **R1** и **R2**. Если выбрать сопротивления резисторов одинаковыми **R1 = R2**, то напряжения на резисторах (т.е. напряжения питания **ОУ**) будут равны $U_{R1} = U_{R2} = E_{\Pi} / 2$. Тогда выводы питания **ОУ** подключаются к однополярному источнику питания E_{Π} , а общая точка в схеме на основе **ОУ** подключается к средней точке резисторов **R1** и **R2**. Проблема при таком подключении заключается в том, что земля схемы на основе **ОУ** не совпадает (по переменному току) с землей усилителя мощности, которая обычно соответствует одному из выводов источника питания. Поэтому эти две земли необходимо соединить между собой через конденсатор **C**, сопротивление которого на самой низкой частоте усиления f_H должно быть достаточно малым (несколько десятков Ом).

Раздел 2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Измерительный прибор – средство измерений, дающее возможность непосредственно отсчитывать значения измеряемой величины. В аналоговых измерительных приборах отсчитывание производится по шкале, в цифровых – по цифровому отсчётному устройству. Показывающие измерительные приборы предназначены только для визуального отсчитывания показаний, регистрирующие измерительные приборы снабжены устройством для их фиксации, чаще всего на бумаге. Регистрирующие измерительные приборы подразделяются на самопишущие, позволяющие получать запись показаний в виде диаграммы, и печатающие, обеспечивающие печатание показаний в цифровой форме. В измерительных приборах прямого действия (например, манометре, амперметре) осуществляется одно или несколько преобразований измеряемой величины, и значение её находится без сравнения с известной одноимённой величиной. В измерительных приборах сравнения непосредственно сравнивается измеряемая величина с одноимённой величиной, воспроизводимой *мерой* (примеры – равноплечные *весы*, электроизмерительный *потенциометр*, компаратор для линейных мер). К разновидностям измерительных приборов относятся интегрирующие измерительные приборы, в которых подводимая величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной (электрические счётчики, газовые счётчики), и суммирующие измерительные приборы, дающие значение двух или нескольких величин, подводимых по различным каналам (*ваттметр*, суммирующий мощности нескольких электрических генераторов).

В целях автоматизации управления технологическими процессами измерительные приборы часто снабжаются дополнительными регулирующими, счётно-решающими и управляющими устройствами, действующими по задаваемым программам.

Чувствительность измерительного прибора – отношение перемещения указателя прибора относительно шкалы (выраженного в линейных или угловых единицах) к изменению значения измеряемой величины, вызвавшей это перемещение.

Шкала (от лат. *scala* – лестница) измерительного прибора, часть *отсчётного устройства* прибора, представляющая собой совокупность отметок (точек, штрихов, расположенных в определённой последовательности) и проставленных у некоторых из них чисел отсчёта или других символов, соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины. Параметры шкалы – её пределы, цена деления (разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам) и др. – определяются пределами измерения, реализуемыми измерительным механизмом прибора, чувствительностью прибора и требуемой точностью отсчёта. В зависимости от конструкции отсчётного устройства деления шкалы могут располагаться по окружности, дуге или прямой линии, а сама шкала может быть равномерной, квадратичной, логарифмической и т.д. Основные деления шкалы, соответствующие цифровым обозначениям, наносятся более длинными (или

толстыми) линиями. Показания отсчитываются невооружённым глазом при расстояниях между делениями до 0,7 мм, при меньших – при помощи лупы или микроскопа. Для долевой оценки делений шкалы применяют дополнительные шкалы – *нониусы*.

Нониус – вспомогательная шкала, при помощи которой отсчитывают доли делений основной шкалы измерительного прибора. Прототип современного нониуса предложен французским математиком П. Вернье, поэтому нониус часто называют *верньером*. Нониус получил название по имени португальца П. Нуниша (P. Nunes, латинизированное имя Nonius), предложившего для отсчёта долей делений шкалы другой сходный прибор, ныне, однако, не применяемый. Различают линейный, угломерный, спиральный, трансверсальный и др. виды нониусов. Применение линейного нониуса основано на разнице интервалов деления основной шкалы и нониуса. Длина нониуса (целое число его делений) точно укладывается в определённом целом числе делений основной шкалы. При совпадении нулевой отметки нониуса с какой-либо отметкой L основной шкалы результат измерения A соответствует величине, определяемой отметкой L ; при несовпадении нулевой отметки нониуса с L значение $A = L + ki$, где k – число делений нониуса от нулевого до совпадающего со штрихом основной шкалы; i – наименьшая доля деления основной шкалы, которую можно оценить нониусом (обычно $i = 0,1; 0,05$ или $0,02$ мм). Принцип отсчёта по угломерному нониусу, применяемому в ряде оптико-механических приборов, такой же, как и по линейному нониусу.

Отсчётное устройство измерительного прибора (аналогового или цифрового) – часть прибора, предназначенная для отсчитывания его показаний. Отсчётное устройство аналогового прибора обычно состоит из *шкалы* и указателя, причём подвижным может быть либо указатель, либо шкала. По типу указателя отсчётные устройства подразделяются на стрелочные и световые. В стрелочных отсчётных устройствах стрелка своим концом перемещается относительно отметок шкалы. Конец стрелки может быть копьевидным или выполненным в виде ножа или натянутой нити. В последних двух случаях шкалы снабжаются зеркалом для устранения погрешности отсчёта, вызванной *параллаксом*. В световых отсчётных устройствах роль стрелки выполняет световой луч, отражённый от зеркальца, скрепленного с подвижной частью прибора. От положения последней зависит положение светового изображения на шкале, по которому отсчитывают показания. Световое отсчётное устройство позволяет устранить погрешность от параллакса и повысить чувствительность прибора за счёт увеличения длины указателя и удвоения угла его поворота.

Отсчётное устройство цифрового прибора позволяет получить показание непосредственно в цифровой форме. Для создания изображений цифр применяются цифровые индикаторы различной конструкции. Механические индикаторы представляют собой несколько роликов или дисков с цифрами по окружности и ряд окошечек, в которых появляются цифры отдельных роликов (дисков). Такими отсчётными устройствами снабжены, например, счётчики электроэнергии. Электромеханические индикаторы содержат подвижные части

с изображениями цифр, перемещаемые электромеханическими приводными устройствами. В электрических индикаторах применяются лампы накаливания, люминесцентные или газоразрядные элементы и электроннолучевые трубки, образующие изображения цифр.

Точность измерения – характеристика измерения, отражающая степень близости его результатов к истинному значению измеряемой величины. Чем меньше результат измерения отклоняется от истинного значения величины, то есть чем меньше его погрешность, тем выше точность измерения, независимо от того, является ли погрешность систематической, случайной или содержит ту и другую составляющие. Иногда в качестве количественной оценки точности измерения указывают погрешность, однако погрешность является понятием, противоположным точности, и логичнее в качестве оценки точности измерения указывать обратную величину относительной погрешности (без учёта её знака); например, если относительная погрешность равна $\pm 10-5$, то точность равна 105.

Точность меры и измерительного прибора – степень близости значений меры или показаний измерительного прибора к истинному значению величины, воспроизводимой мерой или измеряемой при помощи прибора. Точные меры или измерительные приборы имеют малые погрешности, как систематические, так и случайные.

Классы точности средств измерений – обобщённая характеристика средств измерений, служащая показателем установленных для них государственными стандартами пределов основных и дополнительных погрешностей и др. параметров, влияющих на точность. Введение классов точности облегчает стандартизацию средств измерений и их подбор для измерений с требуемой точностью.

Из-за разнообразия измеряемых величин и средств измерений нельзя ввести единый способ выражения пределов допускаемых погрешностей и единые обозначения классов точности. Если пределы погрешностей выражены в виде приведенной погрешности (т.е. в процентах от верхнего предела измерений, диапазона измерений или длины шкалы прибора), а также в виде относительной погрешности (т.е. в процентах от действительного значения величины), то классы точности обозначают числом, соответствующим значению погрешности. Например: Классу точности 0,1 соответствует погрешность 0,1%. Многие показывающие приборы (амперметры, вольтметры, манометры и др.) формируются по приведённой погрешности, выраженной в процентах от верхнего предела измерений. В этих случаях применяется ряд классов точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

ВИДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Электродинамический прибор – измерительный прибор, принцип действия которого основан на механическом взаимодействии двух проводников при протекании по ним электрического тока. Электродинамический прибор

состоит из измерительного преобразователя, преобразующего измеряемую величину в переменный или постоянный ток, и измерительного механизма электродинамической системы. Наиболее распространены электродинамические приборы с подвижной катушкой, внутри которой на оси со стрелкой расположена подвижная катушка. Вращающий момент на оси возникает в результате взаимодействия токов в обмотках катушек и пропорционален произведению действующих значений этих токов. Уравновешивающий момент создаёт пружина, с которой связана ось. При равенстве моментов стрелка останавливается.

Электродинамические приборы – наиболее точные электроизмерительные приборы, применяемые для определения действующих значений тока и напряжения в цепях переменного и постоянного тока. При последовательном соединении обмоток катушек угол поворота стрелки пропорционален квадрату измеряемой величины. Такое включение обмоток применяется в электродинамических приборах для измерения напряжения и силы тока (вольтметры и амперметры). Электродинамические измерительные механизмы используют также для измерения мощности (ваттметры). При этом через неподвижную катушку пропускают ток, пропорциональный току, а через подвижную – ток, пропорциональный напряжению в измеряемой цепи. Показания прибора пропорциональны активному или реактивному значению электрической мощности. В случае исполнения электродинамических механизмов в виде логометров их применяют как частотомеры, фазометры и фарадометры. Электродинамические приборы изготавливают главным образом переносными приборами высокой точности – классов 0,1; 0,2; 0,5. Разновидность электродинамических приборов – ферродинамический прибор, в котором для усиления магнитного поля неподвижной катушки применяют магнитопровод из ферромагнитного материала. Такие приборы предназначены для работы в условиях вибрации, тряски и ударов. Класс точности ферродинамических приборов 1,5 и 2,5.

Электростатический прибор – *измерительный прибор*, принцип действия которого основан на механическом взаимодействии электродов, несущих разноимённые электрические заряды. В электростатическом приборе, измеряемая величина преобразуется в напряжение переменного или постоянного тока, определяемое электростатическим измерительным механизмом. Измеряемое напряжение подводится к подвижному электроду, укрепленному на оси, связанной со стрелкой, и к изолированному от него неподвижному электроду. В результате взаимодействия зарядов, возникающих на электродах, на оси появляется вращающий момент, пропорциональный квадрату приложенного напряжения. Действующая на ось пружина создаёт момент, противодействующий вращающему моменту и пропорциональный углу поворота оси подвижного электрода. При взаимодействии вращающего и противодействующего моментов стрелка измерительного механизма поворачивается на угол, пропорциональный квадрату поданного на электроды напряжения. Шкала, градуируемая в единицах измеряемых величин, получается неравномерной, выполняется часто со световым указателем.

Электростатический прибор используют обычно для измерения напряжений переменного или постоянного тока, в том числе высокочастотных. Для этих приборов характерно малое потребление энергии и независимость показаний от частоты. Они подвержены влиянию внешних электростатических полей, которое ослабляется внутренним экранированием прибора. Электростатические приборы выпускаются наивысшего класса точности 0,005.

Термоэлектрический прибор – измерительный прибор для измерения силы переменного тока, реже электрического напряжения, мощности. Представляет собой сочетание магнитоэлектрического измерителя с одним или несколькими термопреобразователями. Термопреобразователь состоит из термопары (или нескольких термопар) и нагревателя, по которому протекает измеряемый ток. Под действием тепла, выделяемого нагревателем, между свободными концами термопары возникает термоЭДС, измеряемая магнитоэлектрическим измерителем. Для расширения пределов измерения термопреобразователей используют высокочастотные измерительные трансформаторы тока.

Термоэлектрические приборы обеспечивают сравнительно большую точность измерений в широком диапазоне частот и независимость показаний от формы кривой тока, протекающего через нагреватель. Их основные недостатки – зависимость показаний от температуры окружающей среды, значительное собственное потребление мощности, недопустимость больших перегрузок (не более чем в 1,5 раза). Применяются преимущественно для измерения действующего значения силы переменного тока (от единиц мкА до нескольких десятков А) в диапазоне частот от нескольких десятков Гц до нескольких сотен МГц с погрешностью 1-5%.

Электромагнитный прибор – *измерительный прибор*, принцип действия которого основан на взаимодействии магнитного поля, пропорционального измеряемой величине, с сердечником, выполненным из ферромагнитного материала. Основные элементы электромагнитного прибора: измерительная схема, преобразующая измеряемую величину в постоянный или переменный ток, и измерительный механизм электромагнитной системы. Электрический ток в катушке электромагнитной системы создаёт электромагнитное поле, втягивающее сердечник в катушку, что приводит к возникновению на оси вращающего момента, пропорционального квадрату силы тока, протекающего по катушке. В результате действия на ось пружины создаётся момент, противодействующий вращающему моменту и пропорциональный углу поворота оси. При взаимодействии моментов ось и связанная с ней стрелка поворачиваются на угол, пропорциональный квадрату измеряемой величины. При равенстве моментов стрелка останавливается.

Выпускаются электромагнитные *амперметры* и *вольтметры* для измерений главным образом в цепях переменного тока частотой 50 Гц. В электромагнитном амперметре катушка измерительного механизма включается последовательно в цепь измеряемого тока, в вольтметре параллельно. Электромагнитные измерительные механизмы применяют также в *логометрах*. Наиболее распространены щитовые приборы классов точности 1,5 и 2,5, хотя

существуют приборы классов 0,5 и даже 0,1 с рабочей частотой до 800 Гц.

Магнитоэлектрический прибор – измерительный прибор непосредственной оценки для измерения силы электрического тока, напряжения или количества электричества в цепях постоянного тока. Подвижная часть измерительного механизма магнитоэлектрического прибора перемещается вследствие взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника с током. Наиболее распространены магнитоэлектрические приборы с подвижной рамкой, расположенной в поле постоянного магнита. При протекании по виткам рамки тока возникают силы, образующие вращающий момент. Ток к рамке подводится через пружинки или растяжки, создающие противодействующий вращающий механический момент. Под действием обоих моментов рамка перемещается на угол, пропорциональный силе тока в рамке. Непосредственно через обмотку рамки можно пропускать только небольшие токи силой от нескольких мкА до десятков мА, чтобы не перегреть обмотки и растяжки. Для расширения пределов измерений по току и по напряжению к рамке подключают шунтирующие и добавочные сопротивления, подключаемые извне или встроенные. Существуют магнитоэлектрические приборы, у которых постоянный магнит помещен внутри подвижной катушки, а также магнитоэлектрические приборы с подвижным магнитом, укрепленным на оси внутри неподвижной катушки. Применяются также магнитоэлектрические логометры.

Магнитоэлектрические приборы с подвижным магнитом более просты, имеют меньшие габариты и массу, но меньшую точность и чувствительность, чем приборы с подвижной рамкой. Для отсчёта показаний используют стрелочный или световой указатель: луч света от осветителя направляется на зеркальце, укрепленное на подвижной части прибора, отражается от него и образует на шкале магнитоэлектрического прибора световое пятно с тёмной чертой в центре.

Отличительные особенности магнитоэлектрического прибора – равномерная шкала, хорошее успокоение, высокие точность и чувствительность, малое потребление мощности; они чувствительны к перегрузкам, к механическим сотрясениям и ударам и мало чувствительны к влияниям внешних магнитных полей и окружающей температуры.

Электроизмерительный комбинированный прибор – измерительный прибор, в котором для измерения (неодновременного) двух и более величин используется один измерительный механизм либо несколько различных измерительных преобразователей с общим отсчётным устройством. Шкалу или отсчётное устройство электроизмерительного комбинированного прибора градуируют в единицах тех величин, которые он измеряет. Наиболее широко используют приборы для измерения электрического напряжения, силы переменного и постоянного тока – ампервольтметры; напряжения, силы переменного и постоянного тока и сопротивления – ампервольтметры (авометры); индуктивности, напряжения постоянного тока, количества импульсов – универсальные цифровые электроизмерительные комбинированные приборы.

АМПЕРМЕТР

Амперметр – прибор для измерений силы постоянного и переменного тока в амперах (А). Шкалу амперметра градуируют в килоамперах, миллиамперах или микроамперах в соответствии с пределами измерения прибора. В электрическую цепь амперметр включается последовательно; для увеличения предела измерений – с шунтом или через трансформатор. Под действием тока подвижная часть прибора поворачивается; угол поворота связанной с ней стрелки пропорционален силе тока. Существуют амперметры, в которых применены магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая (ферромагнитная), термоэлектрическая и выпрямительная системы.

Основные характеристики амперметров, выпускаемых промышленностью, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Основные характеристики амперметров

Системы	Показывающие				Самопишущие
	Магнито-электрическая	Электромагнитная	Электродинамическая	Термоэлектрическая	
Характеристики					Магнитоэлектрическая, электродинамическая или выпрямительная с регистрирующими устройствами
Измеряемый ток	Гл. ОБР. ПОСТ. (С ДОБАВОЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ – ПЕРЕМ. ТОК ВЧ И НЕ ЭЛЕКТРИЧ. ВЕЛИЧИНЫ)	ПОСТ. И ПЕРЕМ. (45 Гц–8 кГц)	Пост. и перем. (50 1500 МГц)	Перем. (50 30 МГц)	Пост. и перем., (45 Гц–10 кГц)
Классы точности (относит. погрешность в %)	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0	0,5; 1,0; 1,5; 2,5	0,1; 0,2; 0,5; 2,5	1,5; 2,5; 5,0	1,5; 2,5
ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ:					
Непосредственно	0-75 А	0-300 А	0-50 А	—	0-30 А
С добавочным устройством (шунт, трансформатор и др.) до	6 кА (ОТДЕЛЬНЫЕ ТИПЫ ДО 70 кА)	30 кА	6 кА	50 А	150 кА
Потребляемая мощность (вт, при измерениях 10 А)	0,2-0,4	2,0-8,0	3,5-10,0	1,0	—

В зависимости от области применения в конструкциях амперметра предусматривается защита от внешних влияний – они устойчивы относительно изменений температуры (от 60 до – 60°C), вибраций, тряски и могут работать при 80-98% относительной влажности.

ВАТТМЕТР



Ваттметр – прибор для измерения мощности электрического тока в ваттах. Наиболее распространены электродинамические ваттметры, механизм которых состоит из неподвижной катушки, включенной последовательно с нагрузкой (цепь тока), и подвижной катушки, включенной через большое добавочное сопротивление R параллельно нагрузке (цепь напряжения). Работа ваттметра основана на взаимодействии магнитных полей подвижной и неподвижной катушек при прохождении по ним электрического тока. При этом вращающий момент, вызывающий отклонение подвижной части прибора и соединённой с ней стрелки (указателя), при постоянном токе пропорционален произведению силы тока на напряжение, а при переменном токе – также косинусу угла сдвига фаз между током и напряжением. Применяются также ферродинамические ваттметры, реже индукционные, термоэлектрические и электростатические.

Промышленность выпускала переносные (лабораторные) электродинамические ваттметры классов точности 0,2 и 0,5, предназначенные для измерений в цепях постоянного и переменного (с частотой до 5 кГц) токов. Измерение мощности при частоте переменного тока свыше 5 кГц осуществляют термоэлектрические ваттметры. Для измерения мощности в энергетических установках применяют щитовые (стационарные) ваттметры обычно ферродинамические и реже индукционные.

Мощность в трёхфазных цепях измеряют трёхфазными ваттметрами, которые представляют собой конструктивное объединение трёх (двух) механизмов однофазных ваттметров. Подвижные катушки трёхфазных ваттметров укрепляют на общей оси, чем достигается суммирование создаваемых ими вращающих моментов. В цепи высокого напряжения ваттметр включают через *измерительные трансформаторы* (тока и напряжения).

ВОЛЬТМЕТР



Вольтметр – электрический прибор для измерения ЭДС или напряжений в электрических цепях. Вольтметр включается параллельно нагрузке или источнику электрической энергии.

Первым в мире вольтметром был «указатель электрической силы» русского физика Г. Рихмана (1745). Принцип действия «указателя» используется и в современном электростатическом вольтметре.

Наиболее просты в изготовлении, дешёвы и надёжны в эксплуатации вольтметры электромагнитные. Они применяются главным образом как стационарные на распределительных щитах электростанций и промышленных предприятий и более редко в качестве лабораторных приборов. Недостатки таких вольтметров – относительно большое собственное потребление энергии (3-7 Вт) и большая индуктивность обмотки, приводящая к существенной зависимости показаний вольтметра от частоты.

Наиболее чувствительны и точны вольтметры магнитоэлектрические, пригодные, однако, для измерений только в цепях постоянного тока. В комплекте с термоэлектрическими, полупроводниковыми или электронно-ламповыми преобразователями переменного тока в постоянный они

применяются для измерения напряжения в цепях переменного тока. Такие вольтметры называются термоэлектрическими, выпрямительными и электронными, применяются главным образом в лабораторной практике. Выпрямительные вольтметры используют для измерений в диапазоне звуковых частот, а термоэлектрические и электронные – на высоких частотах. Недостаток этих приборов – существенное влияние на правильность их показаний формы кривой измеряемого напряжения.

Электронные вольтметры имеют сложные схемы с применением недостаточно стабильных элементов (электронных ламп, малогабаритных электрических сопротивлений и конденсаторов), что приводит к снижению их надёжности и точности. Однако они незаменимы при измерениях в маломощных радиотехнических цепях, так как имеют большое входное сопротивление и работают в широком диапазоне частот (от 50 до 100 МГц) с погрешностями, не превышающими 3% от верхнего предела измерения. Изготавливаются также электронные вольтметры для измерения амплитуды импульсов напряжения длительностью от десятых долей мксек при *скважности* до 2500.

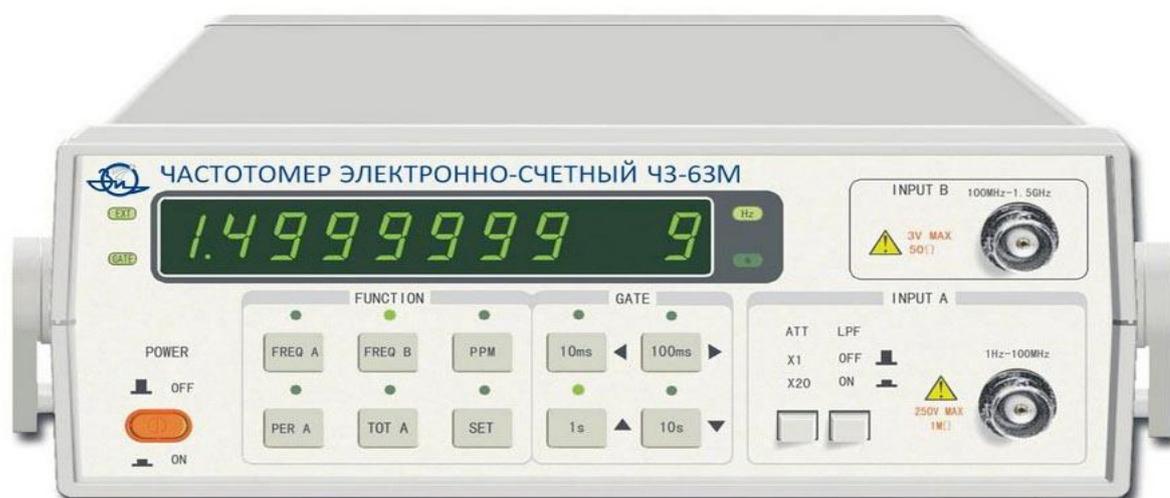
В начале XX в. широко применялись вольтметры тепловой и индукционной систем; в настоящее время промышленное производство их прекращено из-за присущих им недостатков – большое собственное потребление энергии и зависимость показаний от температуры окружающей среды.

ФАЗОМЕТР



Фазометр – прибор для измерения косинуса угла *сдвига фаз* (или коэффициента мощности) между напряжением и током в электрических цепях переменного тока промышленной частоты или для измерения разности фаз электрических колебаний. Измерение косинуса угла сдвига фаз на промышленной частоте производят электромеханическими фазометрами с непосредственным отсчётом, в которых измерительным механизмом служит *логометр* (электродинамический, ферродинамический, электромагнитный или индукционный); отклонение подвижной части логометра зависит от сдвига фаз соотносимых напряжения и тока. В качестве фазометра для широкого диапазона частот применяют электронно-счётные измерители интервалов времени между моментами прохождения соотносимых колебаний через нуль, а также градуированные измерительные *фазовращатели* в сочетании с индикаторами нулевой разности фаз (например, с фазовыми детекторами). Погрешности измерения электромеханическими фазометрами 1-3°, электронными 0,05-0,1°.

ЧАСТОТОМЕР



Частотомер – прибор для измерения частоты периодических процессов (колебаний). Частоту механических колебаний обычно измеряют с помощью вибрационных механических частотомеров и электрических частотомеров, используемых совместно с преобразователями механических колебаний в электрические. Простейший вибрационный механический частотомер, действие которого основано на резонансе, представляет собой ряд упругих пластин, укрепленных одним концом на общем основании. Пластины подбирают по длине и массе так, чтобы частоты их собственных колебаний составили некую дискретную шкалу, по которой и определяют значение измеряемой частоты. Механические колебания, воздействующие на основание частотомера, вызывают вибрацию упругих пластин, при этом наибольшая амплитуда колебаний наблюдается у той пластины, у которой частота собственных колебаний равна (или близка по значению) измеряемой частоте.

Для измерения частоты электрических колебаний применяют электромеханические, электродинамические, электронные, электромагнитные, магнитоэлектрические частотомеры. Простейший электромеханический частотомер вибрационного типа состоит из электромагнита и ряда упругих пластин (как в механическом частотомере) на общем основании, соединённом с якорем электромагнита. Измеряемые электрические колебания подают в обмотку электромагнита; возникающие при этом колебания якоря передаются пластинам, по вибрации которых определяют значение измеряемой частоты. В электродинамических частотомерах основным элементом является логометр, в одну из ветвей которого включен колебательный контур, постоянно настроенный на среднюю для диапазона измерений данного прибора частоту. При подключении такого частотомера к электрической цепи переменного тока измеряемой частоты подвижная часть логометра отклоняется на угол, пропорциональный сдвигу фаз между токами в катушках логометра, который зависит от соотношения измеряемой частоты и резонансной частоты колебательного контура. Погрешность измерений электродинамического частотомера $10^{-12} - 5 \cdot 10^{-14}$.

Частоту электромагнитных колебаний в диапазоне радиочастот и СВЧ измеряют при помощи электронных частотомеров (волномеров) – резонансных, гетеродинных, цифровых и др.

Действие резонансного частотомера основано на сравнении измеряемой частоты с частотой собственных колебаний электрического контура (или резонатора СВЧ), настраиваемого в резонанс с измеряемой частотой. Резонансный частотомер состоит из колебательного контура с петлёй связи, воспринимающей электромагнитные колебания (радиоволны), детектора, усилителя и индикатора резонанса. При измерении контур настраивают при помощи калиброванного конденсатора (или поршня резонатора в диапазоне СВЧ) на частоту воспринимаемых электромагнитных колебаний до наступления резонанса, который регистрируют по наибольшему отклонению указателя индикатора. Погрешность измерений таким частотомером $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$. В гетеродинных частотомерах измеряемая частота сравнивается с известной частотой (или её гармониками) образцового генератора – гетеродина. При подстройке частоты гетеродина к частоте измеряемых колебаний на выходе смесителя (где происходит сравнение частот) возникают биения, которые после усиления индицируются стрелочным прибором, телефоном или (реже) осциллографом. Относительная погрешность гетеродинных частотомеров $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-6}$.

Широкое применение получили цифровые частотомеры, принцип действия которых заключается в подсчёте числа периодов измеряемых колебаний за определённый промежуток времени. Электронно-счётный частотомер состоит из формирующего устройства, преобразующего синусоидальное напряжение измеряемой частоты в последовательность однополярных импульсов, временного селектора импульсов, открываемого на определённый промежуток

времени (обычно от 10^{-4} до 10 сек), электронного счётчика, отсчитывающего число импульсов на выходе селектора, и цифрового индикатора. Современные цифровые частотомеры работают в диапазоне частот 10^{-4} – 10^9 Гц, относительная погрешность измерения 10^{-9} – 10^{-11} ; чувствительность 10^{-2} в. Такие частотомеры используются преимущественно при испытаниях радиоаппаратуры, а с применением различных измерительных преобразователей – измерения температуры, вибраций, давления, деформаций и других физических величин.

Разновидностью образцовых частотомеров высшей точности являются эталоны и стандарты частоты, погрешность которых лежит в пределах 10^{-12} – $5 \cdot 10^{-14}$. Измерителем частоты вращения валов машин и механизмов служит тахометр.

ОСЦИЛЛОГРАФ



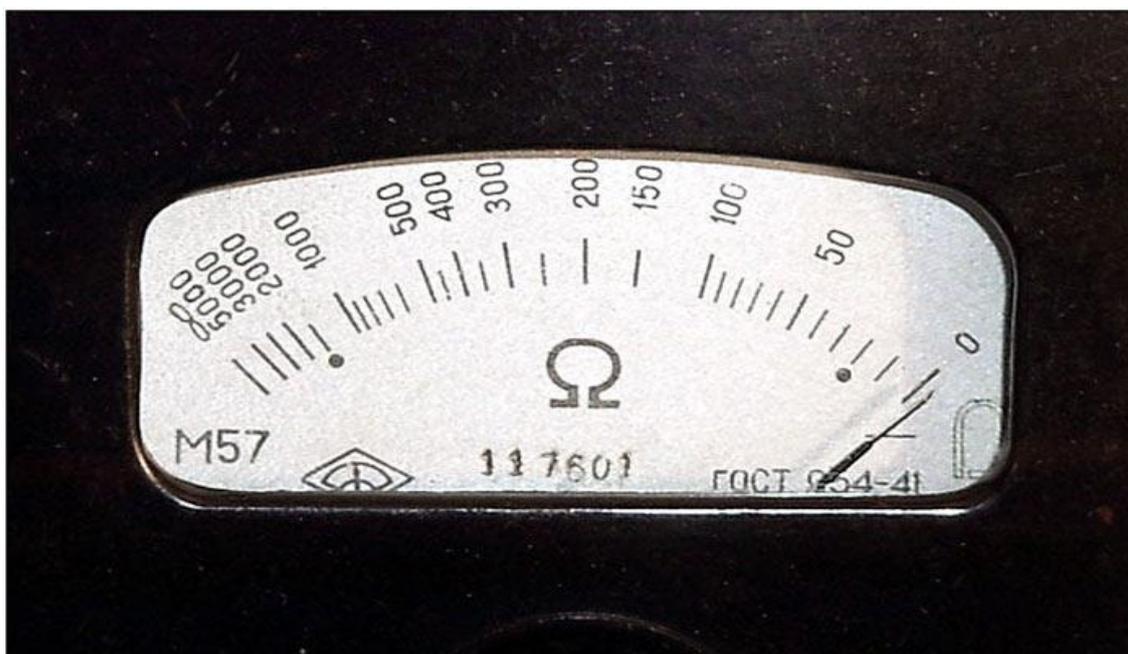
Осциллограф (от лат. *oscillo* – качаюсь) электронно-лучевой – прибор для наблюдения функциональной связи между двумя или несколькими величинами (параметрами и функциями; электрическими или преобразованными в электрические). Для этой цели сигналы параметра и функции подают на взаимно перпендикулярные отклоняющие пластины осциллографической электронно-лучевой трубки и наблюдают, измеряют и фотографируют графическое изображение зависимости на экране трубки. Это изображение называют осциллограммой. Чаще всего осциллограмма изображает форму электрического сигнала во времени. По ней можно определить полярность, амплитуду и длительность сигнала. Осциллограф часто имеет

проградуированные в В по вертикали и в сек по горизонтали шкалы на экране трубки. Это обеспечивает возможность одновременного наблюдения и измерения временных и амплитудных характеристик всего сигнала или его части, а также измерения параметров случайных или однократных сигналов. Иногда изображение исследуемого сигнала сравнивают с калибровочным сигналом или применяют компенсационный метод измерений.

Важными характеристиками осциллографа, определяющими его эксплуатационные возможности, являются: коэффициент отклонения – отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча, вызванному этим напряжением (В/см или В/дел); полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения осциллографа уменьшается не более чем на 3 дБ относительно его значения на средней (опорной) частоте; время нарастания, в течение которого переходная характеристика осциллографа нарастает от 0,1 до 0,9 от амплитудного значения (часто употребляется вместо полосы пропускания); верх. граничная частота полосы пропускания f_v ; коэффициент развертки – отношение времени к величине отклонения луча, вызванного напряжением развёртки за это время (в сек /см или сек /дел); скорость записи – максимальная скорость перемещения луча по экрану, при которой обеспечивается фотографирование или запоминание (для запоминающего осциллографа) однократного сигнала. Перечисленные параметры определяют амплитудный, временной и частотный диапазоны исследуемых сигналов.

Погрешность измерения сигналов зависит от погрешностей коэффициента отклонения и коэффициента развёртки (обычно ~2-5%) от частоты (длительности) исследуемого сигнала и полосы пропускания (времени нарастания сигнала).

ОММЕТР



Омметр – прибор непосредственного отсчёта для измерения электрических активных (омических) сопротивлений. Разновидности омметра: мегомметры, тераомметры, микроомметры, различающиеся диапазонами измеряемых сопротивлений. Изготавливают омметры с магнитоэлектрическим измерителем и омметры с магнитоэлектрическим логометром.

Действие магнитоэлектрического омметра основано на измерении силы тока, протекающего через измеряемое сопротивление при постоянном напряжении источника питания. Для измерения сопротивлений от сотен Ом до нескольких МОм измеритель и измеряемое сопротивление включают последовательно. При малых значениях сопротивления (до нескольких Ом) измеритель и r_x включают параллельно. При постоянных U и C отклонение зависит от r_x и потому для облегчения измерений шкала измерителя может быть проградуирована в Омах. Погрешность такого омметра 5-10% от длины рабочей части шкалы.

Часто омметр является частью комбинированного прибора – ампервольтметра. При необходимости более точных измерений в омметре используется мостовой метод измерения. Для повышения чувствительности измерителя и точности измерений в таких омметрах применяют электронные усилители.

С 60-х гг. XX в. стали применять электронные омметры с цифровым отсчётом значения измеряемого сопротивления, а также приборы, в которых предусмотрена возможность подключения к ЭВМ. Пределы измерений сопротивления у таких омметров от 1 до 100 МОм и выше; погрешность 0,01-0,05%.

АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА ЧАСТОТ



Анализатор спектра частот – измерительный прибор лабораторного применения для исследования частотных спектров, наблюдаемых на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), импульсно- и амплитудно-модулированных колебаний в 3 и 10-см диапазонах волн. Для получения осциллографического изображения спектра исследуемых колебаний в координатах «мощность – частота» в анализаторе спектра применяют *супергетеродинный радиоприёмник*, в котором подаваемые на вход колебания ослабляются (если необходимо) *аттенюаторами*, преобразуются по частоте, усиливаются и затем поступают на вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ; частота гетеродина приёмника линейно изменяется на ± 8 МГц (в 10-см диапазоне) или на ± 30 МГц (в 3-см диапазоне) в такт с пилообразным напряжением развёртки, одновременно подаваемым в цепи, изменяющие частоту гетеродина, и на горизонтальные пластины ЭЛТ. В анализаторе спектра предусмотрена градуировка по частоте, осуществляемая генератором калибровочных меток с плавной регулировкой амплитуды и частоты от 1 до 10 МГц. Анализатором спектра можно измерять уход частоты генератора, малые разности частот двух генераторов и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. 2 изд. ч. 1, 3, М., 1972-75.
2. Городецкий И.Е. Основы технических измерений в машиностроении. М., 1950.
3. Арутюнов О.Л. Электрические измерительные приборы и измерения. М., 1958.
4. Фремке А.В. Электрические измерения. 4 изд. Л., 1973.
5. Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения. 3 изд. М., 1975.
6. Червякова В.И. Термоэлектрические приборы. М. – Л., 1963.
7. Мизюк Л.Я. Электромеханические и электронные фазометры. М. – Л., 1962.
8. Чех И. Осциллографы в измерительной технике. Пер. с нем. М., 1965.
9. Шкурин Г.П. Справочник по электро- и электронно-измерительным приборам. М., 1972.
10. Илюнин К.К. Справочник по электроизмерительным приборам. Л., 1973.
11. Брокгауз Ф.А., Ефрон И.А. Энциклопедический словарь [Электронный ресурс].

Плеханов Георгий Витальевич

ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности
Электроснабжение по направлению
Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано в печать 02.10.14. Формат 60x84 /16.

Усл. печ. л. 3,13. Тираж 50 экз. Заказ 14 1299. Рег. №153.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/б.