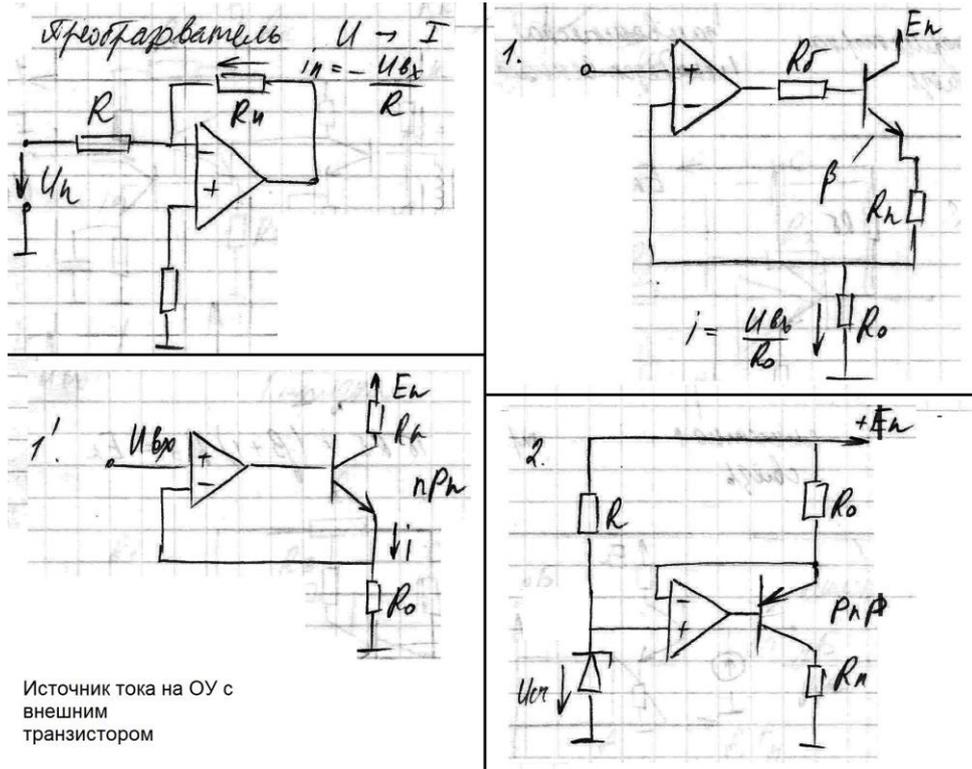


Билет 17

1. Источник тока на ОУ.

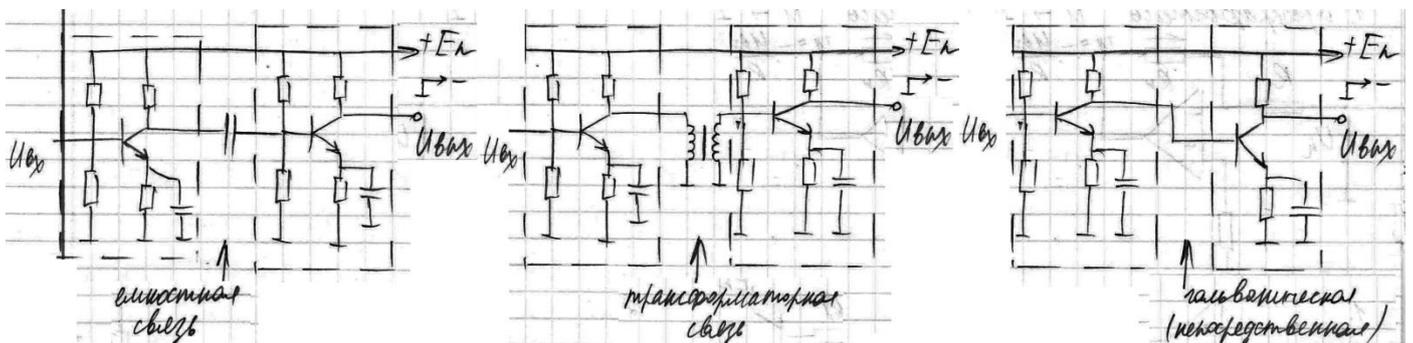


2. Виды связи между усилителями.

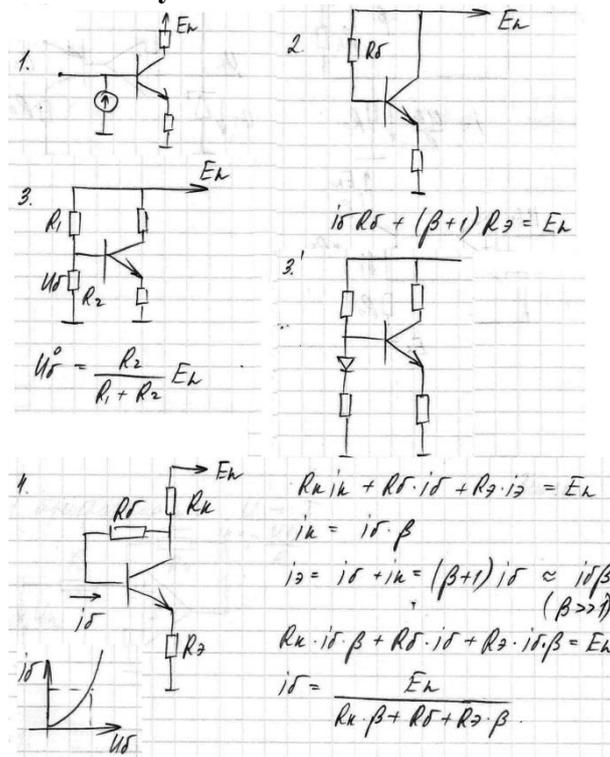
Усилительные каскады имеют ограниченный коэффициент усиления, зависящий от параметров транзисторов и других компонентов схемы. Эти одиночные каскады, как правило, не в состоянии обеспечить требуемый коэффициент усиления. Поэтому строят **многоступенчатые усилители**, представляющие **последовательное соединение отдельных усилительных каскадов**. В настоящее время промышленность освоила выпуск интегральных многоступенчатых усилителей различного назначения. Они являются готовыми функциональными узлами с известными параметрами. Комбинируя и соединяя их между собой соответствующим образом, реализуют многоступенчатые усилители, имеющие требуемые параметры и характеристики преобразования.

Можно выделить следующие типы связи между микросхемами и отдельными усилительными каскадами: гальваническую (непосредственную); емкостную (с помощью RC-цепочек); трансформаторную; с помощью частотно-зависимых цепей; оптронную.

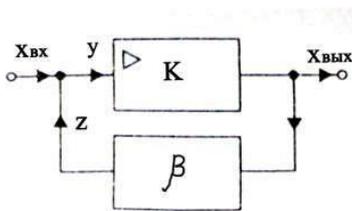
Для сравнительно низкочастотных усилителей чаще всего используют **первый и второй тип** связи. **Третий** применяют реже из-за больших габаритов трансформаторов, невозможности их микроминиатюризации, высокой стоимости, сложности изготовления, повышенных нелинейных искажений. Однако трансформаторная связь успешно может быть использована при необходимости получить максимальное усиление по мощности. **Четвертый тип** используют при создании избирательных усилителей, а **пятый** применяется сравнительно редко, только в специальных случаях, когда при низкой рабочей частоте требуется хорошая гальваническая развязка между каскадами.



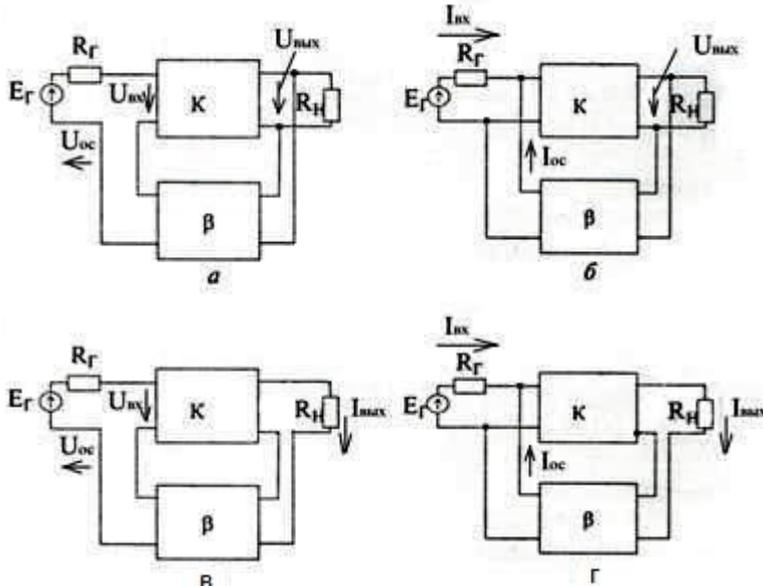
1. Схемы задания точки покоя в усилителях.



2. Схемы обратной связи в усилителях.



Усилитель, у которого часть энергии выходного сигнала подается на вход, называется усилителем с обратной связью. Структурная схема усилителя с обратной связью показана на рисунке.



Обратные связи бывают **полезными**, если мы их создаем сами, и **паразитными** (вредными), если они возникают в схемах помимо нашего желания.

Реализация полезных обратных связей может быть различной. Различают **4 вида обратных связей**:

На рисунках изображены:

- а) последовательная ОС по напряжению
- б) параллельная ОС по напряжению
- в) последовательная ОС по току
- г) параллельная ОС по току

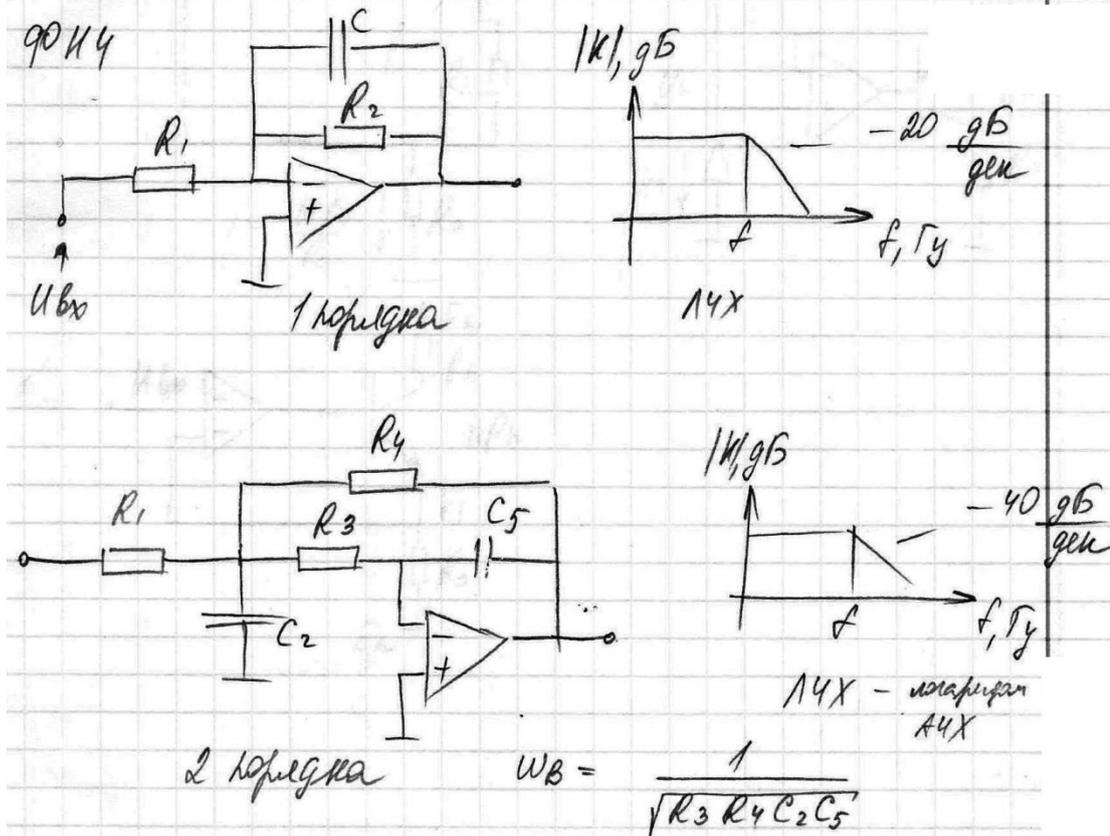
Для определения вида обратной связи (ОС) нужно "закоротить" нагрузки. Если при этом сигнал обратной связи обращается в нуль, то это **ОС по напряжению**, если сигнал ОС не обращается в нуль, то это

ОС по току. При **обратной связи по напряжению** сигнал обратной связи, поступающий с выхода усилителя на вход, пропорционален выходному напряжению. При **обратной связи по току** сигнал обратной связи пропорционален выходному току. При **последовательной обратной связи (со сложением напряжений)** в качестве сигнала обратной связи используется напряжение, которое вычитается (для отрицательной обратной связи) из напряжения внешнего входного сигнала. При **параллельной обратной связи (со сложением токов)** в качестве сигнала обратной связи используется ток, который вычитается из тока внешнего входного сигнала.

Билет 19

1. Основные параметры и характеристики электронных усилителей в ключевом режиме.
Спросить у Бутенко

2. ФНЧ на ОУ: схема, временные диаграммы, принцип работы.



Принцип работы основан на частотнозависимой обратной связи. На высоких частотах конденсатор становится короткой, и обратная связь становится стопроцентной.

Спросить Бутенко: временные диаграммы

Билет 20

1. Основные параметры и характеристики усилителей на полевых транзисторах.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_2}$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_2}$$

В многокаскадном усилителе общий коэффициент усиления равен :

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_N.$$

Часто коэффициент усиления выражают в логарифмической мере - в Дб:

$$K_U [\text{Дб}] = 20 \lg(K_U);$$

Тогда в многокаскадном усилителе коэффициенты усиления суммируются:

$$K_{\text{общ}} [\text{Дб}] = K_1 [\text{Дб}] + \dots + K_N [\text{Дб}];$$

Для усилителей с токовым входом и потенциальным выходом - **сопротивление прямой передачи**

$$R_n = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}, \text{ кОм}$$

Входное сопротивление:

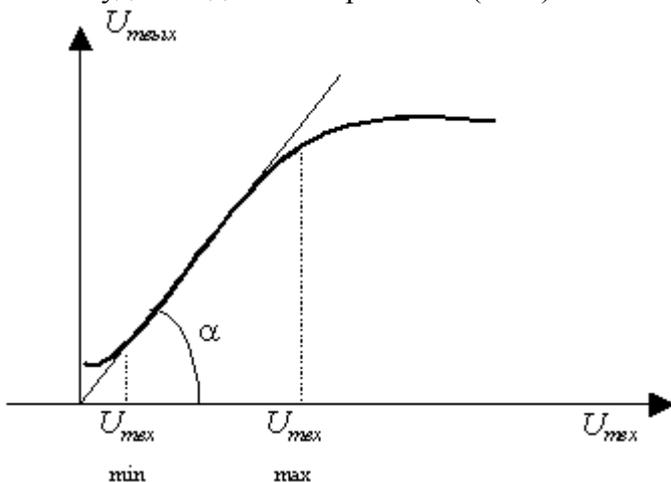
$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$$

Выходное сопротивление :

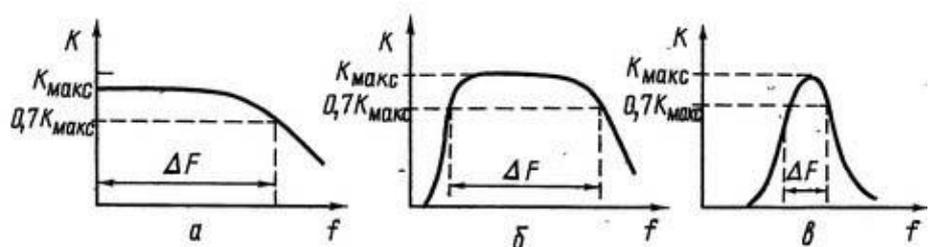
$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} \Big|_{U_2 = 0; R_H = \infty} \quad \text{или} \quad R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \Big|_{I_2 = 0; R_H = \infty}$$

Основные характеристики:

Амплитудная характеристика — это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока)



Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты



Амплитудно-частотные характеристики усилителей:

а — постоянного тока; б — низкой частоты; в — резонансного

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) — это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты.

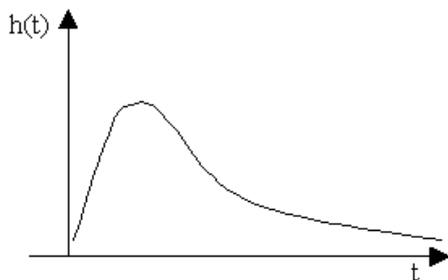


Рисунок 12.3

Переходная характеристика усилителя — это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии.

Дополнительно:

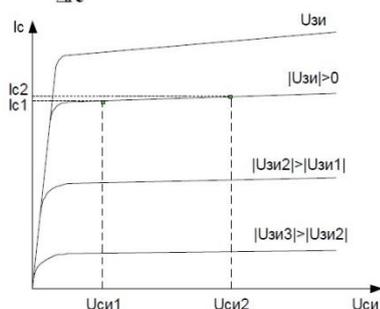
1. Напряжение отсечки.
2. Крутизна стокзатворной характеристики. Она показывает, на сколько изменится ток стока при изменении напряжения на затворе на 1В.

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зп}} \text{ при } U_{си} = Const$$

$$S = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{|U_{зп2} - U_{зп1}|}$$

3. Внутреннее сопротивление (или выходное) усилителя на полевых транзисторах.

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зп} = Const$$



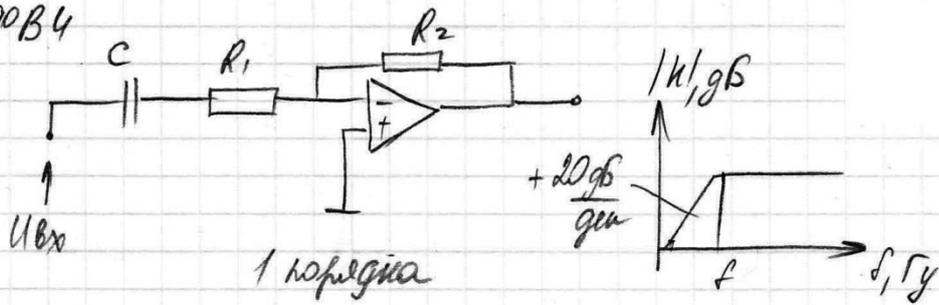
4. Входное сопротивление.

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{зп}}{\Delta I_3} \leq 10^9 \text{ Ом}$$

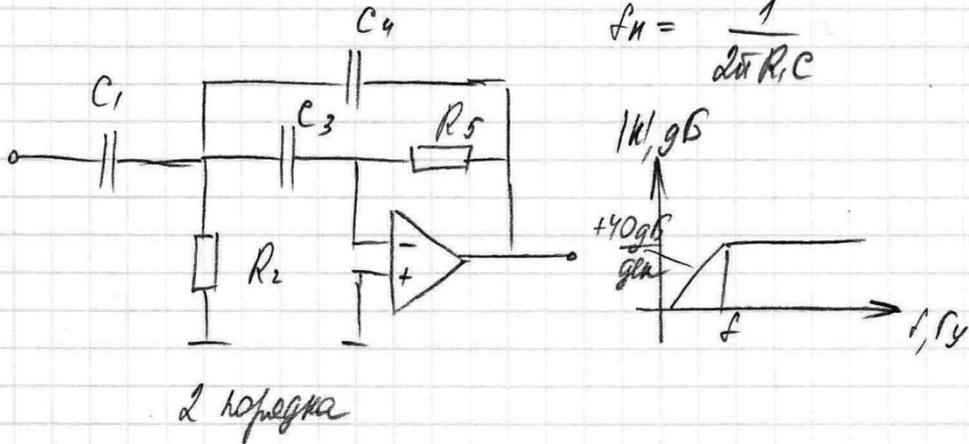
Так как на затвор подаётся только запирающее напряжение, то ток затвора будет представлять собой обратный ток закрытого р-п перехода и будет очень мал. Величина входного сопротивления $R_{вх}$ будет очень велика и может достигать 10^9 Ом.

2. ФВЧ на ОУ: схема, временные диаграммы, принцип работы.

90В4



$$f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$



Спросить Бутенко: временные диаграммы, принцип работы.

Билет 21

1. Отрицательная обратная связь в усилителях.

Обратной связью в усилителе (в целом) или же в отдельно взятом каскаде называется такая связь между входом и выходом, при которой часть энергии усиленного сигнала с выхода передаётся на вход.

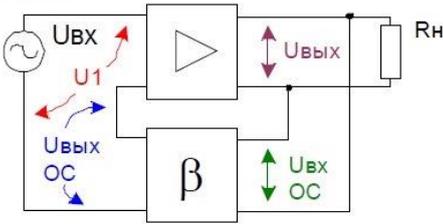
По признаку петлевого усиления различают **положительную ОС (ПОС) и ООС**.

При **ООС** сигнал, проходя цепь ОС, будет подаваться в противофазе (если он гармонический) с входным сигналом.

В усилителях, в основном, применяется ООС;

Влияние ООС на основные показатели усилителя.

Рассмотрим влияние ООС на работу усилителя на примере последовательной ОС по напряжению.



$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ - коэффициент усиления усилителя без обратной связи

$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1}$ - это коэффициент усиления усилителя с ОС

$$\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ.ОС}}}{U_{\text{ВХ.ОС}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.ОС}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \quad (1)$$

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ.ОС}} + U_{\text{ВХ}}} \quad (2)$$

Из формулы (1) видно, что $U_{\text{ВЫХ.ОС}}$ будет равняться β , умноженному на $U_{\text{ВЫХ}}$ и подставленному в формулу (2).

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} + \beta \cdot U_{\text{ВЫХ}}}$$

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}\right)}$$

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{(1 + \beta \cdot K)}$$

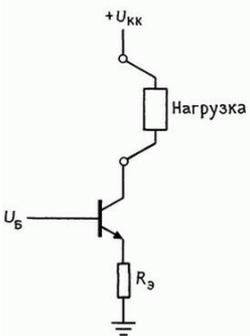
$(1 + \beta \cdot K)$ - глубина обратной связи.

Вывод: последняя формула показывает то, что ООС уменьшает коэффициент усиления усилителя.

Кроме того, что введение ООС уменьшает коэффициент усиления усилителя, **но**

увеличивается полоса пропускания, уменьшаются нелинейные и частотные искажения, несколько возрастает входное сопротивление.

2. Транзисторный источник тока.



Очень хороший источник тока можно построить на основе транзистора. Работает он следующим образом: напряжение на базе $U_б > 0.6 \text{ В}$ поддерживает эмиттерный переход в открытом состоянии: $U_э = U_б - 0.6 \text{ В}$. В связи с этим

$I_э = \frac{U_э}{R_э} = \frac{(U_б - 0.6 \text{ В})}{R_э}$. Так как для больших значений коэффициента $h_{21э}$ $I_э \cong I_к$, то

$I_к \cong \frac{(U_б - 0.6 \text{ В})}{R_э}$ независимо от напряжения $U_к$ до тех пор, пока транзистор не перейдет в режим насыщения ($U_к > U_э + 0.2 \text{ В}$).

Билет 22

1. Положительная обратная связь в усилителе.

Обратной связью в усилителе (в целом) или же в отдельно взятом каскаде называется такая связь между входом и выходом, при которой часть энергии усиленного сигнала с выхода передаётся на вход.

По признаку петлевого усиления различают **положительную ОС (ПОС) и ООС**.

При **ПОС** сигнал на вход усилителя через цепь ОС поступает в фазе (к гармоническим сигналам) со входным сигналом.

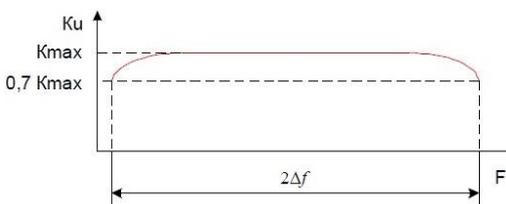
ПОС применяется в генераторах

$$K_{ос} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K_0}{1 - \beta K_0}$$

Возможны три случая:

1. $\beta K_0 < 1$. Ясно, что это когда $K_{ос} > K_0$. Казалось бы, это очень полезный случай – коэффициент усиления увеличился, его можно сделать сколь угодно большим. Но как мы видели раньше при обсуждении ООС, обычно коэффициент усиления усилителя плоховат (не очень стабилен), а при увеличении его за счёт ПОС он становится совсем нестабильным. Поэтому этот случай совсем не используется.
2. $\beta K_0 = 1$. В этом случае формула вообще не справедлива, так как в знаменателе получается 0, а на 0 делить нельзя. Нужно заново рассмотреть вывод формулы, чтобы учесть что-то что мы не учли при её выводе. Но мы этого делать не будем, скажем только, что случай бесконечно большого коэффициента усиления соответствует условию генерации сигнала – усилитель превращается в генератор. Вот это как раз используется: практически всегда, когда надо сделать генератор синусоидальных, прямоугольных или других периодических сигналов, берут хороший усилитель и делают ПОС, удовлетворяющую указанному условию.
3. $\beta K_0 > 1$. Ясно, что подсчитать результат по формуле можно, $K_0 < 0$. Но подозрение на применимость осталось, ведь что-то мы не учли. Более внимательное рассмотрение показывает, что это тоже ситуация, когда получается из усилителя генератор.

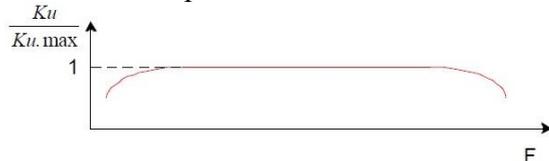
2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя.



Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляет собой зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты при постоянной амплитуде входного сигнала. (Зависимость отношения амплитуды выхода ко входной)

$$U_{вых} = f(F) \text{ при } U_{вх} = Const.$$

Часто АЧХ представляют в виде зависимости $K_n = f(F)$ при $U_{вх} = Const$.



В радиотехнике часто применяют нормированные АЧХ. Нормированная АЧХ представляет собой следующую зависимость: $\frac{K_u}{K_{u,max}} = f(F)$ при $U_{вх} = Const$

1. Токовые зеркала.

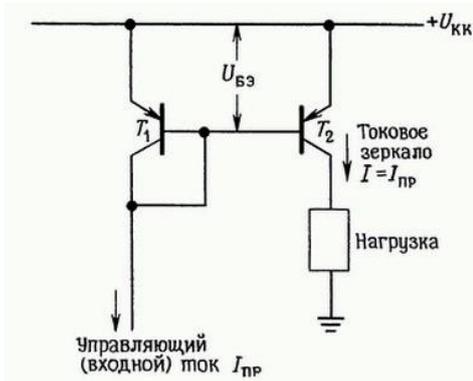
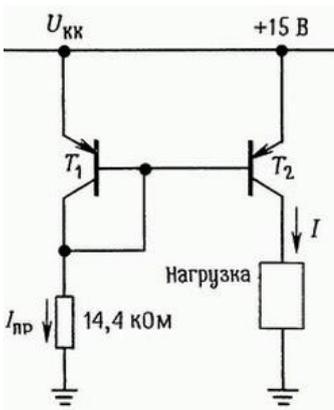


Рис. 2.44. Классическая схема токового зеркала на основе согласованной пары биполярных транзисторов. Отметим, что положительное питающее напряжение принято обозначать $U_{кк}$, даже в тех случаях, когда используются транзисторы $p-n-p$ -типа.

От схемы смещения с использованием согласованной пары транзисторов легко перейти к так называемому токовому зеркалу (рис. 2.44). Работа токового зеркала «программируется» путем задания коллекторного тока транзистора T_1 . Напряжение $U_{бэ}$ для T_1 устанавливается в соответствии с заданным током, температурой окружающей среды и типом транзистора. В результате оказывается заданным режим схемы, и транзистор T_2 , согласованный с транзистором T_1 (лучше всего использовать монолитный сдвоенный транзистор), передает в нагрузку такой же ток, что задан для T_1 . Небольшими базовыми токами можно пренебречь.

Одно из достоинств описанной схемы состоит в том, что ее диапазон устойчивости по напряжению равен $U_{кк}$ за



вычетом нескольких десятых долей вольта, так как нет падения напряжения на эмиттерном резисторе. Кроме того, во многих случаях удобно задавать ток с помощью тока. Легче всего получить управляющий ток $I_{пр}$ с помощью резистора (рис. 2.45). В связи с тем, что эмиттерные переходы транзисторов представляют собой диоды, падение напряжения на которых мало по сравнению с $U_{кк}$, резистор 14,4 кОм формирует управляющий, а следовательно, и выходной ток величиной 1 мА. Токовые зеркала можно использовать в тех случаях, когда в транзисторной схеме необходим источник тока. Их широко используют при проектировании интегральных схем, когда: а) под рукой есть много согласованных транзисторов и б) разработчик хочет создать схему, которая бы работала в широком диапазоне питающих напряжений. Существуют даже

безрезисторные интегральные операционные усилители, в которых режимный ток всего усилителя задается с помощью одного внешнего резистора, а токи отдельных внутренних усилительных каскадов формируются с помощью токовых зеркал.

Токовое зеркало Уилсона.

На рис. 2.48 представлено еще одно токовое зеркало, обеспечивающее высокую степень постоянства выходного тока.

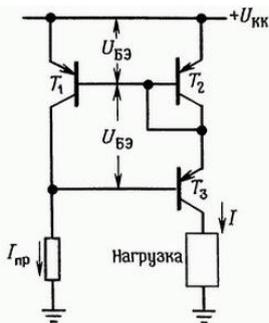


Рис. 2.48. Токовое зеркало Уилсона. Влияние изменений напряжения на нагрузке на выходной ток подавлено за счет каскадного включения транзистора T_3 , которое позволяет уменьшить изменения напряжения транзистора T_1 .

2. Многокаскадный усилитель.

Усилительные каскады имеют ограниченный коэффициент усиления, зависящий от параметров транзисторов и других компонентов схемы. Эти одиночные каскады, как правило, не в состоянии обеспечить требуемый коэффициент усиления. Поэтому строят **многокаскадные усилители**, представляющие **последовательное соединение одиночных усилительных каскадов**. В настоящее время промышленность освоила выпуск интегральных многокаскадных усилителей различного назначения. Они являются готовыми функциональными узлами с известными параметрами. Комбинируя и соединяя их между собой соответствующим образом, реализуют многокаскадные усилители, имеющие требуемые параметры и характеристики преобразования.

Можно выделить следующие типы связи между микросхемами и отдельными усилительными каскадами: гальваническую (непосредственную); емкостную (с помощью RC-цепочек); трансформаторную; с помощью частотно-зависимых цепей; оптронную.

Для сравнительно низкочастотных усилителей чаще всего используют **первый и второй тип** связи. **Третий** применяют реже из-за больших габаритов трансформаторов, невозможности их микроминиатюризации, высокой стоимости, сложности изготовления, повышенных нелинейных искажений. Однако трансформаторная связь успешно может быть использована при необходимости получить максимальное усиление по мощности. **Четвертый тип** используют при создании избирательных усилителей, а **пятый** применяется сравнительно редко, только в специальных случаях, когда при низкой рабочей частоте требуется хорошая гальваническая развязка между каскадами.

1. Основные параметры и характеристики усилителей.

Параметры:

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_2}$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_2}$$

В многокаскадном усилителе общий коэффициент усиления равен :

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_N.$$

Часто коэффициент усиления выражают в логарифмической мере - в Дб:

$$K_U [\text{Дб}] = 20 \lg(K_U) ;$$

Тогда в многокаскадном усилителе коэффициенты усиления суммируются:

$$K_{\text{общ}} [\text{Дб}] = K_1 [\text{Дб}] + \dots + K_N [\text{Дб}] ;$$

Для усилителей с токовым входом и потенциальным выходом - **сопротивление прямой передачи**

$$R_n = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}, \text{ кОм}$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$$

Выходное сопротивление :

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} \Big|_{U_2 = 0; R_H = \infty} \quad \text{или} \quad R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} \Big|_{I_2 = 0; R_H = \infty}$$

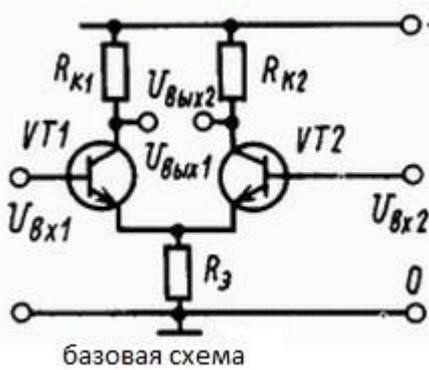
Характеристики:

Амплитудная характеристика — это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) усилителя. АЧХ — это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты, а ФЧХ — это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты.

Билет 24

1. Дифференциальные транзисторные каскады.



Дифференциальный усилительный каскад имеет два входа и усиливает разность напряжений, приложенных к ним. Если на оба входа подать одинаковое (синфазное) напряжение, то усиление будет чрезвычайно мало. Дифференциальный усилительный каскад *не усиливает синфазный сигнал*. Дифференциальный каскад состоит из двух транзисторов, эмиттеры которых соединены и подключены к общему резистору R_3 . Для сигнала $U_{вх}$ транзистор VT1 включен по схеме с ОЭ, а транзистор VT2 — по схеме с ОБ. Для сигнала $U_{вх2}$ транзистор VT1 включен по схеме с ОБ, а транзистор VT2 — по схеме с ОЭ.

2. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи. Гетеропереходы.

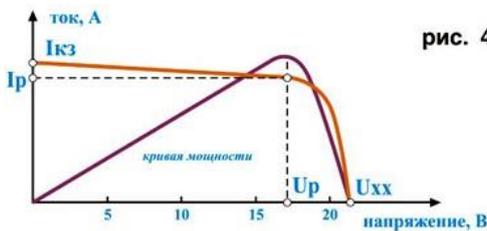


рис. 4

Напряжение, при котором ток равен 0, называется **напряжением холостого хода ($U_{ох}$)**. С другой стороны, ток, при котором напряжение равно 0, называется **током короткого замыкания ($I_{ск}$)**. В этих крайних точках ВАХ **мощность модуля равна 0**. На практике, система работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточная мощность. Лучшее сочетание называется **точкой**

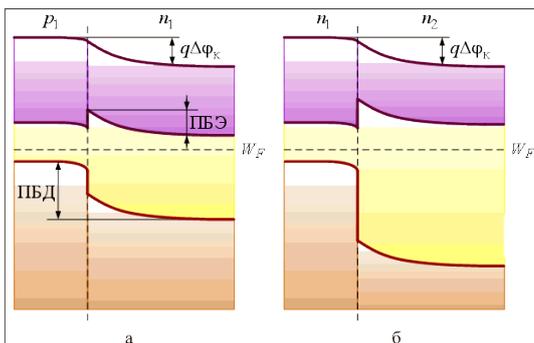
максимальной мощности (ТММ, или МРР). Соответствующие напряжение и ток обозначаются как U_p (номинальное напряжение) и I_p (номинальный ток). Именно для этой точки определяются номинальная мощность и КПД солнечного модуля.

Гетеропереходом называют переходный слой с существующим там диффузионным электрическим полем между двумя различными по химическому составу полупроводниками, обладающие различной шириной запрещенной зоны.

Для получения гетеропереходов хорошего качества необходимо, чтобы у материалов образующих переход с высокой точностью совпадали два параметра: **температурный коэффициент расширения и постоянная кристаллической решетки**, что ограничивает выбор материалов для гетеропереходов. В настоящее время наиболее исследованными являются пары: германий – арсенид галлия (Ge-GaAs), арсенид галлия – фосфид индия (GaAs-InP), арсенид галлия – арсенид индия (GaAs-InAs), германий – кремний (Ge-Is).

Каждый из полупроводников, образующих гетеропереход может иметь различный тип электропроводности. Поэтому для каждой пары полупроводников в принципе возможно осуществить четыре типа гетероструктур: p1-n2; Ipr ср max; n1-p2 и p1-p2.

При образовании гетероперехода из-за разных работ выхода электронов из разных полупроводников



происходит перераспределение носителей заряда в приконтактной области и выравнивание уровней Ферми в результате установления термодинамического равновесия (рис. 1.26). Остальные энергетические уровни и зоны должны соответственно изогнуться, т. е. в гетеропереходе возникают диффузионное поле и контактная разность потенциалов. При этом энергетический потолок верхней свободной зоны должен быть непрерывным. Энергетический уровень потолка верхней свободной зоны является энергетическим уровнем потолка зоны

проводимости, т. к. свободные энергетические зоны перекрывают друг друга.

Рис. 1.26. Зонные энергетические диаграммы гетеропереходов:

а – выпрямляющий гетеропереход между полупроводниками р- и n-типа с преимущественной инжекцией электронов в узкозонный полупроводник;

б – выпрямляющий гетеропереход между полупроводниками n-типа без инжекции неосновных носителей заряда

Ширина энергетических зон различных полупроводников различна. Поэтому на границе раздела двух полупроводников получается обычно **разрыв дна проводимости**. Разрыв дна зоны проводимости определяется различием энергий сродства к электрону двух контактирующих полупроводников (энергия сродства к электрону – разница энергий потолка верхней свободной зоны и дна проводимости).

В результате разрывов дна зоны проводимости и потолка валентной зоны высота потенциальных барьеров для электронов и дырок в гетеропереходе **оказывается различной**. Это является особенностью гетеропереходов, обуславливающей специфические свойства гетеропереходов в отличие р-n-переходов, которые формируются в монокристалле одного полупроводника.

Если вблизи границы раздела двух полупроводников, образующих гетеропереход, возникают обедненные основными носителями слои, то основная часть внешнего напряжения, приложенного к структуре с гетеропереходом, будет падать на обедненных слоях. Высота потенциального барьера для основных носителей заряда будет изменяться: уменьшается при полярности внешнего напряжения, противоположной полярности контактной разности потенциалов, и увеличивается при совпадении полярностей внешнего напряжения и контактной разности потенциалов. Таким образом, гетеропереходы могут обладать **выпрямляющим свойством**.

Из-за различия по высоте потенциальных барьеров для электронов (ПБЭ) и дырок (ПБД) прямой ток через гетеропереход связан в основном с движением носителей заряда только одного знака. Поэтому гетеропереходы могут быть как инжектирующими неосновные носителя заряда (рис. 1.26, а), так и неинжектирующими (рис. 1.26, б). Инжекция неосновных носителей заряда происходит всегда из широкозонного в узкозонный полупроводник. В гетеропереходах, образованных полупроводниками одного типа электропроводности, выпрямление происходит без инжекции неосновных носителей заряда.