

МОДУЛЬ 3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ГЕНЕРАТОРЫ

В результате изучения модуля студенты должны:

- **знать** принципы построения, характеристики и параметры различных типов усилителей и генераторов гармонических колебаний;
- **уметь** характеризовать принципы действия усилителей различных типов и генераторов;
- **уметь** оценивать принципиальные электрические схемы усилителей и генераторов.
- **уметь** ранжировать новые знания;
- **уметь** производить выбор электронной аппаратуры в зависимости от конкретных требований;

Изучение модуля должно способствовать формированию у студентов самостоятельности и ответственности при выполнении индивидуальных заданий.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Новые понятия

Каскад – схема одноступенчатого усилителя, построенная на одном усилительном элементе (лампа, биполярный или полевой транзистор).

ОЭ, ОК, ОБ – схемы включения биполярного транзистора (схемы с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой).

ОИ, ОС, ОЗ - схемы включения полевого транзистора (схемы с общим истоком, общим стоком, общим затвором).

ОК, ОА, ОС – схемы включения лампы (схемы с общим катодом, общим анодом, общей сеткой).

Нагрузочная прямая – прямая, которая строится на семействе выходных характеристик транзистора в соответствии с уравнением $E_2 = U_{\text{э}y} + i_k R_i$.

Точка отсечки – точка, полученная при пересечении нагрузочной прямой с выходной характеристикой биполярного транзистора при $I_6 = 0$.

Однотактный УМ - усилитель мощности, в котором усиление входного (например, синусоидального) сигнала происходит за один такт, т. е. положительная и отрицательная полуволны усиливаются одновременно.

Двухтактный УМ - усилитель мощности, в котором процесс усиления входного сигнала осуществляется за два такта работы схемы (за один такт усиливается положительная полуволна синусоидального напряжения, за второй - отрицательная полуволна).

Понятия для повторения

Терморезистор – резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика, которая отражает зависимость коэффициента усиления по напряжению K_U от частоты.

Резонансная частота – частота, при которой наблюдается явление резкого увеличения амплитуды колебаний (резонанс).

Квазирезонансная частота – частота, величина которой близка к резонансной.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Лекция 1. Электронные усилители

План лекции:

1. Параметры и характеристики усилителей.
2. Принцип построения усилительных каскадов.
3. Характеристики усилителей.
4. Особенности многокаскадных усилителей.
5. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления).

Параметры и характеристики усилителей

Усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров электрического сигнала (U, I, P) (рисунок 3.1).

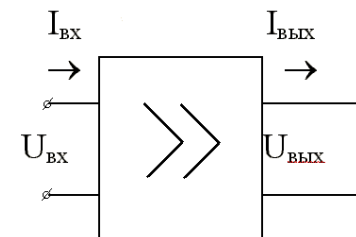


Рисунок 3.1 – К определению параметров усилителя

Основными параметрами усилителя являются:

- 1) коэффициент усиления по напряжению: $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$;
- 2) коэффициент усиления по току: $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$;
- 3) коэффициент усиления по мощности: $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_U K_I$;
- 4) входное сопротивление $R_{\text{ВХ}}$;

5) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$.

Основными характеристиками усилителя являются:

- 1) амплитудная (АХ), $U_{\text{вых.п}} = f(U_{\text{вх.п}})$;
- 2) амплитудно-частотная (АЧХ), $K_u = f(f)$;
- 3) фазочастотная (ФЧХ), $\varphi = f(f)$.

Многие усилители состоят из нескольких ступеней, которые осуществляют последовательное усиление сигнала и называются каскадами.

Классификация усилителей

Усилитель с **линейным режимом работы** обеспечивает на выходе сигнал, близкий по форме к входному. Такие усилители классифицируются по различным признакам [1]:

1. В зависимости от параметра, который необходимо усилить:

- усилители напряжения;
- усилители тока;
- усилители мощности.

2. По элементной базе:

- ламповые усилители (ОК, ОА, ОС);
- усилители на биполярных транзисторах (ОЭ, ОК, ОБ);
- усилители на полевых транзисторах (ОИ, ОС, ОЗ).

3. По виду АЧХ:

- усилители постоянного тока (УПТ);
- усилители звуковой частоты (УЗЧ);
- усилители высокой частоты (УВЧ);
- широкополосные (ШПУ);
- узкополосные (УПУ).

4. По способу соединения каскадов между собой в многокаскадном усилителе:

- усилители с непосредственной или резистивной связью (обычно используется в УПТ);
- усилители с резистивно-емкостной связью (такая связь обычно используется в усилителях переменного напряжения: УНЧ, УВЧ, ШПУ);
- усилители с трансформаторной связью (обычно используется в усилителях мощности).

В усилителях с **нелинейным режимом работы** отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями входного и выходного токов I и напряжения U . После достижения некоторой величины напряжения входного сигнала напряжение на выходе остается неизменным, т. е. ограничивается на некотором уровне. Та-

кие усилители нашли применение в устройствах для преобразования синусоидального сигнала в импульсный.

Принцип построения усилительных каскадов

Рассмотрим структурную схему [3, 5] (рисунок 3.2).

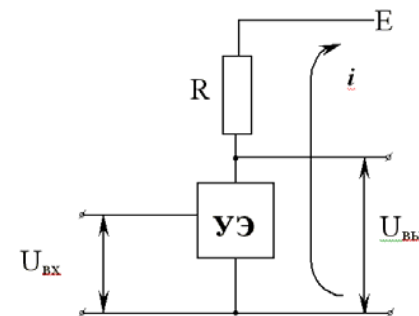


Рисунок 3.2 – Структурная схема усилителя

Основными элементами каскада являются усилительный элемент УЭ, которым является биполярный или полевой транзистор (или лампа), резистор R и источник питания E [2].

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, который задается входным сигналом.

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов является каскад с общим эмиттером ОЭ (рисунок 3.3).

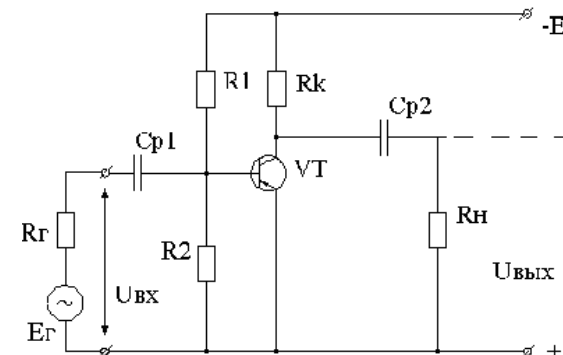


Рисунок 3.3 - Схема усилительного каскада с ОЭ

Основные элементы схемы:

- источник питания E_K («+» E_K для $n-p-n$, «-» E_K для $p-n-p$);
- биполярный транзистор $n-p-n$ -типа (VT);
- сопротивление в цепи коллектора R_K , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор C_{P1} , который не пропускает постоянную составляющую тока, т. е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор C_{P2} , не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения $R1/R2$, включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т. е. в отсутствие входного сигнала.

Характеристики усилителей

1. Амплитудная (АХ), $U_{\text{вых.}} = f(U_{\text{вх.}})$ (рисунок 3.4).

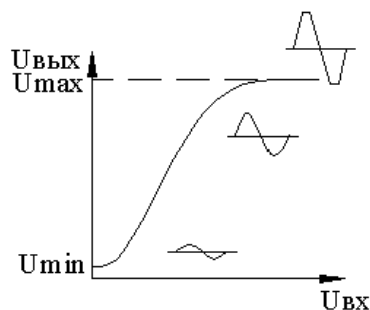


Рисунок 3.4 – Амплитудная характеристика УК

По величине отношения $U_{\text{min}}/K_{\text{uo}}$ оценивают уровень минимальных напряжений входного сигнала (или чувствительность) усилителя.

АХ условно можно разделить на два участка:

- линейный, где наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала;
- нелинейный, где пропорциональная зависимость нарушается.

Такие искажения выходного сигнала, которые возникают ввиду нелинейности входных и выходных ВАХ транзисторов, называют нелинейными и оцениваются коэффициентом нелинейных искажений [6]:

$$k = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} \cdot 100\%,$$

где

P_1 – мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения;

P_2, P_3, P_4, \dots – мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-й, 3-й, 4-й и т. д. гармонических составляющих напряжения.

2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), $K_U = f(f)$ (рисунок 3.5).

Наличие в схеме усилителя конденсаторов и зависимость параметров транзистора от частоты входного сигнала приводит к тому, что при изменении частоты $U_{\text{вых}}$ изменяется как по амплитуде, так и по фазе.

Снижение K_U в области нижних и верхних частот называют частотными искажениями, которые оценивают коэффициентами частотных искажений.

Обычно они равны: $M_H = M_B \approx \sqrt{2}$.

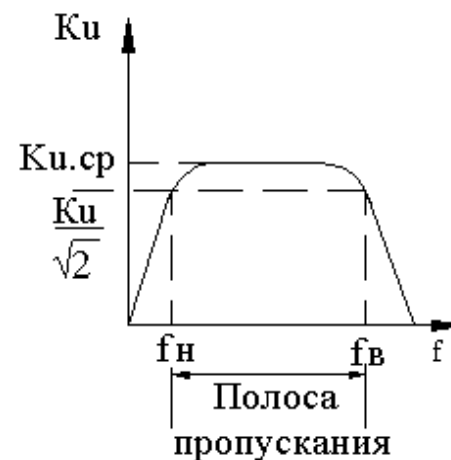


Рисунок 3.5 – Амплитудно-частотная характеристика УК

Частоты f_n и f_b , соответствующие допустимым значениям коэффициента частотных искажений M , называют нижней и верхней

граничными частотами, а диапазон частот $\Delta f = f_в - f_н$, в котором M не превышают допустимых значений, называют полосой пропускания усилителя.

3. Фазочастотная характеристика (ФЧХ), $\varphi = f(f)$ (рисунок 3.6).

Наличие конденсаторов в схеме усилителя приводит к появлению в нем фазочастотных искажений.

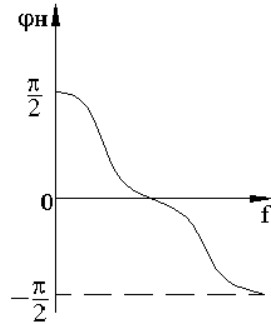


Рисунок 3.6 – Фазочастотная характеристика УК

Фазочастотная характеристика усилителя показывает, что в области нижних частот выходное напряжение $U_{ввых}$ опережает по фазе входное $U_{вх}$, а в области верхних частот отстает от него. В случаях, когда $f \rightarrow 0$ и $f \rightarrow \infty$, угол сдвига фаз стремится к значению $\pi/2$ и к $-\pi/2$. С понижением частоты входного сигнала появление фазового сдвига обусловлено тем, что ток в цепях с конденсаторами опережает по фазе напряжение.

Особенности многокаскадных усилителей

В многокаскадных усилителях число каскадов зависит от требуемых значений коэффициентов усиления K_U, K_I, K_P . Чем больше количество каскадов следует последовательно соединить между собой. Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рисунке 3.7.

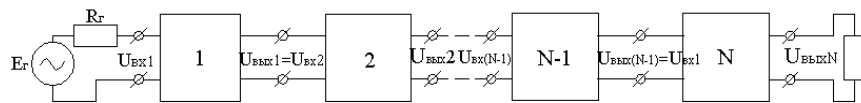


Рисунок 3.7 – Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_n}{E_2} = \frac{U_{ввых1}}{E_2} = \frac{U_{ввых2}}{U_{вх2}} \dots \frac{U_{ввыхN}}{U_{вхN}} = K_{U1} K_{U2} \dots K_{UN}.$$

Следует отметить, что с увеличением числа каскадов коэффициент частотных искажений увеличивается: $M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n$ и, как следствие, Δf усилителя уменьшается.

Угол фазового сдвига в многокаскадном усилителе равен сумме углов фазовых сдвигов, создаваемых всеми конденсаторами в схеме: $\varphi_n = \varphi_{нр1} + \varphi_{нр2} + \dots + \varphi_{нрn}$.

Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)

В зависимости от положения рабочей точки в режиме покоя на характеристиках транзисторов, а также значения усиливаемого напряжения различают 3 основных режима работы усилительных каскадов (или классов усиления): *A, B, C* [2, 4, 10].

Основными характеристиками этих режимов являются:

- а) нелинейные искажения;
- б) коэффициент полезного действия (КПД).

Режим *A* характеризуется тем, что рабочую точку Π в режиме покоя выбирают на линейном участке (обычно посередине) входной и переходной характеристик и, соответственно, посередине линии нагрузки на семействе выходных характеристик (рисунок 3.8). В этом случае нелинейные искажения усиливаемого напряжения будут минимальными. Благодаря этому режим *A* широко применяют в усилителях напряжения. Однако он имеет и существенный недостаток – очень низкий КПД.

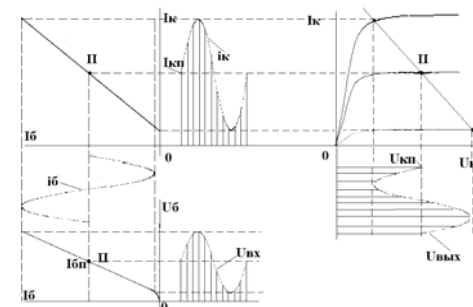


Рисунок 3.8 – Положение рабочей точки в режиме *A* на характеристиках УК

Значение КПД усилительного каскада в режиме *A* всегда меньше 0,5 (обычно оно редко превышает 0,3).

Режим *B* характеризуется тем, что рабочую точку П1 выбирают в начале переходной характеристики (точка отсечки на рисунке 3.9).

В режиме *B* переменные составляющие тока *I* и напряжения *U* транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения, т. е. появляются большие нелинейные искажения. Режим *B* характеризуется значительно более высоким КПД усилителя по сравнению с режимом *A*, т. к. $I_{кит} \gg I_0$. КПД усилителя в режиме *B* может достигать 80%. Поэтому режим *B* используется обычно в усилителях мощности [2].

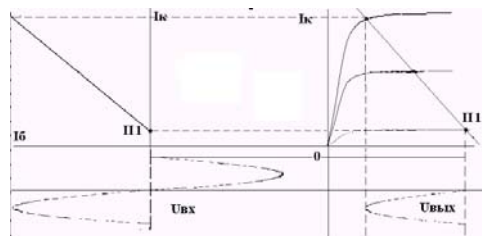


Рисунок 3.9 – Положение рабочей точки в режиме *B* на характеристиках УК

Режим *C* характеризуется тем, что рабочую точку П2 выбирают за точкой отсечки и ток в транзисторе возникает только в некоторой части положительного полупериода входного напряжения (рисунок 3.10).

Этот режим сопровождается большими искажениями усиливаемого напряжения, но значение КПД может быть очень высоким и приближаться к единице. Режим *C* применяют в избирательных усилителях и автогенераторах [3, 6, 9].

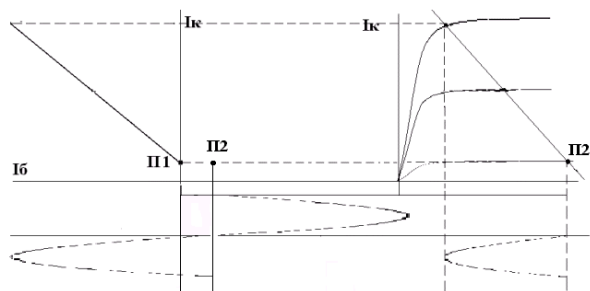


Рисунок 3.10 – Положение рабочей точки в режиме *C* на характеристиках УК

Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите основные элементы усилительного каскада.
2. Объясните характер изменения амплитудной характеристики усилителя.
3. Чем отличается режим усиления класса *A* от классов *B* и *C*? Их использование в усилителях.
4. Что такое коэффициент частотных искажений, как он изменяется и определяется?
5. Как по характеристикам усилителя определить полосу пропускания усилителя?
6. Как определить положение рабочей точки в режиме усиления класса *B*?

Лекция 2. Температурная стабилизация усилителей. Обратные связи в усилителях

План лекции:

1. Эмиттерная температурная стабилизация.
2. Коллекторная температурная стабилизация.
3. Обратные связи в усилителях.
4. Схемы включения усилительных каскадов (УК).

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. При повышении температуры транзистора за счет возрастания числа неосновных носителей заряда в полупроводнике увеличивается I_k . Это приводит к изменению коллекторных характеристик транзистора. При увеличении тока I_k на величину ΔI_k коллекторное напряжение уменьшается на величину $\Delta U_k = R_k \Delta I_k$ (рисунок 3.11).

Это вызывает смещение рабочей точки на коллекторной и переходной характеристиках (из П1 в П2). В некоторых случаях повышение температуры может вывести рабочую точку за пределы линейного участка переходной характеристики и нормальная работа усилителя нарушится.

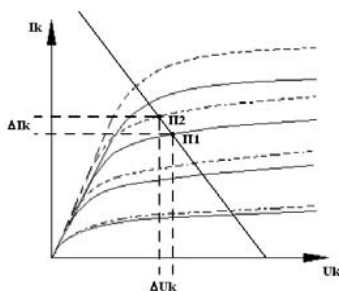


Рисунок 3.11 – Зависимость характеристик транзистора от температуры

Поэтому для температурной стабилизации усилителей используются специальные способы:

- а) эмиттерная стабилизация;
- б) коллекторная стабилизация.

Эмиттерная температурная стабилизация

Для уменьшения влияния температуры на характеристику усилительного каскада с ОЭ в цепь эмиттера включают резистор R_3 , шунтированный конденсатором (рисунок 3.12).

Напряжение $U_{бэ}$ зависит от сопротивления резисторов и определяется уравнением:

$$U_{бэ} = E_k R_2 / (R_1 + R_2) - R_3 I_3, \text{ где}$$

первый член уравнения есть потенциал базы, а второй – потенциал эмиттера.

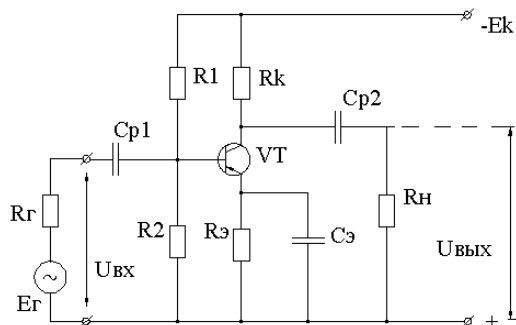


Рисунок 3.12 – Схема УК с эмиттерной температурной стабилизацией

При наличии R_3 увеличение эмиттерного тока $I_3 = I_б + I_к$ из-за повышения температуры приводит к возрастанию падения напряже-

ния на сопротивлении R_3 . Это вызывает снижение потенциала базы по отношению к потенциалу эмиттера, т. е. напряжение $U_{бэ}$ уменьшается, а следовательно, уменьшаются токи I_3 и $I_к$.

Однако введение сопротивления R_3 изменяет работу усилительного каскада. Переменная составляющая эмиттерного тока i_3 создает на резисторе дополнительное падение напряжения $U_3 = R_3 i_3$, которое уменьшает усиливаемое напряжение, подводимое к транзистору:

$U_{бэ} = U_{вых} - R_3 i_3$. Коэффициент усиления усилительного каскада при этом будет уменьшаться. Это явление называется отрицательной обратной связью (ООС).

Для ослабления ООС параллельно сопротивлению R_3 включают емкость C_3 , сопротивление которой намного меньше R_3 .

Недостатком эмиттерной стабилизации является необходимость повышения напряжения питания коллекторной цепи, т. к. при включении сопротивления R_3 напряжение $U_к$ уменьшается за счет падения напряжения на сопротивлении R_3 .

Коллекторная температурная стабилизация

При этом способе стабилизации напряжение обратной связи подается из коллекторной цепи в цепь базы с помощью резистора $R1$ (рисунок 3.13).

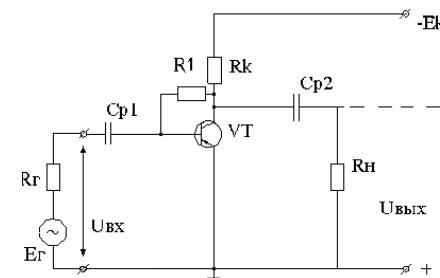


Рисунок 3.13 – Схема УК с коллекторной температурной стабилизацией

При повышении температуры ток $I_к$ увеличивается, а напряжение $U_к$ уменьшается. Это приводит к снижению потенциала базы и, как следствие, к уменьшению токов I_3 и $I_к$, которые стремятся к своему первоначальному значению. В результате ток $I_к$ и напряжение $U_к$ изменяются незначительно. Усилитель с коллекторной стабилизацией обладает меньшей стабильностью, чем усилитель с эмиттерной стабилизацией, но не требует повышения напряжения питания коллекторной цепи [1, 12, 13].

Обратные связи в усилителях

Обратной связью (ОС) в усилителях называют подачу части (или всего) выходного сигнала усилителя на его вход [4].

Структурная схема усилителя с ОС состоит из двух блоков: непосредственно усилителя и звена ОС, которое характеризуется коэффициентом передачи β (рисунок 3.14).

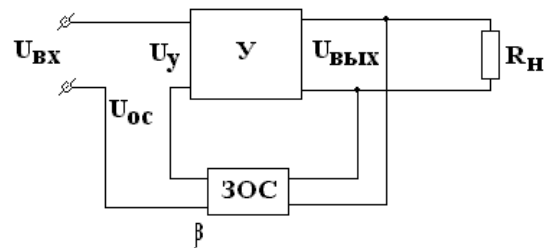


Рисунок 3.14 – Структурная схема УК с последовательной ОС

Виды ОС:

1. Специально созданные ОС, которые применяются для улучшения характеристик усилителя.
2. Паразитные ОС, которые возникают самопроизвольно и ухудшают характеристики усилителя.
3. В зависимости от параметра выходного сигнала:
 - ОС по напряжению: $U_{ос} = \beta U_{вых}$;
 - ОС по току: $U_{ос} = R_{ос} i_{вых}$;
 - комбинированная ОС (как по току, так и по напряжению).
4. В зависимости от способа подачи ОС на вход усилителя:
 - последовательная ОС (рисунок 3.14);
 - параллельная ОС (рисунок 3.15).

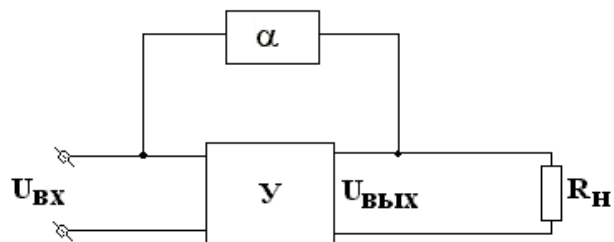


Рисунок 3.15 – Структурная схема УК с параллельной ОС

5. В зависимости от воздействия ОС:

-положительная ОС, когда $U_{вх}$ складывается с $U_{ос}$, в результате чего на усилитель подается увеличенное напряжение U_y ;

-отрицательная ОС, когда из $U_{вх}$ вычитается $U_{ос}$, в результате чего напряжения на входе U_y и выходе $U_{вых}$ усилителя уменьшаются.

Наиболее часто в усилителях применяют отрицательную ОС (ООС). Влияние ООС (последовательной по напряжению) на коэффициент усиления усилителя определяется следующим образом. В соответствии со структурной схемой (рисунок 3.14):

$$U_y = U_{вх} - U_{ос},$$

так как $U_{ос} = \beta U_{вых}$,

$$\text{то } U_{вх} = U_{ос} + U_y = U_y + \beta U_{вых}.$$

Для усилителя без ОС:

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

Для усилителя с ОС:

$$K_{ос} = U_{вых}/U_{вх} = U_{вых}/(U_y + \beta U_{вых}).$$

Разделив числитель и знаменатель на U_y , получим:

$$K_{ос} = K_u / (1 + \beta K_u).$$

Несмотря на снижение K_u , ООС улучшает свойства усилителя:

- 1) повышается стабильность коэффициента усиления усилителя при изменениях параметров транзисторов;
- 2) снижается уровень нелинейных искажений;
- 3) улучшается АЧХ усилителя;
- 4) увеличивается сопротивление $R_{вх}$ и уменьшается сопротивление $R_{вых}$ усилителя.

При ООС расширяется полоса пропускания усилителя Δf (рисунок 3.16). При введении ООС увеличивается сопротивление $R_{вх}$ и уменьшается сопротивление $R_{вых}$.

$$R_{вхос} = R_{вх}(1 + \beta K_u), \text{ а } R_{выхос} = R_{вых} / (1 + \beta K_u).$$

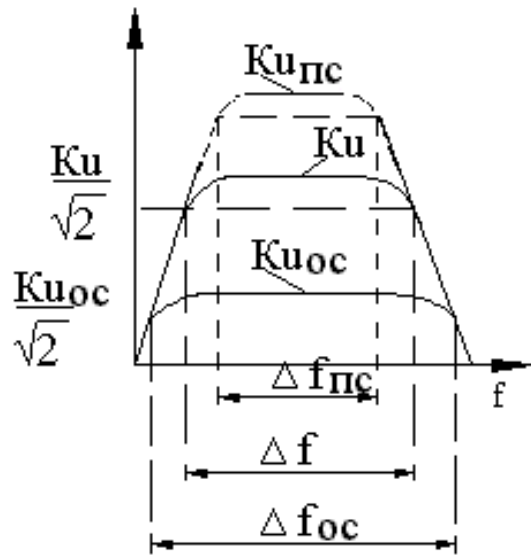


Рисунок 3.16 – АЧХ УК с различными видами ОС

Параллельная ООС приводит к увеличению входного тока $I_{вх}$ в связи с чем уменьшается сопротивление $R_{вхос}$ усилителя и сопротивление $R_{выхос}$:

$$R_{вхос} = (U_{вх} - U_y) / I_{вх},$$

$$R_{выхос} = R_{вых} / (1 + \beta K_u).$$

Положительная ОС в усилителях обычно нежелательна, однако она может возникать произвольно, например, через общие цепи питания усилительных каскадов [5].

Схемы включения усилительных каскадов (УК)

Следует отметить некоторые особенности УК с ОК и ОБ. В УК с ОК резистор, с которого снимается напряжение $U_{вых}$ включен в эмиттерную цепь, а коллектор по переменной составляющей тока I и напряжения U соединен непосредственно с общей точкой усилителя. Напряжение на вход $U_{вх}$ подается между базой и коллектором через разделительный конденсатор C_{p1} , а напряжение $U_{вых}$ снимается между эмиттером и коллектором через разделительный конденсатор C_{p2} . Резистор R_6 создает начальный ток смещения в цепи базы (рисунок 3.17).

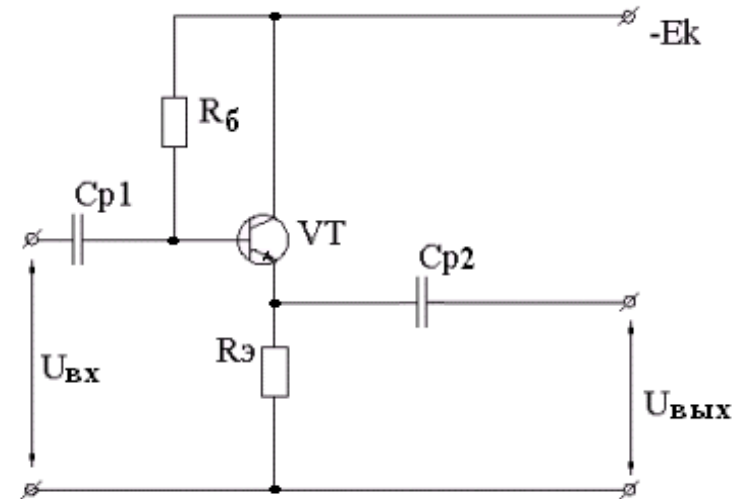


Рисунок 3.17 – Схема УК с ОК

УК с ОК имеет следующие параметры:

- 1) $K_u \approx 1$;
- 2) $K_p \approx K_i \approx K_{iоэ}$;
- 3) $R_{вх}$ большое;
- 4) $R_{вых}$ малое.

В УК с ОБ (рисунок 3.18) делитель R_{61} / R_{62} служит для создания оптимального тока базы в режиме покоя I_{60} . C_6 – имеет сопротивление $\ll R_{61}$ и падение напряжения на нем от переменной составляющей тока мало, поэтому можно считать, что по переменной составляющей тока база соединена с общей точкой усилителя. Напряжение $U_{вх}$ подается между К и Б через C_p .

УК с ОБ имеет следующие параметры:

- 1) $K_u \approx K_{иоэ}$;
- 2) $K_i < 1$;
- 3) $K_p = K_u K_i < K_{pоэ}$;
- 4) $R_{вх}$ – малое;
- 5) $R_{вых}$ – большое.

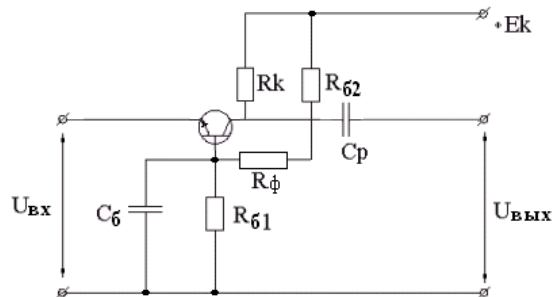


Рисунок 3.18 – Схема УК с ОБ

Особенности УК на полевых транзисторах (ПТ)

Принцип построения УК на ПТ тот же, что и на биполярных транзисторах. Особенность заключается в том, что ПТ управляется по входной цепи напряжением, а не током. По этой причине задание режима покоя в каскадах на ПТ осуществляется подачей во входную цепь каскада постоянного напряжения соответствующей величины и полярности.

Различают каскады с общим стоком (ОС), общим истоком (ОИ), общим затвором (ОЗ). Чаще всего применяются каскады с ОИ (рисунок 3.19). Особенностью и преимуществом каскадов на ПТ является то, что $R_{\text{вых}} \approx R_c = 10^3 \dots 10^4 \text{ Ом}$, а $R_{\text{вх}} = R_3 \approx 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}$, т. е. $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{вх}}$.

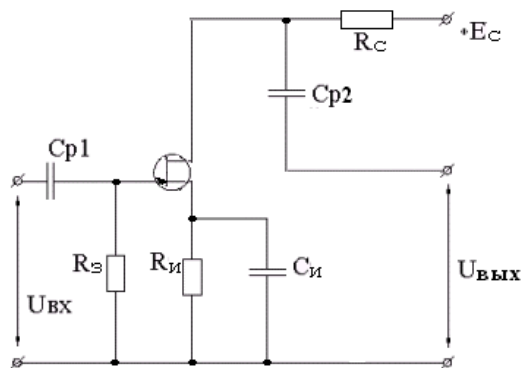


Рисунок 3.19 – УК на ПТ с ОИ

Вопросы для самоконтроля:

1. Объясните принцип температурной стабилизации усилителей.
2. В чем отличия между эмиттерной и коллекторной стабилизацией?
3. Что такое обратная связь в усилителях?
4. Назовите виды обратных связей в усилителях.
5. Каково влияние положительной и отрицательной обратных связей на параметры и характеристики усилителей?
6. Сравните схемы включения усилительных каскадов с ОЭ и ОБ.
7. Сравните схемы включения усилительных каскадов с ОК и ОЭ.

Лекция 3. Усилители мощности

План лекции:

1. Особенности и классификация усилителей мощности.
2. Однотактный усилитель мощности.
3. Двухтактные трансформаторные усилители мощности.
4. Бестрансформаторные усилители мощности.

Особенности и классификация усилителей мощности

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

1. По элементной базе:
 - а) УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме ОЭ, ОК, ОБ;
 - б) УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.
2. По используемому классу усиления:
 - а) однотактные (используют режим *A*);
 - б) двухтактные (используют режим *B* или *AB*).
3. По способу подключения нагрузки:
 - а) трансформаторные;
 - б) бестрансформаторные: с двумя источниками питания, с одним источником питания.

Основные параметры УМ:

- 1) коэффициент усиления по мощности K_p ;
- 2) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$;
- 3) КПД.

Расчет основных величин, характеризующих показатели работы УМ, проводят обычно графоаналитическим методом, с помощью характеристик транзистора. В УМ нашли применение три класса усиления (*A*, *AB*, *B*), отличающиеся положением точки покоя на ли-

нии нагрузки [7]. На рисунке 3.20 приведен пример коллекторных характеристик транзистора с ОЭ, на которые нанесены рабочие точки в режимах *A* и *B*.

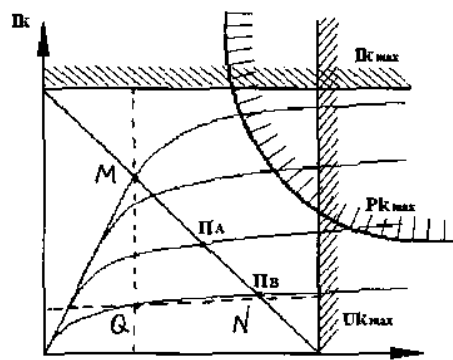


Рисунок 3.20 – Для расчета параметров УМ

В режиме класса *A* точка покоя Π_A будет находиться на нагрузочной прямой ($U_k = E_k; I_k = E_k/R_k; U_k = 0$) и соответствовать середине линейного участка переходной характеристики, где можно получить оптимальные значения тока базы и напряжения между базой и эмиттером.

В режиме класса *B* точка покоя Π_B располагается в крайней правой части линии нагрузки при напряжении $U_{05} = 0$. При наличии входного сигнала ток I_k транзистора протекает только в положительный полупериод. Так как чаще всего в УМ используют УК с общим эмиттером, то на семейство коллекторных характеристик можно нанести линии, соответствующие предельными режимами работы, которые, в свою очередь, определяются предельными эксплуатационными величинами (рисунок 3.20):

- максимальная мощность $P_{max} = P_{kmax}$;
- максимальное напряжение $U_{кэmax}$;
- максимальный ток I_{kmax} .

Площадь треугольника MQN , образованного линией нагрузки и линиями, параллельными осям координат и проведенными из точек M и N , будет пропорциональна мощности P_{max} , которую можно получить от транзистора в заданных условиях.

Коэффициент усиления по мощности находят по формуле:

$$K_p = P_k/P_0,$$

где $P_0 = 0,5U_{05}I_{05}$, а $P_k = 0,5U_{max}I_{kmax}$.

Если в результате расчета окажется, что получаемая в нагрузочном резисторе мощность будет меньше требуемой, то необходимо использовать более мощный транзистор.

Однотактный усилитель мощности

Однотактный УМ используется для получения небольших мощностей (рисунок 3.21).

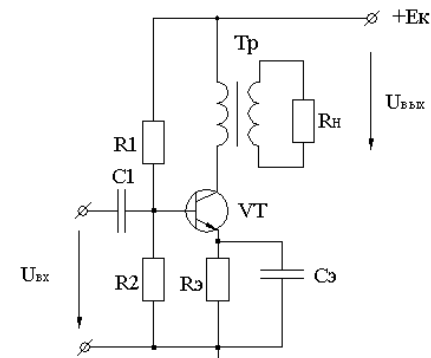


Рисунок 3.21 – Однотактный трансформаторный УМ

Назначение элементов.

1. Понижающий трансформатор ставят для согласования сопротивлений R_n и $R_{вых}$ усилителя мощности с коэффициентом $n = w_1/w_2 = \sqrt{R_{вых} / R_n}$, где w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток. Это значит, что при определенном n можно добиться равенства $R_{вых} = R_n$, т. е. выполнить условие получения P_{max} в нагрузочном устройстве.

2. Делитель R_{01}/R_{02} фиксирует по постоянному току потенциал базы.
3. Сопротивление R_3 – элемент эмиттерной температурной стабилизации.

4. Разделительный конденсатор C_p не пропускает постоянную составляющую тока, т. е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току.

Однотактный УМ работает в режиме *A* и усиление входного сигнала происходит за один такт, т. е. положительная и отрицательная полуволны усиливаются одновременно.

Двухтактные трансформаторные усилители мощности

Двухтактный УМ состоит из двух симметричных «плеч» (рисунок 3.22). Транзисторы VT1 и VT2, которые подбирают с максимально близкими характеристиками, работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе «плеч» УМ является противофазность токов и напряжений в цепях баз транзисторов.

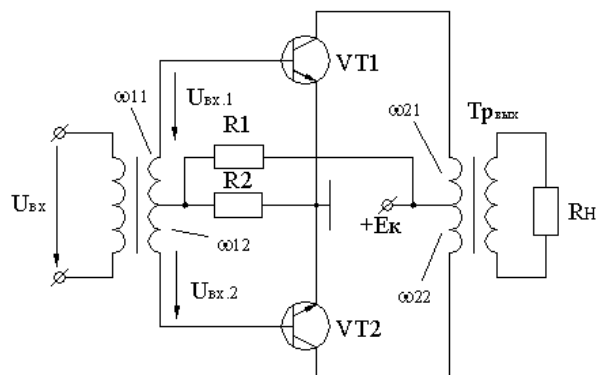


Рисунок 3.22 - Двухтактный трансформаторный УМ

Назначение элементов двухтактного УМ аналогично назначению соответствующих элементов однотактного УМ с учетом того, что они обслуживают два транзистора. Входной трансформатор Trвх обеспечивает получение двух одинаковых по модулю, но противофазных напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Выходной трансформатор Trвых суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. К вторичной обмотке Trвых подключен нагрузочный резистор. Преимущества двухтактных усилителей наиболее ощутимы при использовании режима В.

При подаче входного сигнала, начинающегося с положительной полуволны, на вторичной обмотке ω_{11} за счет самоиндукции Trвх действует отрицательная полуволна относительно общей точки обмоток, а на вторичной обмотке ω_{12} действует положительная полуволна. В результате VT2 остается закрытым, а VT1 открывается и через него течет коллекторный ток $i_{к1}$. В обмотке ω_{21} Trвых создается напряжение U_{21} , на нагрузке же за счет самоиндукции действует положительная полуволна.

При поступлении на вход каскада отрицательной полуволны напряжения полярность напряжений на вторичных обмотках Trвх изменяется на обратную. Теперь закрытым остается транзистор VT1, а в усилении сигнала будет участвовать VT2. На обмотке ω_{22} Trвых от протекания $i_{к2}$ от VT2 создается напряжение той же величины, которое будет трансформироваться в нагрузочную обмотку ω_n с обратной полярностью. На нагрузке получим отрицательную полуволну напряжения.

Таким образом, процесс усиления входного сигнала осуществляется в два такта работы схемы. Первый такт сопровождается усилением одной полуволны с участием одного транзистора, а второй такт – усилением другой полуволны с участием другого транзистора [3, 14, 15].

Бестрансформаторные усилители мощности

Двухтактные каскады усиления мощности выполняют и без использования трансформаторов, что обусловлено необходимостью уменьшения массы, габаритов и стоимости УМ.

Собирают такой УМ из транзисторов разных типов (рисунок 3.23), где

транзистор VT1 – типа *p-n-p*, а транзистор VT2 – типа *n-p-n*.

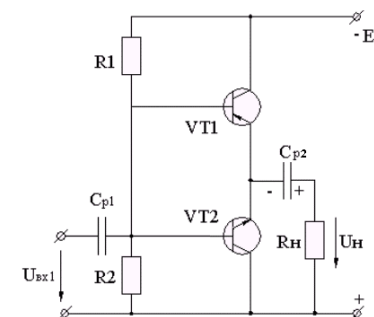


Рисунок 3.23 – Бестрансформаторный УМ

Конденсатор C_{p1} разделяет по постоянному току источник сигнала и входную цепь усилителя мощности. Конденсатор C_{p2} разделяется по току нагрузочный резистор и эмиттерные цепи транзисторов. На базы транзисторов действует одно и то же переменное напряжение $U_{вх}$. Однако в силу различной структуры транзисторов токи в цепях противофазные. Нагрузочный резистор подключен к

общей точке транзисторов, поэтому переменные токи в нем имеют одинаковое направление, а результирующий ток в два раза превышает переменный ток одного транзистора.

Существуют схемы бестрансформаторных усилителей мощности, где на входе используются два противофазных сигнала, которые создаются с помощью предвыходного фазоинверсного каскада. Эти схемы различаются двумя способами подключения нагрузки к выходу каскада и, соответственно, двумя способами осуществления питания схемы [1].

При первом способе каскад питают от двух источников $E_{к1}$ и $E_{к2}$, имеющих общую точку, а нагрузку подключают между точкой соединения эмиттера и коллектора транзисторов и общей точкой источников питания (рисунок 3.24).

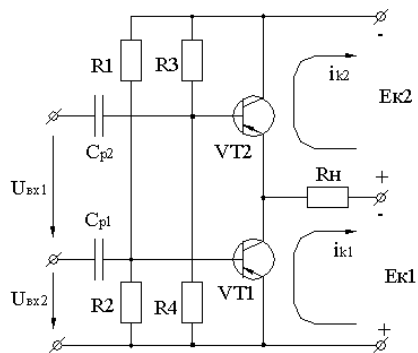


Рисунок 3.24 – Бестрансформаторный УМ с двумя источниками питания

При втором способе питание каскада осуществляется от одного общего источника, а нагрузку подключают через конденсатор большой емкости (рисунок 3.25) [2].

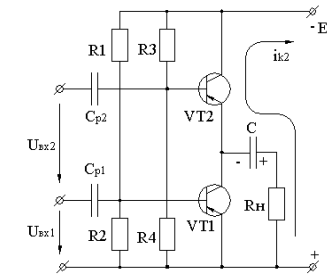


Рисунок 3.25 – Бестрансформаторный УМ с одним источником питания

В отсутствие сигналов на входе $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ конденсатор C заряжен до напряжения $0,5 E_{к}$. В такте работы транзистора $VT1$, $VT2$ закрыт и конденсатор выполняет функцию источника питания нагрузки. В такте работы $VT2$ ток нагрузки протекает через источник питания $E_{к}$. При этом ток $i_{к2}$, протекающий через конденсатор C , наполняет его энергией, компенсируя тем самым отданную в нагрузку энергию в предыдущем такте. $VT1$ и $VT2$ в схемах с двумя противофазными входными сигналами имеют различные способы включения: $VT1$ – по схеме ОЭ, $VT2$ – по схеме ОК. Это значит, что коэффициенты усиления по напряжению различны и должны быть приняты меры по выравниванию коэффициентов усиления для обеих полувольт входного сигнала. Эту задачу решают обеспечением соответствующих коэффициентов усиления по двум входам фазоинверсного каскада.

Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите классификацию усилителей мощности.
2. Перечислите основные параметры усилителя мощности.
3. Назовите отличия однотактного усилителя мощности от двухтактного.
4. Каковы преимущества и недостатки различных схем усилителей мощности?
5. Введением какого элемента в схему однотактного трансформаторного усилителя мощности можно получить максимальную мощность в нагрузочном устройстве?

Лекция 4. Усилители постоянного тока (УПТ)

План лекции:

1. Особенности УПТ
2. Дрейф нуля в УПТ.
3. Операционные усилители.
4. Решающие схемы на ОУ.

Особенности УПТ

Часто при проведении измерений в электронных устройствах необходимо усиливать сигналы очень низких частот – порядка долей Гц. Для этого требуются усилители, имеющие равномерную амплитудно-частотную характеристику до самых низких частот. Такие усилители называют усилителями постоянного тока (УПТ). Приведем для сравнения АЧХ УПТ и усилителя с RC-связью (рисунок 3.26).

В области низких и средних частот АЧХ УПТ является равномерной. В области высоких частот в УПТ, так же как и в усилителях с RC-связью, появляются фазовые сдвиги и частотные искажения, что приводит к уменьшению K_u .

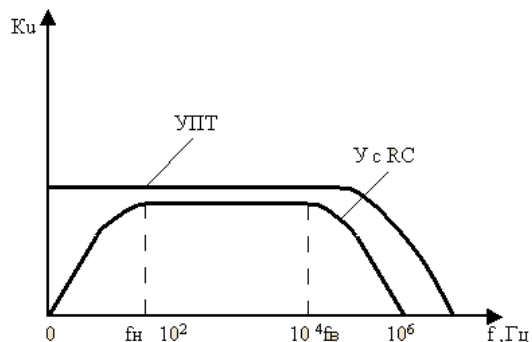


Рисунок 3.26 – АЧХ УПТ

В УПТ возникают трудности, связанные с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих U и I , которые необходимы для работы транзисторов усилительных каскадов.

Как и в усилителях с RC-связью, характеристики УПТ должны отвечать ряду требований:

1. В отсутствие входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал.
2. При изменении знака входного сигнала должен изменять знак и выходной сигнал.
3. Напряжение на нагрузочном устройстве должно быть пропорционально входному напряжению.

УПТ с одним источником питания и двумя источниками питания.

Схема УПТ с одним источником питания представлена на рисунке 3.27).

Простейший УПТ с одним источником питания состоит из обычного усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенным по схеме с ОЭ (выделен штриховыми линиями), у которого отсутствует конденсатор C в цепях эмиттера, что приводит к снижению коэффициента усиления из-за возникновения отрицательной обратной связи, но обеспечивает большую полосу пропускания.

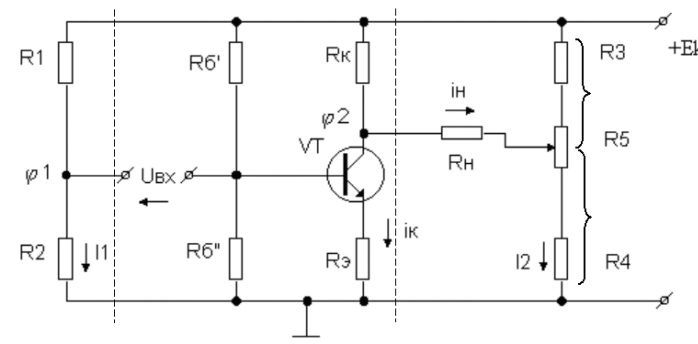


Рисунок 3.27 – Схема УПТ с одним источником питания

Если рассмотреть временную диаграмму работы схемы, то видно, что потенциалы средних точек делителей таковы, что при $U_{вх}=0$, $\varphi_6=\varphi_1$, $\varphi_k=\varphi_2$, вследствие чего отсутствует ток во входной цепи и в нагрузочном резисторе $i_H=0$. Для точной подстройки режима в выходной цепи ставится переменный резистор $R5$. При подаче входного сигнала появляется ток во входной цепи, изменяются базовый и коллекторные токи, что приводит к изменению напряжения на коллекторе и появлению тока в нагрузке i_H .

Потенциальная диаграмма (рисунок 3.28) показывает, что при отсутствии входного напряжения $U_{вх}=0$ ($0 \leq t \leq t_1$), $U_{вых}=0$, в интервале времени $t_1 < t < t_2$ при $U_{вх} < 0$, $U_{ввых} > 0$, а в интервале $t > t_2$, $U_{вх} > 0$, $U_{ввых} < 0$. Таким образом, компенсируется постоянная составляющая коллекторного тока.

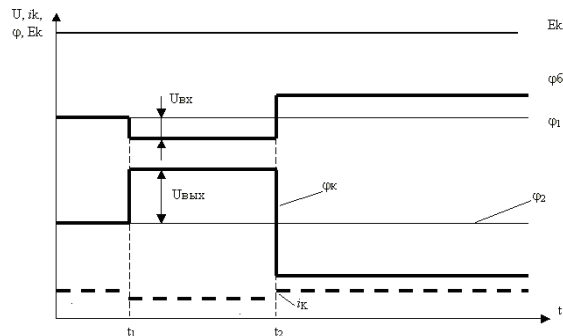


Рисунок 3.28 – Потенциальная диаграмма работы УПТ с одним источником питания

В схеме УПТ с двумя источниками питания (рисунок 3.29) источники $+E_1$ и $-E_2$ создают положительное и отрицательное напряжения относительно общей точки, имеющей нулевой потенциал («земля»). Входной сигнал подается непосредственно на базу транзистора.

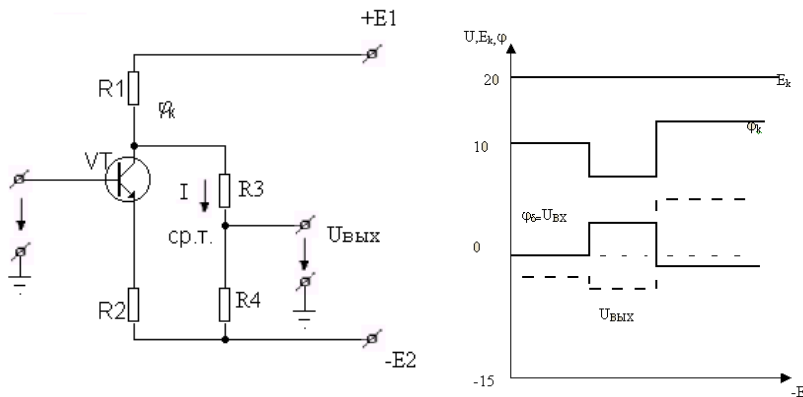


Рисунок 3.29 - УПТ с двумя источниками питания и его потенциальная диаграмма

При напряжении $U_{вх}=0$, потенциал базы $\phi_б=0$. К делителю R_3/R_4 в отсутствие входного сигнала приложено напряжение $\phi_{R_3} + \phi_{R_4} = \phi_к - (-E_2) = \phi_к + E_2$. При этом потенциал средней точки делителя должен быть равен нулю (т. е. напряжение на выходе равно 0), а падения напряжения на плечах делителя соответственно равны $U_{R_3} = \phi_к$, $U_{R_4} = E_2$.

При подаче входного напряжения (положительной полярности) возрастает ток базы транзистора $I_б$, что приводит к увеличению коллекторного тока $I_к$. При этом увеличивается падение напряжения на R_1 и снижается потенциал верхнего вывода делителя R_3/R_4 , снижается потенциал средней точки делителя и на выходе появляется напряжение отрицательной полярности. Таким образом, делитель R_3/R_4 компенсирует постоянную составляющую напряжения и передает с некоторым уменьшением усиленное напряжение с коллектора транзистора на выход усилителя.

Дрейф нуля в УПТ

УПТ имеют недостаток, затрудняющий усиление очень малых постоянных напряжений и токов. В УПТ существует так называемый дрейф нуля, который определяет нижний предел усиливаемых напряжений. Дрейф нуля заключается в следующем. С течением времени изменяются токи транзисторов и напряжения на их электродах. При этом нарушается компенсация постоянной составляющей напряжения и на выходе усилителя появляется напряжение в отсутствие входного сигнала [8, 9]. Поскольку УПТ должен усиливать напряжения вплоть до самых низких частот, всякое изменение постоянных составляющих напряжения $U_{к0}, U_{б0}$ (из-за нестабильности источников питания; старения транзисторов; изменения температуры окружающей среды и т. д.) принципиально не отличается от полезного сигнала.

Для борьбы с дрейфом нуля принимают ряд мер:

- стабилизацию напряжения источников питания;
- стабилизацию температурного режима и тренировку

транзисторов;

- использование дифференциальных (или балансных) схем УПТ;
- преобразование усиливаемого напряжения.

Дифференциальные или балансные схемы построены по принципу четырехплечевого моста (рисунок 3.30).

Если мост сбалансирован (т. е. $R_1/R_2 = R_4/R_3$), то при изменении напряжения источника питания $+E_к$ баланс не нарушается и в нагрузочном резисторе $R_н$ ток равен нулю. С другой стороны, при пропорциональном изменении сопротивлений резисторов R_1, R_2 или R_3, R_4 баланс моста тоже не нарушается. Если заменить резисторы R_2, R_3 транзисторами, то получается дифференциальная схема, часто применяемая в УПТ (рисунок 3.31).

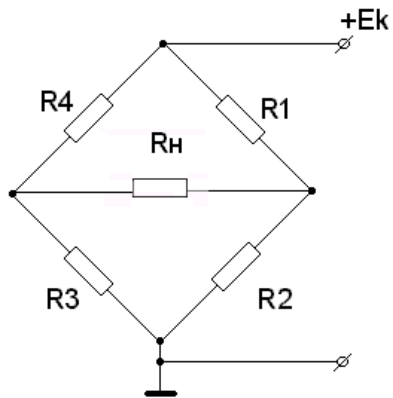


Рисунок 3.30 - Схема четырехплечевого моста

В дифференциальном усилителе сопротивления резисторов R_2 , R_3 в коллекторных цепях транзисторов выбирают равными и режимы обоих транзисторов устанавливают одинаковыми. Пары транзисторов подбирают с идентичными характеристиками.

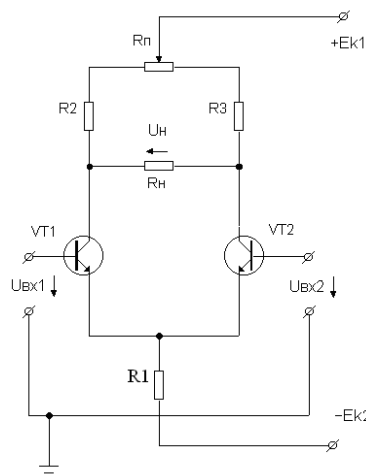


Рисунок 3.31 – Дифференциальная схема в УПТ

Назначение элементов схемы:

1. Резистор R_1 стабилизирует ток транзисторов.
2. Переменный резистор R_n служит для установки нуля.

Выражение для коэффициента усиления дифференциального каскада аналогично выражению для K_u обычного однокаскадного усилителя с коллекторной нагрузкой:

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

При подаче входного сигнала на базу транзистора VT_1 , увеличивается ток базы транзистора VT_1 и уменьшится ток базы транзистора VT_2 . При этом токи $I_{\beta 1}$, $I_{\beta 1}$ увеличиваются, а токи $I_{\beta 2}$, $I_{\beta 2}$ уменьшаются. Изменение токов происходит на одну и ту же величину. Напряжение $U_{k1} = E_{k1} - I_{k1}R_{k1}$ уменьшается, что вызывает приращение напряжения $-\Delta U_{k1}$, противоположное по знаку (т.е. проинвертированное) $U_{\text{вх}}$. Напряжение $U_{k2} = E_{k1} - I_{k2}R_{k2}$ возрастает, что создает приращение напряжения того же знака $+\Delta U_{k2}$ (т.е. непроинвертированное), что и напряжение входного сигнала. Таким образом, в данном случае выход каскада со стороны коллектора транзистора VT_1 является инвертирующим, а со стороны коллектора транзистора VT_2 – неинвертирующим. Если подается сигнал на вход VT_2 , то коллектор транзистора VT_2 будет инвертирующим выходом, а коллектор VT_1 – неинвертирующим.

Операционные усилители (ОУ)

ОУ относится к усилителям постоянного тока (УПТ) с большим коэффициентом усиления и имеющим дифференциальный вход (два входных вывода), а также один общий выход. В электронных схемах ОУ обозначается следующим образом (рисунок 3.32):

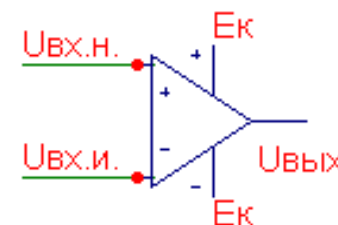


Рисунок 3.32 – Условное изображение ОУ

Идеальный ОУ имеет коэффициент усиления K_u , стремящийся к бесконечности (у реальных ОУ он обычно превышает 10^5), обладает большим входным (10^6 Ом) и малым выходным сопротивлениями (доли Ом).

Один вход ОУ ($U_{вх и, «+»$) называется неинвертирующим, а второй ($U_{вх и, «-»$) – инвертирующим.

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад [4], который используется в качестве входного каскада усилителя. Выходным каскадом ОУ обычно является эмиттерный повторитель (ЭП), который обеспечивает нагрузочную способность всей схемы. Так как K_u (ЭП) = 1, то необходимое значение K_u ОУ обеспечивается подключением дополнительных каскадов между дифференциальным каскадом и ЭП. В зависимости от количества используемых каскадов ОУ подразделяются на двух- и трехкаскадные. В трехкаскадных ОУ входной дифференциальный каскад обычно выполняют с резистивными нагрузками, а в двухкаскадных – с динамическими нагрузками.

Характеристики ОУ.

Важнейшими характеристиками ОУ являются его амплитудные (или передаточные) характеристики. Их представляют в виде двух кривых по инвертирующему и неинвертирующему входам соответственно. Эти характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов (при нулевом сигнале – на другом) (рисунок 3.33).

Здесь горизонтальные участки кривых соответствуют режиму транзистора ЭП (транзистор полностью открыт).

При изменении напряжения входного сигнала на этих участках $U_{вых}$ остается без изменения и определяется как $U_{вых.мах}^+$ и $U_{вых.мах}^-$, которые близки к напряжению источников питания E_k .

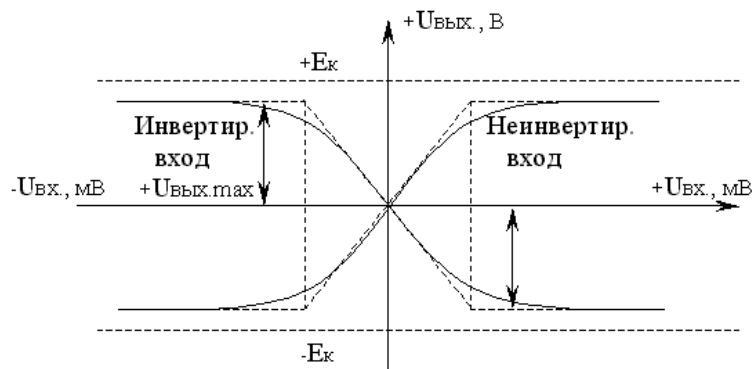


Рисунок 3.33 – Амплитудные (или передаточные) характеристики ОУ

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость напряжения $U_{вых}$ от напряжения $U_{вх}$. Угол наклона определяется коэффициентом усиления $K_{уоу} = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$. Величина $K_{уоу}$ зависит от типа ОУ и может принимать значение от нескольких сотен до сотен тысяч.

Когда кривые проходят через 0, это соответствует напряжениям $U_{вых} = 0$ и $U_{вх} = 0$. Такое состояние называется балансом ОУ. Однако для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается разбаланс). При напряжении $U_{вх} = 0$, $U_{вых}$ может быть чуть больше или чуть меньше нуля. Напряжение, при котором $U_{вых} = 0$, называется входным напряжением смещения нуля $U_{см0}$. Оно определяет значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса. Основной причиной разбаланса является разброс параметров дифференциального усилительного каскада (обычно транзисторов).

Параметры ОУ.

1. К входным параметрам относятся:
 - а) входное сопротивление $R_{вх}$;
 - б) входные токи смещения;
 - в) разность и дрейф токов смещения.
2. К выходным параметрам относятся:
 - а) выходное сопротивление $R_{вых}$;
 - б) максимальное выходное напряжение $U_{мах\ вых}$;
 - в) выходной ток $I_{вых}$.
3. К энергетическим параметрам относятся:
 - а) максимальные потребляемые токи от обоих источников питания;
 - б) суммарная потребляемая мощность.
4. Частотные параметры определяют по АЧХ ОУ:
 - а) частота среза $f_{ср}$, начиная с которой АЧХ имеет спадающий характер;
 - б) частота единичного усилителя f_1 , при которой $K_{уоу}=1$;
 - в) граничная частота $f_{ср}$, которой соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в $\sqrt{2}$ раз.
5. К скоростным или динамическим параметрам относятся:
 - а) скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика);
 - б) время установления выходного напряжения.

Решающие схемы на ОУ

1. Инвертирующий усилитель (рисунок 3.34).

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного и создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора R_{oc} отрицательной обратной связи по напряжению.

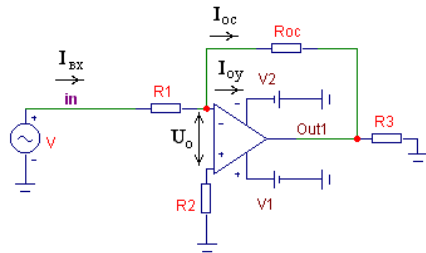


Рисунок 3.34 - Инвертирующий усилитель

Неинвертирующий вход заземляется. На инвертирующий вход через резистор $R1$ подается входной сигнал. Если принять значение $R_{вхОУ} = \infty$ и входной ток ОУ $I_{OY} = 0$, то ток $I_{вх} = I_{oc}$ и тогда $U_{вх} - U_0/R1 = U_{ввых} - U_0/R_{oc}$.

При $K_{UOY} \rightarrow \infty$ напряжение на входе ОУ $U_0 = U_{ввых}/K_{UOY} \rightarrow 0$ и тогда $U_{вх}/R1 = -U_{ввых}/R_{oc}$.

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью $K_{Uи} = U_{ввых}/U_{вх} = -R_{oc}/R1$, т. е. определяется параметрами только пассивной части схемы.

2. Неинвертирующий усилитель (рисунок 3.35).

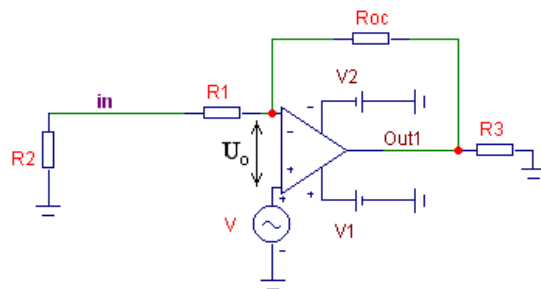


Рисунок 3.35 - Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Полагая, что напряжение $U_0 = 0$ и ток $I_{OY} = 0$ получим $U_{ввых} = U_{вх} \cdot (R1 + R_{oc})/R1$. Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя $K_{Uи} = 1 + R_{oc}/R1$, $R_{вх}$ неинвертирующего усилителя велико, а $R_{ввых} \rightarrow 0$.

Неинвертирующий и инвертирующий усилители широко используются в качестве высокостабильных усилителей различного назначения [5].

3. Сумматор (рисунок 3.36).

Сумматоры делятся на инвертирующие и неинвертирующие. Они предназначены для сложения нескольких входных сигналов. Неинвертирующий сумматор (рисунок 3.36, а) реализуется на основе схемы неинвертирующего усилителя путем добавления к входу параллельных ветвей, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

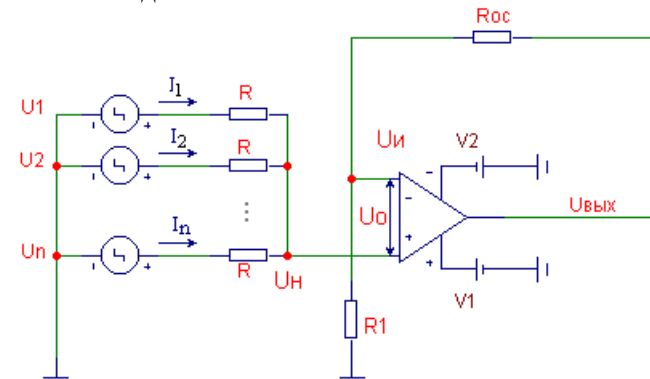


Рисунок 3.36, а - Неинвертирующий сумматор

При напряжении $U_0 = 0$, $U_{и} = U_{и} = [R1/(R1 + R_{oc})] U_{ввых}$. Тогда $U_1 - U_{и}/R + U_2 - U_{и}/R + \dots + U_n - U_{и}/R = 0$.

Исходя из этого, для неинвертирующего усилителя выходное напряжение будет равно:

$$U_{ввых} = [(R1 + R_{oc})/n \cdot R1](U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Инвертирующий сумматор (рисунок 3.36, б) выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на

входе, которое равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

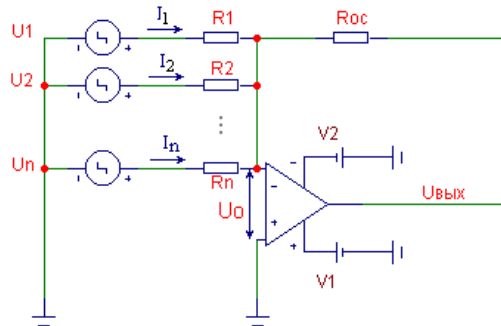


Рисунок 3.36, б – Инвертирующий сумматор

Для инвертирующего сумматора сопротивления резисторов будут равны:

$$R_{oc} = R1 = R2 = \dots = Rn.$$

При входном токе $I_{вх ОУ} = 0$ получаем:

$$I_{oc} = I1 + I2 + \dots + In.$$

Тогда выходное напряжение будет равно:

$$U_{вых} = -(R_{oc}/R1) U1 + (R_{oc}/R2) U2 + \dots + (R_{oc}/Rn) Un.$$

4. Интегратор (рисунок 3.37).

Интегратор создают заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора R_{oc} конденсатором $C1$.

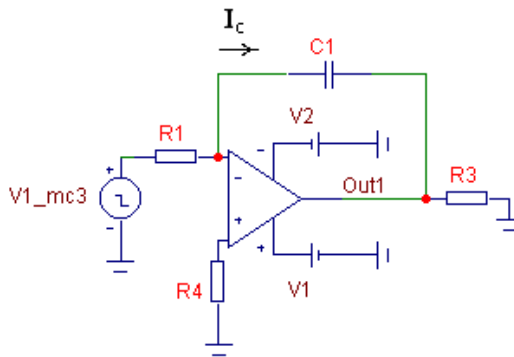


Рисунок 3.37 – Интегратор

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала. Так как ток $I_{вх} = I_c$ или $U_{вх}/R1 = -C1(dU_{вых}/dt)$, то выходное напряжение равно:

$$U_{вых} = -1/R1C1 \int U_{вх} dt + U_{вых0},$$

где $U_{вых0}$ – выходное напряжение при $t = 0$.

Если $t = 0$ и $U_{вых0} = 0$, то тогда

$$U_{вых} = -1/\tau \int U_{вх} dt,$$

где $\tau = R1C1$ – постоянная времени.

5. Дифференциатор (рисунок 3.38).

Если в схеме интегратора поменять местами сопротивление $R1$ и конденсатор $C1$, то получим схему дифференциатора.

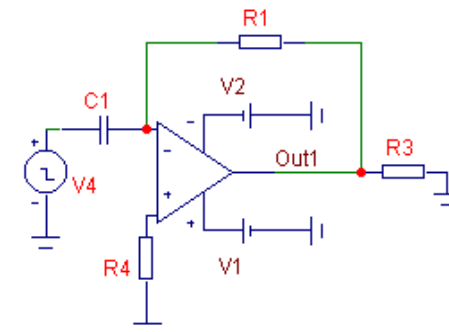


Рисунок 3.38 – Дифференциатор

Входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ и формула выполняемой операции определяется выражением:

$$U_{вых} = -R1C1 (dU_{вх}/dt) = -\tau (dU_{вх}/dt).$$

Вопросы для самоконтроля:

1. Перечислите основные свойства УПТ.
2. Перечислите основные свойства ОУ.
3. Назовите примеры применения ОУ на ИМС в вычислительных устройствах.

4. Какие меры применяют в УПТ для устранения дрейфа нуля? Назовите принцип работы балансной (дифференциальной) схемы УПТ.

5. Как построить неинвертирующий и инвертирующий сумматоры на ОУ? Приведите основные соотношения для таких схем.

6. Как построить дифференциатор и интегратор на ОУ?

Лекция 5. Избирательные усилители. Генераторы гармонических колебаний

План лекции:

1. Виды и особенности избирательных усилителей (ИУ).
2. Высокочастотные ИУ.
3. Низкочастотные ИУ.
4. Генераторы гармонических колебаний.
5. LC-автогенератор.
6. RC-автогенератор.

Виды и особенности избирательных усилителей (ИУ)

Избирательные усилители (ИУ) предназначены для усиления сигналов в некоторой узкой полосе частот [6]. Амплитудно-частотные характеристики (рисунок 3.39) должны обеспечивать требуемое усиление в заданной полосе частот и достаточно крутой спад усиления вне этой полосы.

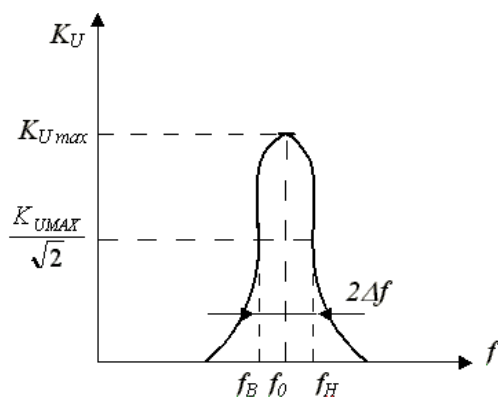


Рисунок 3.39 - АЧХ ИУ

Полоса пропускания ИУ ($2\Delta f = f_g - f_n$) определяется на уровне $K_{Um} / \sqrt{2}$, где K_{Um} - коэффициент усиления при резонансной частоте f_0 . Селективность усилительных свойств оценивают добротностью $Q = f_0 / (2\Delta f)$.

Избирательные усилители широко распространены в радиоприёмных и телевизионных устройствах, а также многоканальных системах связи. Они предназначены для настройки приёмного устройства на фиксируемую частоту принимаемой станции, не пропуская сигнала других устройств. Резкая зависимость K_U ИУ от f достигается, как правило, включением специальных фильтров в цепь усиления или в цепь обратной связи. В связи с этим ИУ подразделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Высокочастотные избирательные усилители создают введением LC- фильтра в цепь нагрузки усилительного каскада (рисунок 3.40).

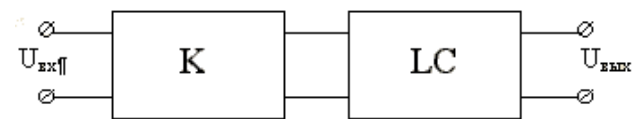


Рисунок 3.40 - Структурная схема высокочастотного ИУ

Низкочастотные узкополосные усилители создают включением в цепь обратной связи RC- фильтров (рисунок 3.41).

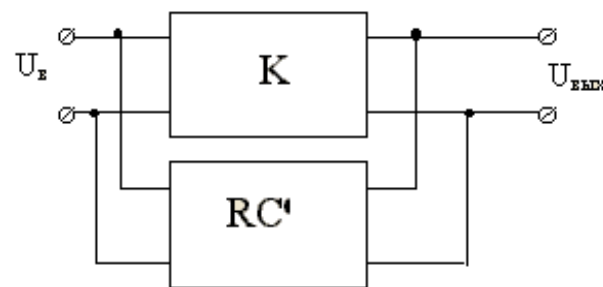


Рисунок 3.41 – Структурная схема низкочастотного ИУ

Высокочастотные ИУ

Схема резонансного усилителя представлена на рисунке 3.42. Она похожа на схему однокаскадного усилителя с ОЭ, но в цепь коллектора вместо R_k включён колебательный контур.

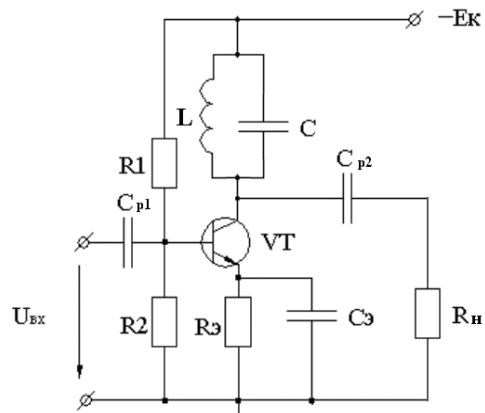


Рисунок 3.42 - Принципиальная электрическая схема высокочастотного ИУ

Назначение элементов:

- 1) элементы однокаскадного усилителя с общим эмиттером - R_1, R_2, VT, R_3, C_3 ;
- 2) колебательный LC -контур в коллекторной цепи транзистора - выполняет роль LC -фильтра;
- 3) C_{p1}, C_{p2} - разделительные конденсаторы, через которые осуществляется связь с предыдущим или последующим каскадом.

На резонансной частоте $f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ сопротивление колеба-

тельного контура велико, поэтому коэффициент усиления максимален. При отклонении частоты влево или вправо от резонансной частоты сопротивление контура уменьшается (ввиду увеличения шунтирующего действия его индуктивности или ёмкости). Это вызывает уменьшение коэффициента усиления каскада.

Низкочастотные ИУ

В качестве RC -фильтров в избирательных усилителях могут использоваться различные RC -цепи, у которых коэффициент передачи $\beta \approx 0$ в диапазоне полосы пропускания от f_n до f_v .

Широкое применение в этих усилителях нашёл двойной Т-образный мост (рисунок 3.43).

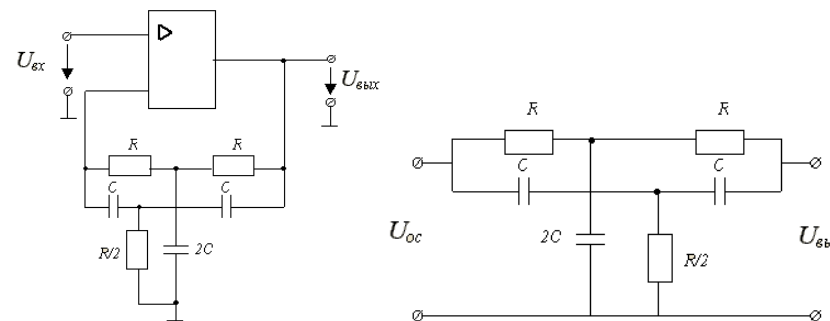


Рисунок 3.43 - Принципиальная электрическая схема низкочастотного ИУ с двойным Т-образным мостом

Значение коэффициента передачи $\beta = U_{oc} / U_{вых}$ резко зависит от частоты. При $f \rightarrow 0$; $\beta \rightarrow 1$, т. к. на очень низких частотах сопротивления конденсаторов становятся малыми и всё напряжение передаётся на вход усилителя через «нижний» одинарный Т-образный мост ($C, R/2, C$).

На квазирезонансной частоте $f_0 = 1/(RC)$; $\beta = 0$, т. к. на этой частоте каждый из одинарных Т-образных мостов имеет равные по модулю и противоположные по фазе коэффициенты передачи β и их выходные токи взаимно компенсируются так, что $U_{oc} = 0$.

Коэффициент усиления избирательного контура с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи определяется через параметры усилителя и цепи обратной связи:

$$K_{oc} = \left| \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \right| = \left| \frac{K}{1 + \beta K} \right|.$$

Таким образом, при частотах $f = 0$ и $f = \infty$, когда $\beta \rightarrow 1: K_{oc} = \left| \frac{K}{1+K} \right| \approx 1$, а на квазирезонансной частоте – $\beta = 0$, $K_{oc} = K \gg 1$.

Генераторы гармонических колебаний

Генератором гармонических колебаний называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний синусоидальной формы требуемой частоты и мощности [6].

В зависимости от генерируемой частоты генераторы подразделяют на:

- а) низкочастотные (0,01...100 кГц);
- б) высокочастотные (0,1...100 МГц);
- в) сверхвысокочастотные (свыше 100 МГц).

По способу возбуждения колебаний различают:

- а) генераторы с независимым возбуждением;
- б) автогенераторы или генераторы с самовозбуждением.

Структурная схема автогенератора представлена на рисунке 3.44.

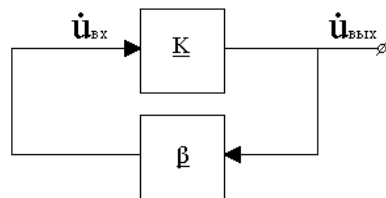


Рисунок 3.44 – Структурная схема автогенератора

Коэффициент усиления K усилителя и коэффициент передачи звена обратной связи β приняты комплексными, т. е. учитывается их зависимость от частоты. В качестве усилителя в автогенераторах могут применяться различные усилители: на транзисторах, на интегральных микросхемах и т. д.

Звеном обратной связи являются частотно-зависимые цепи (LC -контуры и RC -четырёхполюсники). Входным сигналом для усиления является часть его выходного напряжения, передаваемая звеном положительной обратной связи.

Стационарный устойчивый режим в автогенераторе, при котором амплитуды входных и выходных напряжений имеют неизменные значения, будет возможен при выполнении условия, называемого условием самовозбуждения: $K \beta = 1$, которое следует из соотношений:

$$U_{\text{вых}} = K U_{\text{вх}},$$

$$U_{\text{вх}} = \beta U_{\text{вых}}.$$

Тогда $U_{\text{вых}} = \beta K U_{\text{вых}}$.

Условие самовозбуждения можно представить в виде:

$$|K| e^{i\varphi} |\beta| e^{i\psi} = 1,$$

где $|K|$, $|\beta|$ – модули коэффициентов усиления и передачи соответственно;

φ , ψ – аргументы этих коэффициентов.

Это равенство выполняется при следующих условиях:

1. $|K| |\beta| = 1$ - условие баланса амплитуд.

2. $\varphi + \psi = 2\pi n$ - условие баланса фаз,

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$;

φ – фазовый сдвиг выходного напряжения усилителя;

ψ – фазовый сдвиг выходного напряжения звена обратной связи.

Условие баланса амплитуд соответствует тому, что потери энергии в автогенераторе восполняются звеном положительной обратной связи от источника питания автогенератора. Для получения стационарных устойчивых колебаний условие баланса амплитуд должно удовлетворять соотношению: $|K| |\beta| \geq 1$. Физический смысл неравенства $|K| |\beta| \geq 1$ заключается в том, что сигнал, усиленный усилителем в $|K|$ раз и ослабленный звеном в $|\beta|$ раз, возникает вновь на входе усилителя в той же фазе, но с большей амплитудой.

Условие баланса фаз означает, что сумма фазовых сдвигов выходных напряжений усилителя и звена обратной связи в автогенераторе равна нулю или целому числу 2π , что свидетельствует о наличии в данном устройстве положительной обратной связи.

LC-автогенератор

В данном автогенераторе усилитель собран на полевом транзисторе и включен по схеме с общим истоком (рисунок 3.45). Звеном обратной связи является катушка L_c , включенная в стоковую цепь транзистора и индуктивно связанная с катушкой L_k резонансного контура $L_k C_k$. Первоначально колебания в автогенераторе возникают из-за флуктуации тока в колебательном контуре или при подаче напряжения питания.

По этим причинам при условии, что эквивалентное активное сопротивление контура $R_3 < \sqrt{L_k / C_k}$ появляются слабые колебания с частотой $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_k}$, которые при отсутствии положительной обратной связи прекратились бы из-за потерь энергии в контуре.

Но при наличии положительной обратной связи этого не происходит, т. к. появившееся напряжение на контуре усиливается транзистором. Эти колебания через катушку L_c , индуктивно связанную с катушкой L_k , вновь возвращаются в колебательный контур. Размах колебаний постепенно возрастает, что соответствует условию $|K| |\beta| > 1$.

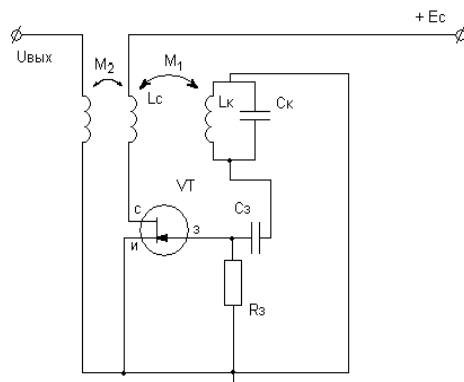


Рисунок 3.45 – LC-автогенератор

По мере роста амплитуды напряжение в цепи затвора транзистора из-за нелинейности его амплитудной характеристики (участок *ab*) начинает уменьшаться и соблюдается условие $|K| |\beta| = 1$ (рисунок 3.46).

При этом появляются колебания с постоянной и автоматически поддерживаемой на требуемом уровне амплитудой, что соответствует стационарному режиму работы автогенератора.

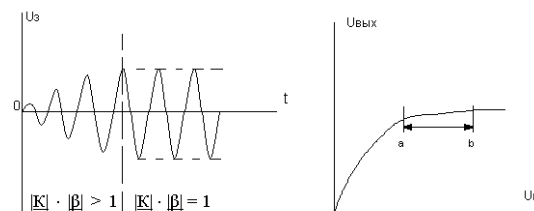


Рисунок 3.46 – Временная диаграмма и АХ автогенератора

С помощью звена $R_3 C_3$ осуществляется создание отрицательного смещения U_{30} относительно истока.

Схема, в которой LC-контур включен последовательно с транзистором, имеет существенное преимущество, заключающееся в том, что элементы LC-контура находятся под низким напряжением. Но такой генератор обладает низким КПД.

Высоким КПД и большей мощностью генерируемых колебаний обладает автогенератор, где LC-контур включен параллельно с транзистором по отношению к источнику питания (рисунок 3.47). Такой генератор называется *генератором с параллельным питанием* [8].

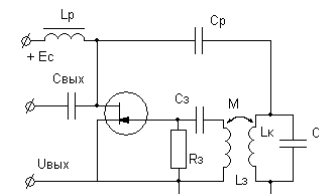


Рисунок 3.47 - Генератор с параллельным питанием

В LC-генераторах, ввиду зависимости L и C колебательного контура и параметров транзистора от температуры, наблюдается зависимость от температуры t° и частоты f . В условиях постоянства t° нестабильность частоты вызвана изменениями дифференциальных параметров транзистора в зависимости от изменения положения рабочей точки покоя усилительного каскада, что обуславливает необходимость его стабилизации.

Нестабильность частоты генераторов оценивают коэффициентом относительной нестабильности, который определяется по формуле:

$$\delta f = \Delta f / f \cdot 100\%,$$

где Δf – абсолютное отклонение частоты от номинального значения f .

Мерами, повышающими стабильность частоты генератора, являются:

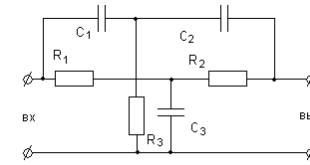
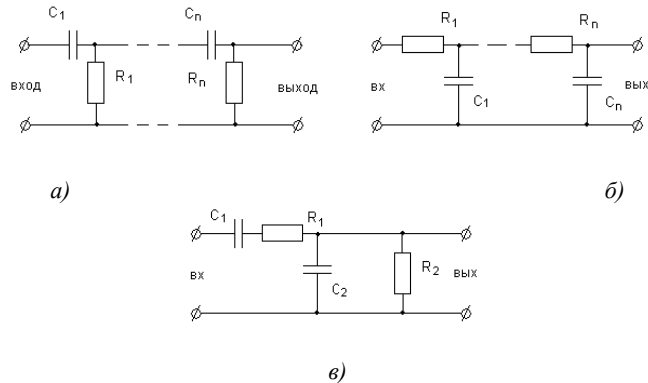
1) увеличение температурной стабилизации выбранного режима покоя усилительных каскадов;

2) применение специальных средств, компенсирующих температурные изменения частоты (например, введение в колебательный контур конденсаторов с зависимой от температуры емкостью).

RC-автогенераторы

Для получения гармонических колебаний низкой частоты (от нескольких сотен кГц до долей Гц) применяют автогенераторы, у которых в качестве звеньев обратной связи используются RC-четырёхполюсники. Такие автогенераторы называются **RC-автогенераторами**. Применение RC-четырёхполюсников вызвано тем, что LC-контур на таких частотах становится громоздкими, а добротность их не удовлетворяет необходимым требованиям. RC-автогенераторы на низких частотах обладают более высокой стабильностью, имеют меньшие габариты, массу и стоимость, чем LC-автогенераторы.

RC-автогенератор содержит усилитель и звено обратной связи в виде частотно-зависимой RC-цепи. Такие цепи представлены на рисунке 3.48:



з)

Рисунок 3.48 – Виды звеньев обратной связи: а) Г-образные RC-цепи; б) мост Вина; в) двойной Т-образный мост (несимметричный); г) двойной Т-образный мост (симметричный)

Например, RC-автогенератор с Т-образным RC-звеном обратной связи представляет собой однокаскадный усилитель, охваченный положительной обратной связью (рисунок 3.49).

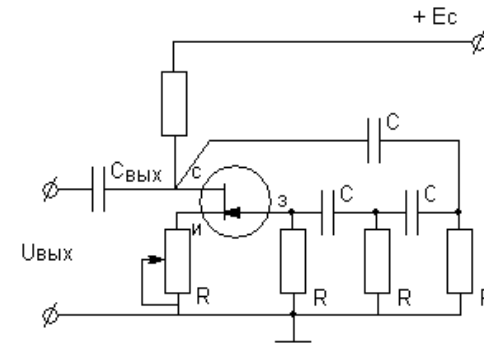


Рисунок 3.49 – RC-автогенератор с Т-образным звеном обратной связи

Следует отметить, что в однокаскадном усилителе с ОЭ без обратной связи $U_{вх}$ и $U_{вых}$ сдвинуты по фазе на 180° , т. е. если $U_{вых}$ усилителя подать на его вход, то получится 100% ООС. Для соблюдения баланса фаз напряжение $U_{вых}$ (прежде чем подать его на вход) необходимо сдвинуть на 180° . Так как сопротивление $R_{вх}$ усилителя велико, а $R_{вых}$ – мало, то фазовый сдвиг на 180° можно осуществить с помощью трех одинаковых RC-звеньев, каждое из которых изменяет фазу на 60° .

Повысить частоту генерации в автогенераторе можно увеличением количества звеньев или при смене мест резисторов и конденсаторов в RC -цепи.

Недостатки RC - автогенератора:

1) цепь обратной связи сильно шунтирует конденсатор усиления, вследствие чего снижается K_u и нарушается условие баланса амплитуд;

2) генерируемые колебания имеют значительное искажение формы, вызванное тем, что условия самовозбуждения выполняются для гармоник с частотой, близкой к f_0 .

Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите виды избирательных усилителей и их особенности.
2. Сравните низкочастотный и высокочастотный избирательные усилители.
3. На какой частоте и при каком коэффициенте передачи звена обратной связи избирательный усилитель с RC -фильтром имеет $K_u \gg 1$?
4. Приведите классификацию генераторов гармонических колебаний.
5. Назовите условия самовозбуждения автогенератора.
6. Какими причинами может быть вызвана нестабильность частоты автогенератора? Как можно повысить стабильность частоты автогенератора?

Материалы к лабораторным работам

Тема «Исследование усилителя мощности НЧ на микросхемах».

Базовые проблемы:

1. Изучить назначение, принцип работы и особенности построения схем усилителей мощности.
2. Изучить и исследовать характеристики и параметры усилителей мощности.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Объяснить (письменно) назначение элементов одно-тактного трансформаторного усилителя мощности.

Вариант 2. Объяснить (письменно) назначение элементов двух-тактного трансформаторного усилителя мощности.

Вариант 3. Объяснить (письменно) назначение элементов двух-тактного бестрансформаторного усилителя мощности с одним источником питания.

Вариант 4. Объяснить (письменно) назначение элементов двух-тактного бестрансформаторного усилителя мощности с двумя источниками питания.

Экспериментальная часть включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе на учебных стендах в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Исследование двухкаскадного УНЧ с цепями ОС».

Базовые проблемы:

1. Изучить устройство и назначение элементов усилителя с RC -связью.
2. Изучить принципы построения обратных связей в усилителях.
3. Исследовать основные характеристики двухкаскадного УНЧ.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

1. Рассчитать K_u для усилителя без обратной связи и $K_{ос}$ для усилителя с отрицательной обратной связью, последовательной по напряжению:

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|----|----|----|-----|
| $U_{вх}, мВ$ | 25 | 50 | 80 | 100 |
| $U_{вых}, В$ | 2 | 3 | 4 | 5 |

2. Во сколько раз изменится $R_{вх}$ и $R_{вых}$ усилителя при введении отрицательной обратной связи по сравнению с $R_{вх}$ и $R_{вых}$ усилителя без обратной связи.

Экспериментальная часть включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе на учебных стендах в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Исследование операционного усилителя».

Базовые проблемы:

1. Исследовать принцип построения и работу операционного усилителя на ПЭВМ.

2. Изучить типовые схемы с ОУ и режимы их работы.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Экспериментальная часть включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе на учебных стендах и ПЭВМ в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Задания для управляемой самостоятельной работы студентов

Задание 1.

1. Построить экспериментально снятые зависимости.

2. Рассчитать параметры исследованных приборов.

3. Оформить отчет и уметь ответить на контрольные вопросы к лабораторной работе.

Рекомендации по выполнению приведены в методических указаниях к лабораторным работам [11, 12].

Задание 2.

Рассчитать усилитель низкой частоты на транзисторах в соответствии с вариантом задания, приведенным в методических указаниях по выполнению курсовой работы:

а) рассчитать параметры электрической схемы;

б) выбрать элементы схемы;

в) смоделировать полученную схему и исследовать ее работу на ПЭВМ.

Рекомендации по выполнению приведены в методических указаниях к лабораторным работам [11, 12].

Форма контроля:

1. Представить преподавателю отчет в письменном виде по изученному разделу, ответить на контрольные вопросы к лабораторным работам.

2. Представить преподавателю расчет усилителя, смоделированную на ПЭВМ схему и полученные временные диаграммы. Работа должна быть оформлена в виде первого раздела курсовой работы.

Пример комплексного задания (билета) для контроля результатов обучения по модулю 3

1-й уровень.

1. Дайте классификацию усилителей.

2. Назовите основные параметры и характеристики усилителей.

3. Назовите основные недостатки трансформаторных усилителей мощности.

4. Перечислите основные свойства УПТ.

5. Назовите условия самовозбуждения автогенератора.

6. Назовите отличия в схемах и принципе работы бестрансформаторных усилителей мощности с одним и с двумя источниками питания.

2-й уровень.

1. Чем отличается режим усиления класса A от режимов усиления классов B и C ? Их использование в усилителях.

2. Какие меры применяют в УПТ для устранения дрейфа нуля? Объясните принцип работы балансной (дифференциальной) схемы УПТ.

3. В чем причины частотных искажений в транзисторных усилителях в области низших и высших частот? Используйте для пояснения эквивалентную схему замещения усилительного каскада.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Галкин, В.И. Промышленная электроника и микроэлектроника [Текст] / В.И. Галкин. – Минск: Беларусь, 2000. – 350 с.
2. Прянишников, В.А. Электроника [Текст]: курс лекций / В.А. Прянишников. – Санкт-Петербург: Крона-Принт, 2000. – 416 с.
3. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи [Текст]: конспект лекций / БГАТУ, кафедра автоматизированных систем управления производством; сост. Дудников И.Л., Матвеев И.П. – Минск, 2004. – 122 с.
4. Игумнов, Д.В. Основы полупроводниковой электроники [Текст]: / Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 392 с.
5. Гальперин, М.В. Электронная техника [Текст] / М.В. Гальперин. – Москва: Форум-ИНФРА-М, 2005. – 352 с.
6. Гусев, В.Г. Электроника [Текст] / В.Г. Гусев, Ю.Н. Гусев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 622 с.
7. Миловзоров, О.В. Электроника [Текст]: учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – Москва: Высшая школа, 2005. – 288 с.
8. Бобровников, Л.З. Электроника [Текст]: учебник для вузов / Л.З. Бобровников. – СПб.: Питер, 2004 – 560с.
9. Основы промышленной электроники / под ред. В.С. Герасимова. – Москва: Высшая школа, 1986. – 336 с.
10. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника [Текст] / Ю.С. Забродин. – Москва: Высшая школа, 1982. – 496 с.
11. Исследование операционного усилителя: методические указания к лабораторным работам / БГАТУ, кафедра АСУП, сост. И.П. Матвеев. – Минск, 2001. – 17 с.
12. Усилители: методические указания к лабораторным работам / БГАТУ, кафедра АСУП, сост. И.Л. Дудников. – Минск, 2000 – 72 с.

Дополнительная

13. Ибрагим, К.Ф. Основы электронной техники. Элементы, схемы, системы [Текст]: пер. с англ. / К.Ф. Ибрагим. Москва: Мир, 2001. – 398 с.
14. Бульчев, А.Л. Электронные приборы [Текст] / А.Л. Бульчев, П.М. Лямин, Е.С. Тулинов. – Минск: Высшая школа, 1999. – 415 с.
15. Арестов, К.А. Основы электроники и микропроцессорной техники [Текст] / К.А. Арестов. – Москва: Колос, 2001. – 216 с.