

Тема: ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

1. Назначение и характеристики электронных усилителей
 2. Усилительный каскад на биполярном транзисторе.
 3. Усилители мощности
 4. Обратные связи в усилителях
-
1. Назначение и характеристики электронных усилителей

Электронное устройство, предназначенное для увеличения параметров (тока, напряжения, мощности) электрического сигнала, называется усилителем. Необходимость в таких устройствах возникает при измерении и передаче сигналов, построении систем контроля, автоматизации технологических процессов и т. п.

Независимо от используемых элементов и схемотехнических решений в простейшем виде структурную схему любого усилителя можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: линейного (*ЛЭ*) и нелинейного (*НЭ*), включенных в цепь источника питания $E_{н.н}$ (рис. 16.1, а).

Линейными считают элементы, у которых сопротивление практически не зависит от тока и напряжения.

Обладают ли линейными свойствами резистор, индуктивность, емкость? — а) да; б) нет.

Сопротивление *нелинейных элементов* в значительной степени зависит от тока или напряжения. Эти приборы могут иметь три и более выводов (транзисторы, электрон-

296

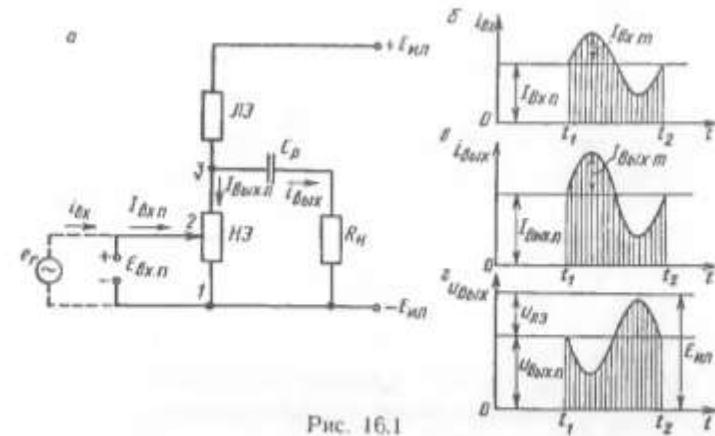


Рис. 16.1

ные лампы и др.). В усилителях в качестве *НЭ* чаще всего используются транзисторы.

Рассмотрим принцип действия усилителя (рис. 16.1, а).

Допустим, что ко входным зажимам 1–2 *НЭ* (рис. 16.1, а) подключен источник постоянной ЭДС $E_{вх.н}$, который называют источником начального смещения или покоя входной цепи. Под действием $E_{вх.н}$ во входной цепи $+E_{вх.н}$, *НЭ*, $-E_{вх.н}$ будет протекать постоянный ток $I_{вх.н}$, который называют током начального смещения или покоя (интервал времени $0 - t_1$ на рис. 16.1, б). Так как $I_{вх.н} = \text{const}$, то сопротивление *НЭ* будет постоянным.

Однако *НЭ* включен последовательно с *ЛЭ* и в цепь мощного источника питания $E_{н.н}$, поэтому через *ЛЭ* и *НЭ* будет протекать постоянный ток $I_{вх.н}$, обусловленный источником $E_{н.н}$ (рис. 16.1, в). Цепь $+E_{н.н}$, *ЛЭ*, *НЭ*, $-E_{н.н}$ называется главной (выходной) цепью усилителя.

Обычно $E_{н.н} \gg E_{вх.н}$, поэтому $I_{вх.н} \gg I_{вх.н.т}$. При этом напряжение распределяется между *ЛЭ* и *НЭ* прямо пропорционально их сопротивлениям (рис. 16.1, г). Ток $I_{вх.н}$ и напряжение $U_{вх.н}$ (рис. 16.1, в, г) называются соответственно током и напряжением начального смещения (или покоя) в выходной цепи.

Протекает ли ток начального смещения через резистор R_n ? — в) да; г) нет.

Если подключить параллельно источнику $E_{вх.н}$ (можно и последовательно) источник переменной ЭДС e_r (генератор усиливаемого сигнала), то ток во входной цепи определяется суммарным действием $E_{вх.н}$ и e_r . Во входной цепи

возникает переменная составляющая тока. На рис. 16.1, б (интервал времени $t_1 - t_2$) показан характер изменения входного тока (заштрихованная площадь), когда e_r изменяется по синусоидальному закону.

Переменное напряжение e_r модулирует сопротивление $HЭ$, а следовательно, и ток в главной цепи усилителя, но его значение будет значительно больше тока входной цепи (рис. 16.1, а).

Наличие переменной составляющей тока в главной цепи приведет к перераспределению (во времени) напряжения источника $E_{в.п}$ между ЛЭ и НЭ. Иначе говоря, в выходной цепи появляется переменная составляющая напряжения. На рис. 16.1, г показан график изменения напряжения на НЭ (заштрихованная площадь) при наличии во входной цепи ЭДС $E_{в.п}$ и e_r .

Если параллельно НЭ (зажимы 1—3) через конденсатор C_p подключить нагрузку R_n (приемник усиленного сигнала), то через R_n будет протекать только переменный ток, обусловленный переменной составляющей напряжения на НЭ.

Ток и напряжение в нагрузке R_n по величине могут значительно превышать переменные составляющие входного тока и напряжения, но имеют такую же форму, если соблюдаются условия $I_{вх.п} > I_{вх.тэ}$, $I_{вых.п} > I_{вых.тэ}$, $U_{вых.п} > U_{вых.тэ}$.

Можно ли получить режим усиления сигнала, если R_n подключить параллельно ЛЭ? — д) да; е) нет.

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы.

1. При воздействии входного сигнала на НЭ изменяется его параметр (сопротивление), в результате чего в главной цепи усилителя возникают переменные составляющие тока и напряжения. Усилительные свойства схемы проявляются тем больше, чем в больших пределах изменяется параметр НЭ.

2. Усиление сигнала осуществляется за счет энергии источника питания главной цепи $E_{в.п}$.

3. Во входной цепи необходимо создать режим начального смещения.

Рассмотрим основные параметры усилителя.

Коэффициентом усиления усилителя называют отношение выходной величины ко входной. Для усилителя принято определять три коэффициента усиления: по напряжению K_U , по току K_I , по мощности K_P . Значения K_U и K_I определяют по отношению приращений или амплитуд выходных и входных величин, т. е.

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых.п}}}{U_{\text{вх.п}}}; \quad K_I = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вых.п}}}{I_{\text{вх.п}}}$$

Значение K_P определяется как отношение переменной мощности, выделяющейся в нагрузке, к мощности входного сигнала $K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$. Коэффициент K_P можно определять как $K_P = K_U K_I$.

Из трех коэффициентов усиления всегда $K_P > 1$, так как при $K_P < 1$ сигнал не усиливается. Из этого следует, что два других коэффициента (K_U , K_I) должны принимать значения $K_U > 1$, $K_I > 1$ или $K_U > 1$, $K_I < 1$, либо $K_U < 1$, $K_I > 1$.

В зависимости от того, какой из коэффициентов (K_U или K_I) больше единицы, говорят об усилении напряжения или тока. В справочниках чаще всего дается значение K_U .

Приведенная на рис. 16.1, а схема называется однокаскадной. Для получения требуемого значения выходного напряжения иногда недостаточно одного каскада. В таких случаях прибегают к последовательному соединению каскадов (рис. 16.2).

Первый каскад называют входным, а последний — выходным. Их схемные решения могут отличаться. Связь между каскадами бывает непосредственная (гальваническая) или с помощью конденсаторов, индуктивностей или трансформаторов. Для многокаскадной схемы общий коэффициент усиления (например, K_U) равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов, т. е. $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \dots K_{Un}$.

При изменении частоты сигнала в широких пределах коэффициент усиления будет: ж) постоянным? з) изменится?

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя называется зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Параметры элементов усилителя зависят от частоты, поэтому величина выходного сигнала будет

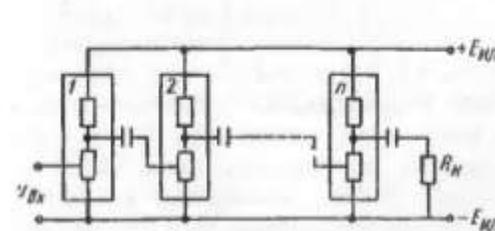


Рис. 16.2

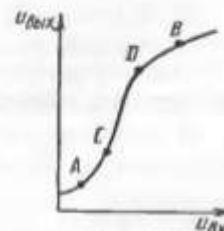


Рис. 16.3

постоянной только в определенном диапазоне частот, называемом полосой пропускания. За пределами полосы пропускания усиление может быть ничтожно малым.

Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) усилителя называется зависимость фазы выходного сигнала от частоты. Причина появления фазовых сдвигов та же, что и в предыдущем случае.

Нестабильность коэффициента усиления и фазовый сдвиг определяют так называемые линейные искажения. Они не вызывают искажений формы синусоидального входного сигнала.

Амплитудная характеристика (АХ) усилителя представляет собой зависимость $u_{\text{вых}} = f(u_{\text{вх}})$. В силу нелинейных свойств транзисторов и ламп эта характеристика (рис. 16.3) имеет явно выраженный участок насыщения. Нелинейный характер АХ является причиной искажений формы выходного сигнала, которые называются нелинейными. По АХ можно определить рабочий участок, где будет минимальное искажение формы выходного сигнала.

Какой участок АХ (рис. 16.3) соответствует минимальному искажению формы выходного сигнала? — и) СД; к) АВ.

Коэффициентом полезного действия (КПД) усилителя называется отношение мощности, выделяющейся в нагрузке $P_{\text{вых}}$, к мощности, потребляемой от источника питания P_0 , т. е. $\eta = P_{\text{вых}}/P_0$. КПД показывает, какая часть мощности источника питания преобразуется в переменный сигнал. Значение η существенно зависит от выбора начального смещения.

Входным $R_{\text{вх}}$ и выходным $R_{\text{вых}}$ сопротивлением усилителя называют соответственно сопротивление со стороны входных и выходных зажимов.

Усилители можно классифицировать по многим признакам, однако наиболее общим признаком является режим работы. По режиму работы усилители подразделяются на линейные и нелинейные.

В линейных усилителях сохраняется пропорциональность между мгновенными значениями выходного и входного напряжения (тока), в результате чего искажения формы сигнала у него минимальные.

В зависимости от вида АЧХ линейные усилители подразделяются на *усилители постоянного тока (УПТ)*, *усилители звуковых частот (УЗЧ)*, *усилители высоких частот (УВЧ)*, *широкополосные усилители (ШПУ)*, *узкополосные усилители (УПУ)*.

В усилителях с нелинейным режимом работы отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями выходного и входного сигналов. Такие усилители применяются для преобразования формы сигналов, ограничения амплитуд и т. п.

Ответы: а, г, д, з, и.

? 1. Что называется усилителем? Где он применяется? 2. Какие основные элементы содержит усилитель? 3. За счет какого источника энергии усиливается сигнал? 4. Что такое коэффициент усиления? 5. Какие основные характеристики усилителя? 6. Как классифицируются усилители?

2. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Для построения входных и промежуточных каскадов многокаскадных усилителей чаще всего используется схема ОЭ, приведенная на рис. 16.4, а. Для этой схемы коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности больше единицы.

Источник питания E_K , резистор R_K и транзистор VT образуют главную цепь усилителя. Приемник усиленного сигнала R_H через разделительный конденсатор C_{p2} подключен к коллектору и эмиттеру VT — *выходная цепь* усилителя.

Генератор усиливаемого сигнала e_r подключен к базе и эмиттеру транзистора через разделительный конденсатор C_{p1} . Резистор R_r представляет внутреннее сопротивление

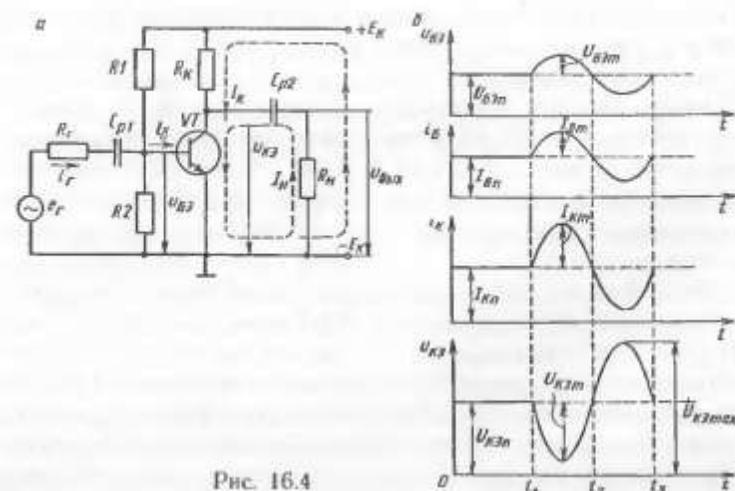


Рис. 16.4

генератора e_1 . Цепь e_1, C_{p1} , база — эмиттер транзистора — это входная цепь усилителя. Эмиттер является общей точкой для входной и выходной цепей, отсюда и название схемы «общий эмиттер» (ОЭ).

Делитель напряжения на резисторах R_1, R_2 создает режим начального смещения на базе транзистора, т. е. падение напряжения на резисторе R_2 выполняет ту же роль, что источник $E_{бэ, 0}$ в схеме рис. 16.1, а.

Рассмотрим работу схемы с помощью временных диаграмм (рис. 16.4, б).

В интервале времени $0-t_1$ при $e_1 = 0$ в базовой цепи протекает постоянный ток $I_{б0}$, определяемый напряжением $U_{бэ0}$. Ток в коллекторной цепи транзистора также постоянный и связан с током базы через коэффициент передачи транзистора по току β следующим образом:

$$I_{к0} = \beta I_{б0}. \quad (16.1)$$

Напряжение $U_{кэ0}$ между коллектором и эмиттером транзистора постоянное. Интервал $0-t_1$ соответствует режиму покоя.

Если на вход усилителя подан переменный сигнал $e_1 = U_m \sin \omega t$, то в течение положительного полупериода (интервал t_1-t_2) эмиттерный переход транзистора смещается в прямом направлении по синусоидальному закону. Это вызывает приращение тока базы, следовательно, и коллекторного тока, согласно (16.1). Увеличивается падение напряжения на резисторе R_k и уменьшается напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{кэ}$. В течение отрицательного полупериода (интервал t_2-t_3) уменьшается ток базы и коллектора. Уменьшается падение напряжения на резисторе R_k и увеличивается напряжение между коллектором и эмиттером. Временные диаграммы напряжений и токов в базовой и коллекторной цепях приведены на рис. 16.4, б.

Из рассмотренного видно, что при увеличении входного напряжения напряжение на нагрузке уменьшается, и наоборот.

Какой фазовый сдвиг между выходным и входным сигналами в схеме рис. 16.4, а? — а) 0° ; б) 180° .

Численные соотношения в схеме усилителя можно определить графоаналитическим методом, если воспользоваться статическими входными и выходными характеристиками транзистора (рис. 16.5, а, б).

При выборе значения напряжения начального смеще-

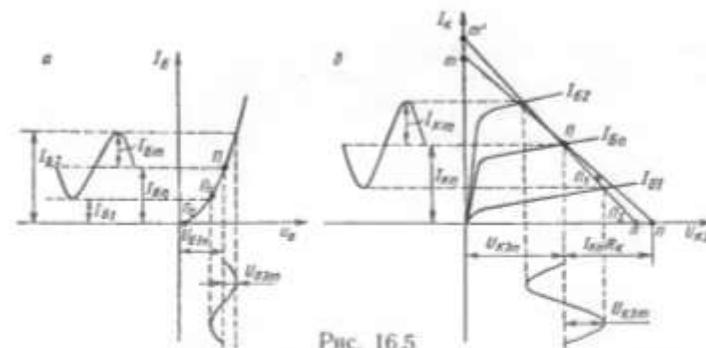


Рис. 16.5

ния в базовой цепи $U_{бэ0}$ ток покоя базы $I_{б0}$ однозначно определяется по характеристике $I_B = f(U_{бэ})$ (точка P на рис. 16.5, а). На рис. 16.5, а показан также характер изменения тока базы при наличии на входе сигнала $e_1 = U_m \sin \omega t$.

Для главной цепи усилителя можно записать выражение

$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k, \quad (16.2)$$

которое называется уравнением линии нагрузки по постоянному току. Оно характеризует распределение напряжения источника E_k между резистором R_k и транзистором VT при изменении тока коллектора. В координатах $U_{кэ}, I_k$ (рис. 16.5, б) уравнение (16.2) можно построить по двум точкам: при $I_k = 0$ все напряжение источника E_k приложено к транзистору (точка n на рис. 16.5, б); если же сопротивление транзистора ничтожно мало ($U_{кэ} = 0$), то в коллекторной цепи будет максимальный ток, равный $I_k = E_k / R_k$ (точка m на рис. 16.5, б).

Поскольку ток покоя коллектора $I_{к0}$ удовлетворяет выражению (16.2), то пересечение линии нагрузки с характеристикой $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_B = I_{б0}$ определяет положение точки покоя P в выходной цепи. Проекция этой точки на оси I_k и $U_{кэ}$ дает численное значение $I_{к0}$ и $U_{кэ0}$ в главной цепи усилителя (рис. 16.5, б).

Наличие переменного сигнала e_1 на входе усилителя вызывает переменную составляющую тока и напряжения в главной цепи усилителя. Для переменного тока внутренние сопротивления источника E_k и сопротивление конденсатора C_{p2} ничтожно малы. Поэтому относительно переменного напряжения, возникающего между коллектором и эмиттером транзистора ($U_{кэ}$), резисторы R_k и $R_э$ соеди-

нены параллельно. Контуры, по которым протекает переменный ток в выходной цепи, показаны на рис. 16.4, *a* штриховыми линиями. Результирующее сопротивление выходной цепи для переменного тока определяется параллельным сложением резисторов R_K и R_N и равно $R_{Kn} = R_K R_N / (R_K + R_N)$. Линия нагрузки для переменного тока определяется величиной R_{Kn} и также проходит через точку Π , но идет несколько круче, так как $R_{Kn} < R_K$ (линия $m'n'$ на рис. 16.5, *b*).

Мгновенные значения тока и напряжения в выходной цепи при наличии переменного сигнала определяются пересечением линии $m'n'$ с выходными характеристиками транзистора. На рис. 16.5, *b* построены кривые изменения тока и напряжения в выходной цепи (i_K , u_K) для случая синусоидального входного сигнала. По результатам графического построения можно определить:

$$K_U = U_{KЭм} / U_{БЭн}; K_I = I_{Км} / I_{Бн}.$$

При каких условиях выходной сигнал будет иметь минимальные искажения: в) $U_{KЭм} < U_{KЭн}$, $I_{Км} < I_{КЭн}$? г) $U_{KЭм} > U_{KЭн}$, $I_{Км} > I_{КЭн}$?

В рассмотренной схеме положение точки начального смещения Π выбрано посредине линии mn . Такой режим носит название *режима класса А*. Он характеризуется условиями $U_{KЭн} > U_{KЭм}$ и $I_{Кн} > I_{Км}$. В этом режиме мощность, потребляемая от источника E_K , определяется $P_0 = U_{KЭн} I_{Кн}$, а мощность переменного выходного сигнала

$$P_{max} = \frac{1}{2} U_{Км} I_{Км}. \text{ Следовательно, КПД усилителя } \eta = \frac{1}{2} \frac{U_{КЭм} I_{Км}}{U_{КЭн} I_{Кн}}.$$

Очевидно, что максимальное значение КПД усилителя возможно при условии $U_{KЭм} = U_{KЭн}$ и $I_{Кн} = I_{Км}$ и составит $\eta = 0,5$.

Достоинство режима класса А в том, что обеспечивает минимальное искажение формы усиливаемого сигнала. Главным недостатком этого режима является низкое значение КПД усилителя. Практическое значение КПД в этом режиме $\eta \leq 0,35$.

Более высокое значение КПД может быть достигнуто при работе усилителя в режиме класса АВ или В. Чтобы перейти в режим АВ или В, необходимо уменьшить величину начального смещения на базе транзистора.

Что для этого нужно сделать: д) увеличить R_1 и уменьшить R_2 ? е) уменьшить R_1 и увеличить R_2 ?

На рис. 16.5, *a*, *b* положение точки начального смещения, соответствующее режимам класса АВ и В, обозначено соответственно Π_1 и Π_2 .

Из приведенных рассуждений видно, что режим начального смещения зависит от R_1 и R_2 . Однако в действительности на режим начального смещения существенное влияние оказывает температура, так как с изменением температуры изменяются параметры элементов схемы.

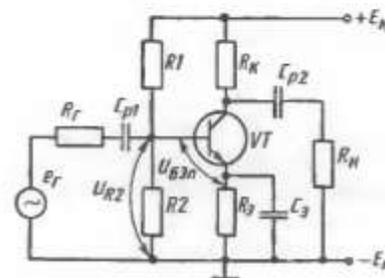


Рис. 16.6

Параметры каких элементов схемы будут в значительной степени зависеть от температуры: ж) резисторов? з) транзисторов?

Для температурной стабилизации схемы используют различные способы. Наиболее широкое применение получила схема стабилизации с помощью резистора R_3 в эмиттерной цепи транзистора (рис. 16.6). Схема стабилизации работает следующим образом: при изменении тока смещения $I_{Кн}$ в главной цепи под действием температуры изменяется падение напряжения на резисторе R_3 .

Но так как для схемы на рис. 16.6 напряжение постоянного смещения $U_{БЭн}$ определяется выражением $U_{БЭн} = U_{R_1} - I_{Кн} R_3$, где U_{R_1} — напряжение на резисторе R_2 , то изменение тока $I_{Кн}$ под действием температуры приведет к автоматическому изменению напряжения начального смещения $U_{БЭн}$.

Чтобы резистор R_3 не влиял на значение переменного тока, он шунтируется конденсатором C_3 , сопротивление которого для переменного тока мало.

Рассмотрим влияние элементов схемы на коэффициенты усиления.

Коэффициент усиления схемы по току (16.4, *a*, 16.6)

определяется как отношение переменного тока в нагрузке к переменной составляющей тока базы:

$$K_I = \frac{I_{nm}}{I_{бm}}. \quad (16.4)$$

Для переменной составляющей тока коллектора справедливо соотношение (16.1), поэтому

$$I_{кm} = \beta I_{бm}. \quad (16.4)$$

Но ток $I_{кm}$ распределяется обратно пропорционально сопротивлениям R_K и R_n , поэтому ток в нагрузке

$$I_{nm} = \beta I_{бm} \frac{R_K}{R_K + R_n}. \quad (16.5)$$

Подставив значение I_{nm} из (16.5) в (16.3), получим

$$K_I = \beta \frac{R_K}{R_K + R_n}.$$

Из последнего выражения нетрудно показать, что если $R_K \rightarrow \infty$, то $K_I \rightarrow \beta$.

Возможен ли такой режим работы, когда $R_K \rightarrow \infty$? — и) да; к) нет.

Процесс усиления возможен тогда, когда в главной цепи протекает ток. Если же $R_K = \infty$, то ток в главной цепи равен нулю. Следовательно, усиления не будет. На практике обычно принимают $R_K = (3 - 5)R_n$. Коэффициент усиления по напряжению через параметры схемы определяется следующим образом:

$$K_U = K_I \frac{R_n}{R_n + R_{вх}},$$

где $R_{вх}$ — входное сопротивление усилителя; R_n — сопротивление генератора сигналов. Для схемы ОЭ значения K_U и K_P лежат в пределах $K_U = 20 - 100$, $K_P = (0,2 - 5) \cdot 10^3$.

Ответы: б, в, д, з, к.

- ? 1. Какие элементы образуют входную и выходную цепи усилителя? 2. За счет каких элементов обеспечивается режим начального смещения? 3. Что означает режим работы в классах А, АВ, В? 4. На что влияет выбор режима начального смещения? 5. Что такое линия нагрузки? Как она строится? 6. Для чего нужна термостабилизация схемы? 7. Как влияют параметры схемы усилителя на коэффициенты K_U и K_P ?

Общие положения. Основное назначение выходных каскадов (усилителей мощности) — обеспечить заданную мощность в нагрузке. Они работают в режиме большого сигнала, что обуславливает большое потребление мощности от источника питания. Поэтому КПД и уровень нелинейных искажений являются существенными показателями и определяют выбор начального смещения. Чаще всего выходные каскады работают в режиме класса В или АВ. В режиме класса А они выполняются на мощность не более десятка милливольт.

Второй особенностью этих каскадов является то, что они, как правило, работают на низкоомную нагрузку. Известно, что максимальная мощность в нагрузке выделяется при равенстве сопротивления нагрузки и выходного сопротивления усилителя. Таким условиям удовлетворяют не все схемы включения транзисторов. Поэтому приходится решать вопрос согласования сопротивлений. Для этой цели используются согласующие трансформаторы. В последнее время широко применяются и бестрансформаторные схемы в интегральном исполнении.

Выходные каскады выполняются двух типов: *однотактные* и *двухтактные*. Однотактные выполняются на малую мощность и имеют КПД не выше 40%. В двухтактных схемах возможно получить КПД до 70% при удовлетворительном уровне нелинейных искажений.

Рассмотрим некоторые схемы выходных каскадов.

Схема ОК. В приведенной на рис. 16.7 схеме элементы R_1 , R_2 , C_{p1} , C_{p2} выполняют ту же роль, что и в схеме на рис. 16.4. Функции ЛЭ главной цепи усилителя выполняет резистор R_n , включенный в эмиттерную цепь транзистора.

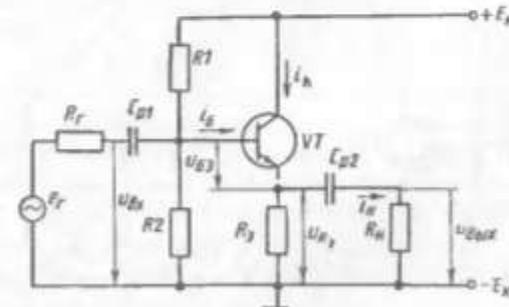


Рис. 16.7

Для переменного тока сопротивление источника E_K мало, поэтому вывод коллектора транзистора можно соединить с общей (заземленной) точкой схемы. Отсюда и название схемы «общий коллектор» (ОК). Схема ОК обладает малым выходным сопротивлением.

Принцип работы схемы такой же, как и схемы на рис. 16.4, т. е. при увеличении входного сигнала ток в главной цепи усилителя возрастает, а при уменьшении входного сигнала — уменьшается.

Какой будет в этой схеме фазовый сдвиг между $u_{вх}$ и $u_{вх}$: а) 0° ? б) 180° ?

Отличительная особенность данной схемы в том, что при увеличении тока в главной цепи увеличивается напряжение на резисторе R_1 , а следовательно, увеличивается $u_{вх}$.

Напряжение усиливаемого сигнала $u_{вх}$ уравновешивается падением напряжения на резисторе $R_1 (u_{R_1})$ и на эмиттерном переходе транзистора $u_{ЕЭ}$, т. е. $u_{вх} = u_{ЕЭ} + u_{R_1}$. Переменная составляющая выходного напряжения снимается с резистора R_2 , следовательно,

$$u_{вх} = u_{R_2} = u_{вх} - u_{ЕЭ}.$$

Численное значение $u_{ЕЭ}$ по сравнению с u_{R_2} мало, поэтому можно считать $u_{вх} = u_{вх}$. Отсюда вытекает, что $K_U = u_{вх}/u_{вх} < 1$. В этой схеме выходное напряжение повторяет входное, поэтому ее часто называют эмиттерный повторитель.

Коэффициент усиления по току $K_I \gg 1$, а коэффициент усиления по мощности $K_P \approx K_I$.

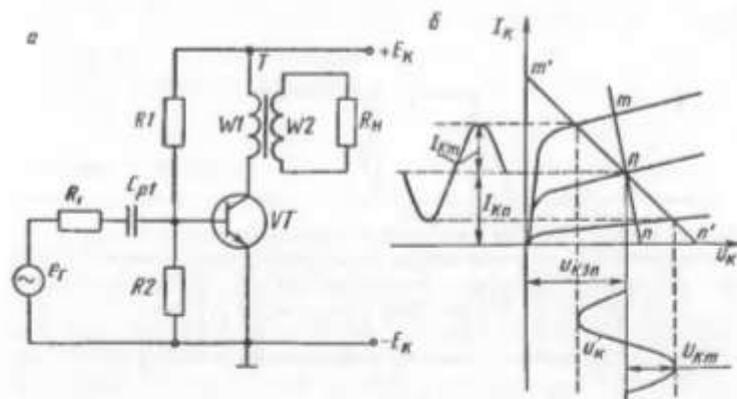


Рис. 16.8

Однотактный каскад с трансформаторной связью. В схеме на рис. 16.8, а роль ЛЭ выполняет трансформатор T , первичная обмотка которого включена в коллекторную цепь транзистора. При отсутствии во входной цепи переменного сигнала в главной цепи усилителя $+E_K$, W_1 , VT , $-E_K$ протекает только ток начального смещения $I_{Кн}$.

В этом случае будет ли протекать ток во вторичной обмотке трансформатора? — в) да; г) нет.

Сопротивление первичной обмотки трансформатора постоянному току мало, поэтому в режиме покоя почти все напряжение источника E_K приложено к транзистору. Линия нагрузки m по постоянному току идет почти вертикально (рис. 16.8, б).

При наличии переменного сигнала в главной цепи возникает переменный ток, который трансформируется во вторичную обмотку W_2 . Для переменного тока сопротивление в коллекторной цепи велико и определяется выражением $R'_n = n^2 R_n$, где $n = W_1/W_2$ — коэффициент трансформации трансформатора.

Линия нагрузки по переменному току займет положение $m'n'$ (рис. 16.8, б), а ее пересечение с характеристиками транзистора определит переменные составляющие тока и напряжения в выходной цепи. На рис. 16.8, б показан характер изменения тока и напряжения в выходной цепи при синусоидальном входном сигнале.

Ток в нагрузке R_n определяется значением коэффициента трансформации. Режим согласования каскада с нагрузкой обеспечивается, если $R_{нэк} = n^2 R_n$. Обычно из этого выражения определяют коэффициент трансформации трансформатора $n = \sqrt{R_{нэк}/R_n}$.

Если сопротивление нагрузки R_n мало, а $R_{нэк}$ велико, то какая обмотка трансформатора должна иметь больше витков: д) первичная? е) вторичная?

Двухтактный каскад с трансформаторной связью. Приведенная на рис. 16.9, а схема обеспечивает высокий КПД при значительной мощности выходного сигнала. Такие каскады работают в режиме класса В или АВ.

Источник усиливаемого сигнала подключается к базовым цепям транзисторов через входной трансформатор T_1 , вторичная обмотка которого состоит из двух одинаковых секций W_{2-1} и W_{2-2} . Средняя точка вторичной обмотки трансформатора T_1 подключена через резистор R_2 к эмиттерам транзисторов и минусу источника питания.

Первичная обмотка выходного трансформатора T_2 также состоит из двух одинаковых секций W_{1-1} и W_{1-2} . Коллекторная цепь транзистора VT_1 подключена к секции W_{1-1} , а транзистора VT_2 — к W_{1-2} . Средняя точка первичной обмотки соединена с плюсом источника питания. Относительно источника E_k транзисторы включены параллельно.

Рассмотрим работу схемы, используя временные диаграммы тока и напряжения (рис. 16.9, б) для режима класса В.

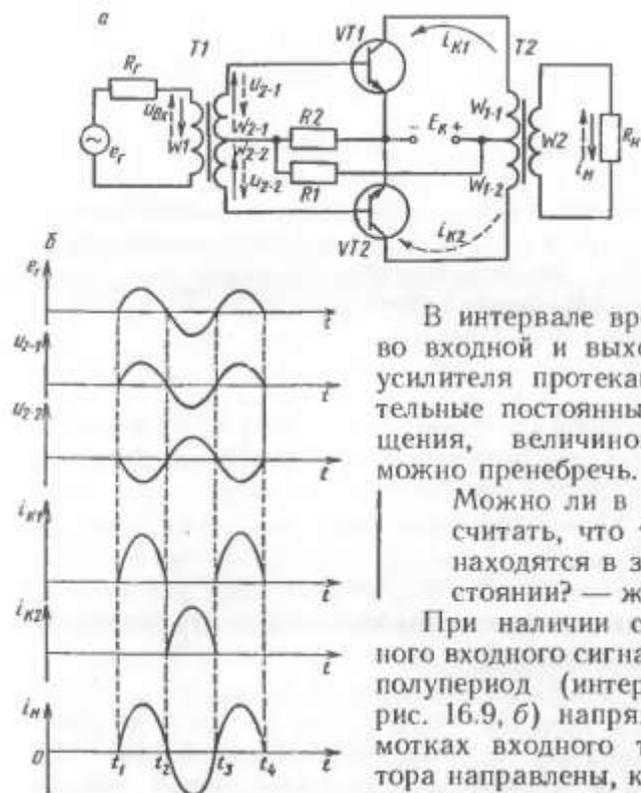


Рис. 16.9

В интервале времени $0 - t_1$ во входной и выходной цепях усилителя протекают незначительные постоянные токи смещения, величиной которых можно пренебречь.

Можно ли в этом случае считать, что транзисторы находятся в закрытом состоянии? — ж) да; з) нет.

При наличии синусоидального входного сигнала в первый полупериод (интервал $t_1 - t_2$, рис. 16.9, б) напряжения в обмотках входного трансформатора направлены, как показано сплошными стрелками на рис. 16.9, а. Потенциал базы транзистора VT_1 будет положительный, а потенциал базы

транзистора VT_2 — отрицательный. Транзистор VT_1 будет открыт, а VT_2 — закрыт. В верхнем контуре выходной цепи ($+E_k, W_{1-1}, VT_1, -E_k$) будет протекать ток i_{K1} , как показано сплошной стрелкой на рис. 16.9, а.

Во второй полупериод (интервал $t_2 - t_3$, рис. 16.9, б) напряжение в обмотках входного трансформатора изменит направление на противоположное, как показано штриховой стрелкой на рис. 16.9, а. Потенциал базы транзистора VT_2 станет положительным, а базы транзистора VT_1 — отрицательным. Закроется транзистор VT_1 и откроется VT_2 . Выходной ток i_{K2} будет протекать в нижнем контуре ($+E_k, W_{1-2}, VT_2, -E_k$), как показано штриховой стрелкой на рис. 16.9, а.

Поскольку в секциях первичной обмотки выходного трансформатора T_2 в течение периода ток i_k меняет направление, то во вторичной обмотке этого трансформатора и через нагрузку R_n будет протекать переменный ток. Значение выходного напряжения, приложенного к нагрузке R_n , будет зависеть от коэффициента трансформации выходного трансформатора T_2 .

Из рассмотренного видно, что транзисторы работают поочередно, отсюда и название схемы «двухтактная». Продолжительность открытого состояния каждого транзистора составляет полупериод. Это позволяет выбрать транзисторы на мощность меньшую, чем мощность нагрузки. Данная схема обеспечивает также высокий КПД ($\sim 70\%$) и удовлетворительные нелинейные искажения.

Можно ли схему на рис. 16.9, а выполнить в полном объеме в интегральном исполнении? — и) да; к) нет.

Бестрансформаторные двухтактные каскады. В рассмотренных схемах (рис. 16.8, а, рис. 16.9, а) неотъемлемыми элементами являются трансформаторы. По массе и габаритам трансформаторы могут превосходить остальные элементы схемы. Трансформаторы невозможно выполнить по интегральной технологии. Поэтому в настоящее время разработано много бестрансформаторных схем. Одна из таких схем приведена на рис. 16.10. Отличительной особенностью схемы является наличие двух источников питания и транзисторов с различной проводимостью:

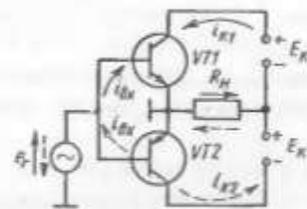


Рис. 16.10

VT_1 $n-p-n$ -типа, а VT_2 $p-n-p$ -типа. Параметры цепи смещения (на рис. 16.10 не показаны) подбираются таким образом, чтобы обеспечить работу в режиме класса В или АВ, поэтому при отсутствии входного сигнала транзисторы закрыты и ток нагрузки равен нулю.

При воздействии входного сигнала схема работает так же, как и предыдущая (рис. 16.9, а), т. е. в течение положительного полупериода открыт транзистор VT_1 , а в отрицательный полупериод — VT_2 . Направление тока в нагрузке и во входных и выходных контурах показано на рисунке соответственно сплошной и штриховой стрелками.

4. Обратные связи в усилителях

Обратной связью (ОС) называется процесс передачи энергии из выходной цепи усилителя во входную. Этот процесс происходит в силу физических свойств усилительных элементов (внутренняя ОС) или вследствие емкости и индуктивности схемы (паразитная ОС). Внутренняя и паразитная ОС являются неуправляемыми, и их нельзя полностью исключить.

На практике применяют внешнюю ОС путем введения в схему специальных цепей. Замкнутый контур (рис. 16.11), образованный цепью ОС и частью схемы усилителя, к которой ОС подключена, называется петлей ОС. Петля ОС может охватывать как отдельный каскад (местная ОС), так и весь усилитель (общая ОС).

Параметром ОС является коэффициент передачи, который показывает, какая часть выходного напряжения передается на вход усилителя, т. е. $\kappa = u_{oc} / u_{вых}$.

Если напряжение ОС u_{oc} пропорционально напряжению на нагрузке $u_{вых}$ (рис. 16.11, а, в), то имеет место ОС по напряжению.

Как изменится u_{oc} в схемах рис. 16.11, а, в, если замкнут сопротивление нагрузки R_n : а) u_{oc} увеличится? б) u_{oc} уменьшится?

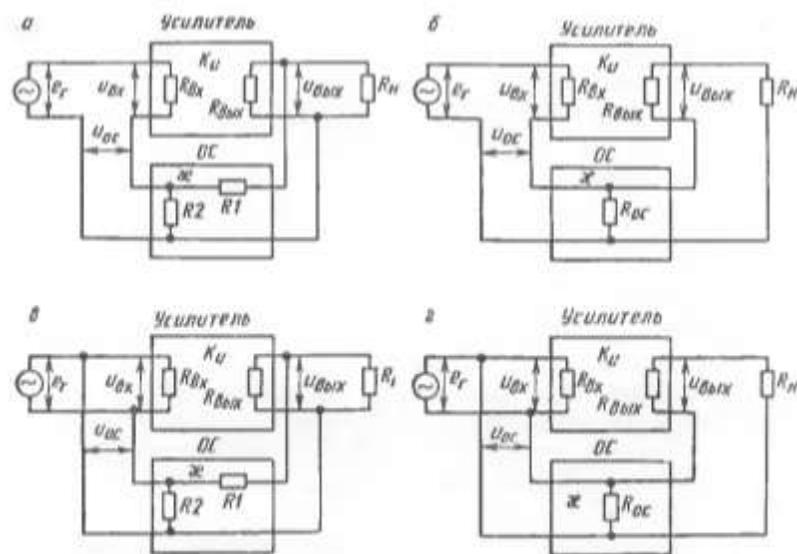


Рис. 16.11

Когда напряжение ОС u_{oc} пропорционально току нагрузки, то такая связь называется ОС по току (рис. 16.11, б, г).

Как изменится u_{oc} , если в схемах на рис. 16.11, б, г замкнут R_n : в) u_{oc} увеличится? г) u_{oc} уменьшится?

По способу передачи энергии через цепь ОС во входную цепь усилителя по отношению ко входному сигналу различают последовательную (рис. 16.11, а, б) и параллельную (рис. 16.11, в, г) ОС. Таким образом, в зависимости от схемы подключения ОС к выходу и входу усилителя можно выделить четыре схемы ОС: последовательная по напряжению, последовательная по току; параллельная по напряжению, параллельная по току. Возможны и комбинированные схемы.

Сигнал ОС, поступающий на вход усилителя, может складываться с усиливаемым сигналом или вычитаться из него. В первом случае имеет место *положительная ОС*, во втором — *отрицательная ОС*. В усилителях применяется только отрицательная ОС.

Влияет ли ОС на параметры усилителя? — д) да; е) нет.

Рассмотрим этот вопрос на примере последовательной отрицательной ОС по напряжению (рис. 16.11, а).

Для этой схемы можно записать $e_r = u_{вх} + u_{oc}$, поэтому

общий коэффициент усиления схемы по напряжению с учетом ОС

$$K_{U_{oc}} = \frac{u_{вых}}{u_{вх} + u_{oc}}. \quad (16.6)$$

Но напряжения $u_{вых}$, $u_{вх}$ и u_{oc} связаны между собой через коэффициент усиления усилителя K_U и коэффициент передачи звена ОС κ следующим образом:

$$u_{вых} = K_U u_{вх}; \quad (16.7)$$

$$u_{oc} = \kappa u_{вых} = \kappa K_U u_{вх}. \quad (16.8)$$

Подставив значения $u_{вых}$ и u_{oc} из (16.7) и (16.8) в (16.6) и сократив на $u_{вх}$, получим

$$K_{U_{oc}} = \frac{K_U}{1 + \kappa K_U}. \quad (16.9)$$

Из последнего выражения видно, что ОС уменьшает коэффициент усиления схемы, но ОС стабилизирует численное значение коэффициента усиления в более широком диапазоне частот.

Если коэффициент усиления усилителя очень большой, ($K_U \rightarrow \infty$), то выражение (16.9) примет вид

$$K_{U_{oc}} = \frac{1}{\kappa}.$$

В этом случае говорят о *глубокой ОС*.

Можно ли считать, что при глубокой ОС зависимость между входным и выходным сигналами определяется только коэффициентом передачи ОС κ ? — ж) да; з) нет.

Аналогичным образом можно показать, что для схемы на рис. 16.11, а входное и выходное сопротивления с учетом ОС будут определяться выражениями:

$$R_{вх, oc} = R_{вх}(1 + \kappa K_U); \quad R_{вых, oc} = R_{вых}/(1 + \kappa K_U),$$

где $R_{вх}$ и $R_{вых}$ — соответственно входное и выходное сопротивления усилителя без ОС.

Из двух последних выражений видно, что отрицательная ОС увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивления.

В заключение отметим, что применение отрицательной ОС позволяет уменьшить влияние внутренних помех на искажение формы усиливаемого сигнала.

Ответы: б, в, д, ж.

? 1. Что такое обратная связь? 2. Перечислите разновидности схем ОС. 3. Дайте определение положительной и отрицательной ОС. 4. На какие параметры усилителя влияет ОС?

16.5. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В усилителях постоянного тока (УПТ) частота сигнала измеряется единицами и долями герца. При таких частотах невозможно использовать реактивные элементы (конденсаторы и трансформаторы) для межкаскадных связей, а также для связи входа и выхода усилителя соответственно с источником и приемником сигнала. В УПТ применяют непосредственную омическую (гальваническую) связь.

При омических связях отсутствует развязка по постоянному току между отдельными каскадами, что затрудняет выбор режима начального смещения. Кроме того, в процессе работы, при отсутствии реактивных связей, облегчается прохождение сигнала помехи, возникающего вследствие изменения параметров элементов схемы при изменении температуры и напряжения источника питания. Сигнал помехи, обусловленный внутренними процессами, называется дрейфом нуля усилителя.

Какую частоту имеет напряжение дрейфа: а) высокую? б) низкую?

Напряжение дрейфа искажает полезный сигнал на выходе усилителя и создает ложное представление об изменениях входного сигнала. С течением времени при длительной работе напряжение дрейфа медленно изменяется (возрастает), поэтому в УПТ применяют различные способы компенсации дрейфа.

Лучшими показателями в этом отношении обладают дифференциальные (параллельно-балансные) каскады. Упрощенная схема одного из них приведена на рис. 16.12.

Дифференциальный усилитель (ДУ) выполнен по принципу моста, два плеча которого образуют резисторы R_{K1} и R_{K2} , а два других — транзисторы VT_1 и VT_2 . Такие схемы выполняются как на дискретных (отдельных) элементах, так и в виде интегральных микросхем. В последнем случае все элементы выполняются в едином технологическом процессе.

Непременными условиями ДУ являются равенство сопротивлений резисторов $R_{K1} = R_{K2}$ и идентичность параметров транзисторов VT_1 и VT_2 . При этих условиях напряжение дрейфа будет сведено к минимуму. В реальных

схемах невозможно добиться полной симметрии плеч, так как имеет место разброс параметров одноименных элементов.

В каких схемах будет иметь место большой разброс параметров: в) на дискретных элементах? г) в интегральных микросхемах?

К эмиттерным цепям транзисторов подключен генератор стабильного тока (ГСТ), который генерирует неизменный по величине ток I_0 независимо от входных и выходных сигналов. Питание каскада осуществляется от двух источников $E^{(+)}$ и $E^{(-)}$ с равными напряжениями.

Входами усилителя являются базовые цепи транзисторов. Входные сигналы от двух источников e_{r1} и e_{r2} могут быть поданы на оба входа (см. рис. 16.12). Схема позволяет

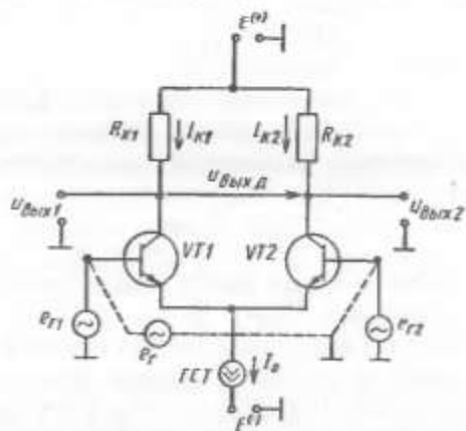


Рис. 16.12

также включение источника сигнала между базами транзисторов (симметричный вход), как показано на рис. 16.12 штриховыми линиями.

Выходные сигналы можно снимать с коллекторов транзисторов относительно общей точки (несимметричные выходы $U_{вых1}$, $U_{вых2}$) или между коллекторами транзисторов (симметричный или дифференциальный выход $U_{вых.д}$).

Рассмотрим принцип действия каскада.

При отсутствии входных сигналов $e_{r1} = e_{r2} = 0$ ток ГСТ I_0 делится между левой и правой ветвями моста поровну (рис. 16.13, а), т. е. $i_{Э1} = i_{Э2} = I_0/2$. Поскольку в коллекторных цепях транзисторов токи мало отличаются от токов в эмиттерных цепях, то можно записать $i_{К1} = i_{К2} = I_0/2$.

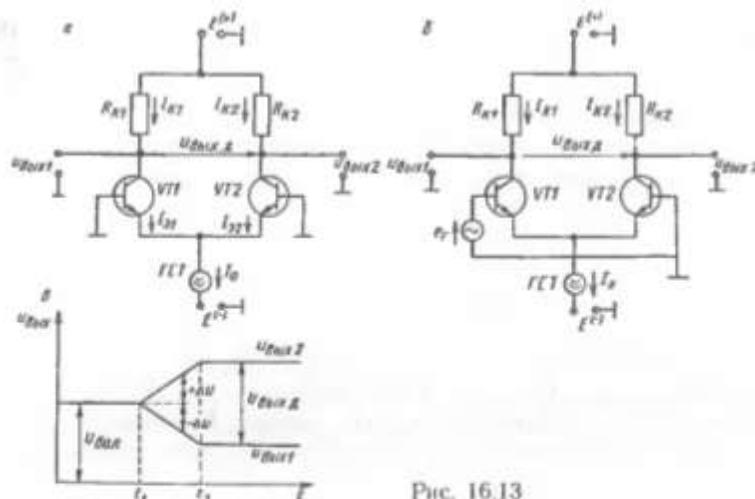


Рис. 16.13

Равенство коллекторных токов определяет одинаковые потенциалы коллекторов транзисторов, поэтому выходные напряжения по несимметричным выходам равны, т. е. $U_{вых1} = U_{вых2} = E^{(+)} - I_0 R_K/2 = U_{балан}$ где $R_K = R_{K1} = R_{K2}$.

Такое состояние схемы характеризует режим баланса или покоя (интервал времени $0 - t_1$ на рис. 16.13, б). В режиме баланса напряжение по симметричному выходу равно нулю: $U_{вых.д} = U_{вых2} - U_{вых1} = 0$, так как $U_{вых1} = U_{вых2}$.

Если на вход транзистора VT_1 поступает положительный сигнал $e_{r1} > 0$, а $e_{r2} = 0$ (рис. 16.13, б), то увеличится проводимость первого транзистора и уменьшится — второго. Произойдет перераспределение токов в ветвях моста: ток $i_{К1}$ увеличится на величину ΔI , а $i_{К2}$ уменьшится на ΔI .

В результате $i_{К1} > I_0/2$, а $i_{К2} < I_0/2$, но их сумма будет равна I_0 .

Изменение коллекторных токов приведет к изменению падения напряжения на резисторах R_{K1} и R_{K2} . В результате потенциал коллектора транзистора VT_1 снизится на величину Δu , а потенциал коллектора VT_2 увеличится на Δu . Напряжения на несимметричных выходах будут $U_{вых1} = E^{(+)} - i_{К1} R_{K1} < U_{балан}$; $U_{вых2} = E^{(+)} - i_{К2} R_{K2} > U_{балан}$.

Напряжение, снимаемое по симметричному выходу, будет равно разности потенциалов коллекторов, т. е.

$$U_{вых.д} = U_{вых2} - U_{вых1} = 2\Delta u.$$

Диаграмма изменения выходных напряжений для рас-

смотренного случая приведена на рис. 16.13, в (интервал $t_1 - t_2$).

Какой фазовый сдвиг на интервале $t_1 - t_2$ между напряжениями e_{r1} и $u_{\text{вых}1}$? — д) 0° ; е) 180° .

В схеме рис. 16.13, б при увеличении сигнала e_{r1} напряжение на первом выходе уменьшается, поэтому первый вход относительно выхода называется инвертирующим, а второй — неинвертирующим.

Если в схеме рис. 16.13, б входной сигнал e_{r1} очень большой, то в предельном случае транзистор VT_2 полностью закрыт. Тогда токи в плечах моста имеют следующие значения $i_{K1} = I_0$, а $i_{K2} = 0$. Напряжения на несимметричных выходах имеют значения $u_{\text{вых}1} = E^{(+)} - I_0 R_{K1}$; $u_{\text{вых}2} = E^{(+)}$, а напряжение по симметричному выходу имеет максимальное значение: $u_{\text{вых д}} = u_{\text{вых}2} - u_{\text{вых}1} = I_0 R_{K1}$ (интервал $t > t_2$ на рис. 16.13, в).

А какой фазовый сдвиг между сигналами e_{r1} и $u_{\text{вых}2}$ в интервале $t > t_2$? — ж) 0° ; з) 180° .

Для случая $e_{r1} = 0$, $e_{r2} > 0$ процесс в схеме протекает аналогично. Отличие состоит лишь в том, что увеличивается ток i_{K2} и уменьшается ток i_{K1} .

Для дифференциальных усилителей даются два коэффициента усиления:

$$K_{U1,2} = u_{\text{вых}1} / e_r = u_{\text{вых}2} / e_r; \quad K_{Uд} = u_{\text{вых д}} / e_r.$$

Будет ли перераспределение тока в плечах моста, если на оба входа подать один сигнал (рис. 16.14)? — и) да; к) нет.

На рис. 16.14 показана так называемая синфазная

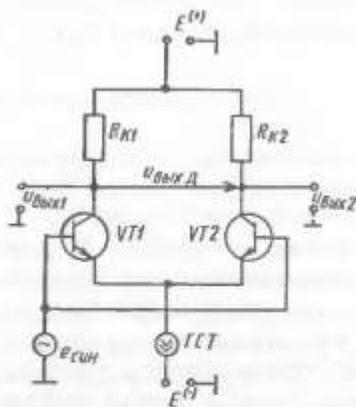


Рис. 16.14

схема подачи сигнала. Усилитель находится в таком режиме, когда на оба его входа действует сигнал помехи.

В реальных схемах синфазный сигнал приведет к некоторому их разбалансу, так как невозможно выполнить однотипные элементы идеально одинаковыми. В этом отношении хорошими показателями обладают интегральные схемы, у которых параметры элементов схемы отличаются незначительно.

Ответы: б, в, е, ж, к.

? 1. Каковы особенности выполнения УПТ? 2. Что такое дрейф нуля усилителя? 3. Что собой представляет дифференциальный каскад и в чем его преимущества? 4. Какие входы и выходы имеет дифференциальный каскад? 5. Как работает дифференциальный каскад? 6. В чем преимущества дифференциальных каскадов в интегральном исполнении?

16.6. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционные усилители (ОУ) первоначально использовались для решения операторных уравнений. Отсюда и их название. В настоящее время ОУ в интегральном исполнении широко применяются для построения более сложных функциональных схем.

Как правило, ОУ выполняются по многокаскадной схеме (двух- или трехкаскадной) с омическими связями между каскадами. Первый каскад выполняется по дифференциальной схеме, а последний — по схеме ОК.

Современные ОУ в интегральном исполнении обладают большим входным и малым выходным сопротивлениями и очень высоким коэффициентом усиления, т. е. $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$, $K_U \rightarrow \infty$.

В различных электронных схемах ОУ работают с глубокой ОС. При больших значениях K_U и глубокой ОС зависимость между входным и выходным сигналами определяется в основном характером ОС. Поэтому, изменяя характер ОС, можно получить различные функциональные схемы.

В различных сложных схемах ОУ обозначаются так, как показано на рис. 16.15, а, б. Как видно из рисунка, ОУ имеет два входа и один выход. Вход, помеченный кружком, называется инвертирующим, а второй — неинвертирующим. Если при подключении источника сигнала ко входу потенциал инвертирующего входа выше, чем неинвертирующего, то выходное напряжение сдвинуто на 180° относительно входного. В случае если потенциал

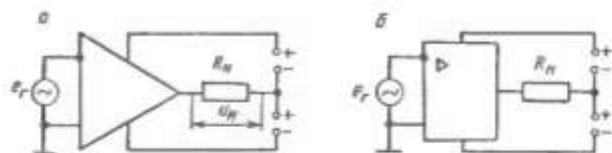


Рис. 16.15

неинвертирующего входа выше, чем инвертирующего, то выходное и входное напряжения совпадают по фазе. Питание ОУ осуществляется от двух источников с одинаковыми напряжениями.

Рассмотрим некоторые типовые схемы с использованием ОУ.

1. Масштабирующий усилитель. Масштабирующие усилители применяются в вычислительной технике, когда необходимо изменить сигнал в определенном соотношении. На рис. 16.16 приведена схема такого усилителя с инвертированием входного сигнала. Сигнал $u_{вх}$ через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, который охвачен отрицательной ОС с помощью резистора R_{oc} . Неинвертирующий вход соединен с общей точкой (заземляется).

Учитывая свойство ОУ, что $R_{вх} \rightarrow \infty$, током, протекающим через вход усилителя, можно пренебречь и потенциал точки А (рис. 16.16) считать равным потенциалу заземленного неинвертирующего входа. Тогда для токов схемы можно записать равенство $i_{вх} = i_{oc}$. Определив токи через напряжения и сопротивления, получим

$$\frac{u_{вх}}{R_1} = -\frac{u_{вых}}{R_{oc}}$$

Знак минус в последнем выражении означает, что $u_{вых}$ сдвинуто относительно $u_{вх}$ на 180° .

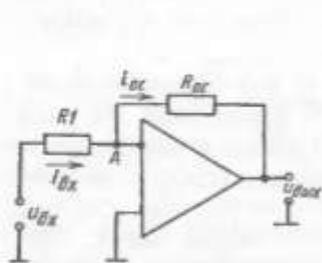


Рис. 16.16

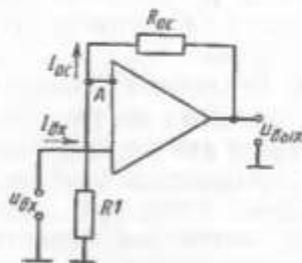


Рис. 16.17

Из последнего выражения получим

$$K_U = -\frac{u_{вых}}{u_{вх}} = -\frac{R_{oc}}{R_1},$$

откуда видно, что соотношение между напряжениями $u_{вых}$ и $u_{вх}$ зависит только от параметров резисторов R_{oc} и R_1 .

Схема масштабирующего ОУ без инвертирования сигнала приведена на рис. 16.17. От схемы рис. 16.16 она отличается тем, что входной сигнал подается на неинвертирующий вход, а инвертирующий заземляется через резистор R_1 .

На основании тех же свойств ОУ для схемы рис. 16.17 можно показать, что масштабирующий коэффициент определяется выражением

$$K_U = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = 1 + R_{oc}/R_1.$$

2. Суммирующий усилитель. На рис. 16.18 представлена схема включения ОУ для суммирования двух сигналов с изменением фазы выходного напряжения (инвертирующий сумматор). От схемы рис. 16.16 она отличается тем, что каждый источник сигнала подключен к инвертирующему входу через свой резистор. Входных сигналов может быть и более двух. При $R_{вх} \rightarrow \infty$ уравнение для токов схемы имеет следующий вид:

$$\frac{u_{вх1}}{R_1} + \frac{u_{вх2}}{R_2} = -\frac{u_{вых}}{R_{oc}}$$

Если принять $R_1 = R_2 = R_{oc}$, то получим

$$u_{вых} = -(u_{вх1} + u_{вх2}).$$

Неинвертирующий сумматор приведен на рис. 16.19. Для

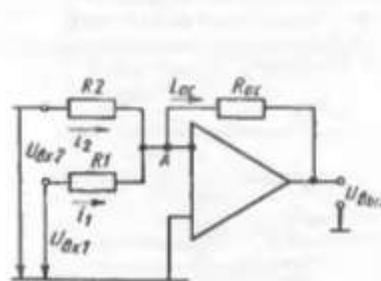


Рис. 16.18

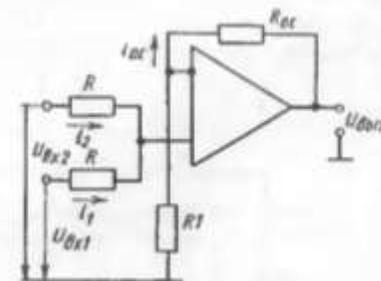


Рис. 16.19

этой схемы связь между входными и выходными напряжениями

$$u_{\text{вых}} = \frac{R_1 + R_2}{nR_1}(u_{\text{вх1}} + u_{\text{вх2}}),$$

где n — число входных сигналов; в данной схеме $n = 2$.

3. Интегрирующий усилитель. В интегрирующем усилителе напряжение на выходе постепенно достигает определенного значения (интегрирует входной сигнал). Приведенная на рис. 16.20 интегрирующая схема отличается

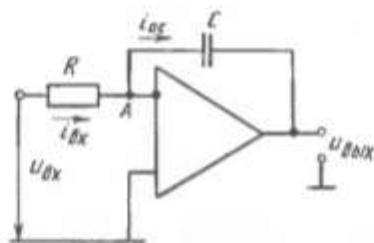


Рис. 16.20

от схемы рис. 16.16 тем, что в цепь ОС включен конденсатор. Связь между напряжениями определяется равенством

$$u_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}} dt.$$

4. Компаратор сигналов. Компаратором называется схема для сравнения двух напряжений (рис. 16.21, а).

На неинвертирующий вход усилителя подается неизменное по величине напряжение, называемое опорным $U_{\text{оп}}$. На инвертирующий вход подается изменяющееся во времени напряжение $u_{\text{вх}}$.

В схеме компаратора используется свойство усилителя изменять полярность (знак) выходного напряжения при изменении полярности напряжения на входах. Поясним это на примере временной диаграммы (рис. 16.21, б). В интервале времени $0 - t_1$ $U_{\text{оп}} > u_{\text{вх}}$, это значит, что потенциал неинвертирующего входа выше, чем инверти-

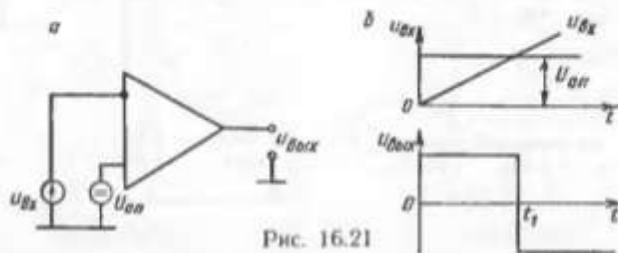


Рис. 16.21

рующего. Следовательно, $u_{\text{вых}}$ совпадает по фазе с $U_{\text{оп}}$ ($u_{\text{вых}} > 0$). В момент времени $t > t_1$, когда $u_{\text{вх}} > U_{\text{оп}}$ потенциал инвертирующего входа выше неинвертирующего $u_{\text{вх}} < 0$, т. е. отстает по фазе от $u_{\text{вх}}$ на 180° . Изменение полярности выходного напряжения происходит в момент времени t_1 , когда $u_{\text{вх}} = U_{\text{оп}}$.

Такие схемы используются для преобразования формы сигнала, получения прямоугольных импульсов и т. п.

? 1. Что такое операционный усилитель? 2. Какими свойствами обладают ОУ? 3. По какой схеме выполнены входной и выходной каскады ОУ? 4. Назовите основные схемы включения ОУ.

ГЛАВА 19

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

§ 19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В промышленной электронике очень часто возникает необходимость в усилении электрических сигналов, например, при измерениях незлектрических величин электрическими методами, контроле и автоматизации технологических процессов. Для решения этих задач используют электронные усилители — устройства, которые служат для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов.

В настоящее время в усилителях широко применяют транзисторы, которые заменили электронные лампы.

Классификация усилителей. Усилители могут быть классифицированы по ряду признаков: по роду усилительных элементов (ламповые, транзисторные); по роду усиливаемой величины (усилители напряжения, тока и мощности); по числу каскадов (одно-, двух- и многокаскадные). Одним из наиболее важных признаков является диапазон частот усиливаемых сигналов, в котором усилитель обеспечивает нормаль-

541

ную работу. По данному признаку различают следующие типы усилителей.

Усилители низкой частоты (УНЧ), которые служат для усиления непрерывных периодических сигналов в диапазоне низких частот (от десятков герц до десятков килогерц). Особенностью УНЧ является то, что отношение верхней усиливаемой частоты f_v к нижней f_n велико и имеет значение от нескольких сотен до нескольких тысяч.

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления медленно меняющихся напряжений и токов в диапазоне частот от нуля до некоторой наибольшей частоты. УПТ широко применяются в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Избирательные усилители, характеризующиеся небольшими значениями отношения верхней и нижней частот ($1 < f_v/f_n \leq 1,1$). Как правило, это усилители высокой частоты (УВЧ).

Импульсные, или широкополосные, усилители работают в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких десятков мегагерц и используются в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения.

Основные технические характеристики усилителей. Коэффициент усиления в соответствии с видом усиливаемой величины называют коэффициентом усиления по напряжению, току или мощности. Коэффициент усиления показывает, во сколько раз напряжение (ток, мощность) на выходе усилителя больше, чем на входе, и обозначается соответственно K_U (K_I , K_P). Так, коэффициент усиления по напряжению

$$K_v = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} \quad (19.1)$$

(обычно K_v обозначают просто K).

Для многокаскадного усилителя, структурная схема которого приведена на рис. 19.1, общий коэффициент усиления

$$K = K_1 K_2 \dots K_n,$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — коэффициент усиления соответствующих каскадов.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах — белах и децибелах, ($1\text{Б} = 10\text{ дБ}$).

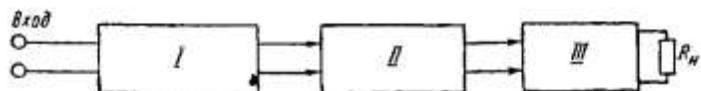


Рис. 19.1. Структурная схема трехкаскадного усилителя

Коэффициент усиления, выраженный в децибелах,

$$K_{дБ} = 10 \lg (U_{вых}/U_{вх}).$$

Общий коэффициент усиления, например, трехкаскадного усилителя в логарифмических единицах

$$K_{дБ} = K_{1дБ} + K_{2дБ} + K_{3дБ}.$$

В тех случаях, когда в децибелах необходимо определить усиление по мощности, применяют формулу

$$K_{РдБ} = 20 \lg (U_{вых}/U_{вх}),$$

где числовой множитель появляется потому, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Действительно,

$$K_{РдБ} = 10 \lg (P_{вых}/P_{вх}) = 10 \lg (U_{вых}^2/U_{вх}^2) = 20 \lg \times (U_{вых}/U_{вх}).$$

Последнее выражение справедливо при равенстве входного и выходного сопротивлений.

Выходная мощность — это мощность, которая развивается на выходном нагрузочном сопротивлении усилителя:

$$P_{вых} = U_{вых}^2/R_n = U_{т.вых}^2/(2R_n).$$

Обычно используют значения номинальной выходной мощности — наибольшей мощности, развиваемой в нагрузке, при которой искажения не превышают заданных значений.

Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной выходной мощности к мощности, потребляемой всеми источниками питания:

$$\eta = P_{вых}/P_{общ}.$$

Частотные искажения — это искажения, вызванные различной степенью усиления на различных частотах из-за присутствия в схемах усилителей

реактивных элементов (индуктивных катушек и конденсаторов).

Фазовые искажения — это искажения, вызванные нелинейной зависимостью сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты. Причиной этих искажений является присутствие реактивных элементов в схемах усилителя.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик усилительных элементов (электронных ламп, транзисторов) и проявляются в искажении формы усиливаемого сигнала.

В промышленной электронике наиболее распространены усилители низкой частоты. В связи с этим рассмотрение работы усилителей в данной главе в основном связано с УНЧ.

Карточка № 19.1 (277)

Общие сведения

Какой тип нагрузки обеспечивает более равномерное усиление в широком диапазоне частот?	Резистивный	6
	Индуктивный	30
	Смешанный	16
Определите коэффициент усиления трехкаскадного усилителя в децибелах, если каждый каскад обеспечивает десятикратное усиление	60	4
	30	17
	1000	77
Какой параметр полезного сигнала искажается за счет нелинейности усилительных элементов (электронных ламп и транзисторов)?	Частота сигнала	85
	Форма сигнала	95
	И частота, и форма сигнала	80
Вызывают ли частотные искажения изменение частоты усиливаемого полезного сигнала?	Да	52
	Нет	88
Соответствует ли термин УПТ существу процессов, происходящих в усилителях этого рода?	Нет	71
	Да	56

§ 19.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД УНЧ

Усилители низкой частоты в основном предназначены для обеспечения заданной мощности на выходном устройстве, в качестве которого может быть громкоговоритель, записывающая головка магнитофона, обмотка реле, катушка измерительного прибора и т. д. Источниками входного сигнала являются звукосниматель, фотоэлемент и всевозможные преобразователи неэлектрических величин в электрические. Как правило, входной сигнал очень мал, его значение недостаточно для нормальной работы усилителя. В связи с этим перед усилителем мощности включают один или несколько каскадов предварительного усиления, выполняющих функции усилителей напряжения.

В предварительных каскадах УНЧ в качестве нагрузки чаще всего используют резисторы; их собирают как на лампах, так и на транзисторах.

Усилители на биполярных транзисторах обычно собирают по схеме с общим эмиттером. Рассмотрим работу такого каскада (рис. 19.2). Напряжение синусоидального сигнала $u_{вх}$ подают на участок база—эмиттер через разделительный конденсатор $C_{р1}$, что создает пульсацию тока базы относительно постоянной составляющей $I_{б0}$. Значение $I_{б0}$ определяется напряжением источника E_k и сопротивлением резистора $R_б$. Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, проходящего по сопротивлению нагрузки R_k . Переменная составляющая тока коллектора создает на сопротивлении нагрузки R_k усиленное по амплитуде падение напряжения $u_{ввых}$.

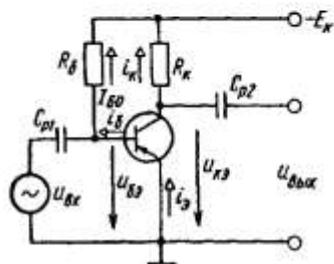


Рис. 19.2. Схема резистивного усилителя с общим эмиттером

Расчет такого каскада можно произвести графически с использованием приведенных на рис. 19.3 входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Если сопротивление нагрузки R_n и напряжение источника E_k заданы, то положение линии нагрузки определяется точками C

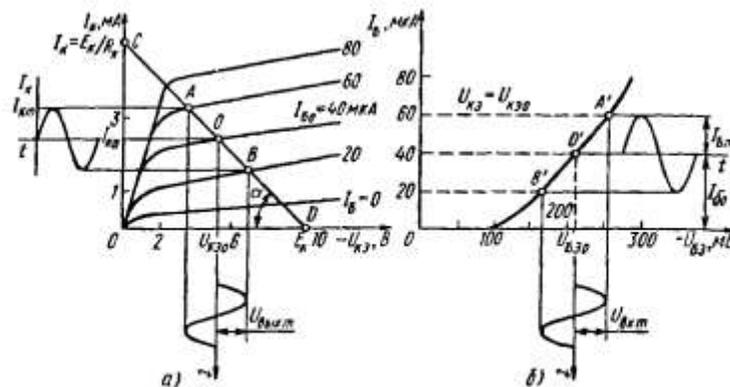


Рис. 19.3. Графический анализ работы схемы с ОЭ

и D . При этом точка D задана значением E_k , а точка C —током $I_k = E_k/R_n$. Линия нагрузки CD пересекает семейство выходных характеристик. Выбираем рабочий участок на линии нагрузки так, чтобы искажения сигнала при усилении были минимальны. Для этого точки пересечения линии CD с выходными характеристиками должны находиться в пределах прямолинейных участков последних. Этому требованию соответствует участок AB линии нагрузки.

Рабочая точка при синусоидальном входном сигнале находится в середине этого участка — точка O . Проекция отрезка AO на ось ординат определяет амплитуду коллекторного тока, а проекция того же отрезка на ось абсцисс — амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения. Рабочая точка O определяет ток коллектора $I_{к0}$ и напряжение на коллекторе $U_{кэ0}$, соответствующие режиму покоя.

Кроме того, точка O определяет ток покоя базы $I_{б0}$, а следовательно, и положение рабочей точки O' на входной характеристике (рис. 19.3, $a, б$). Точкам A и B выходных характеристик соответствуют точки A' и B' на входной характеристике. Проекция отрезка $A'O'$ на ось абсцисс определяет амплитуду входного сигнала $U_{вх м}$, при которой будет обеспечен режим минимальных искажений.

Строго говоря, $U_{вх м}$ необходимо определять по семейству входных характеристик. Но так как входные характеристики при различных значениях напряжения $U_{кэ}$ отличаются незначительно, на практике пользуются входной характеристикой, соответствующей среднему значению $U_{кэ} = U_{кэ 0}$.