

4.2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

К основным техническим показателям и характеристикам электронных усилителей относятся: коэффициент усиления, амплитудно-частотная, фазочастотная, амплитудная и переходная характеристики, линейные и нелинейные искажения, динамический диапазон, входное и выходное сопротивления, коэффициент полезного действия, выходная полезная мощность и некоторые другие.

Коэффициент усиления определяется как отношение сигнала на выходе усилителя к сигналу на его входе. Различают коэффициенты усиления напряжения K_u , тока K_i и мощности K_p . Коэффициент усиления может быть выражен в отвлеченных или логарифмических единицах. В отвлеченных единицах

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad K_i = \frac{i_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}; \quad K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

В этих выражениях комплексные амплитуды i , U отражают переменные составляющие токов и напряжений на входе и выходе усилителя.

Коэффициент усиления в логарифмических единицах (децибелах — дБ) связан с коэффициентом усиления в отвлеченных единицах выражениями:

$$K_{u, \text{дБ}} = 20 \lg K_u; \quad K_{i, \text{дБ}} = 20 \lg K_i; \quad K_{p, \text{дБ}} = 10 \lg K_p.$$

В многок
$$K = K_1 K_2 \cdot \dots \cdot K_n = \prod_{j=1}^n K_j$$

$$K_{\text{дБ}} = K_{1, \text{дБ}} + K_{2, \text{дБ}} + \dots + K_{n, \text{дБ}} = \sum_{j=1}^n K_{j, \text{дБ}},$$

или

$$K_{\text{дБ}} = K_{1, \text{дБ}} + K_{2, \text{дБ}} + \dots + K_{n, \text{дБ}} = \sum_{j=1}^n K_{j, \text{дБ}},$$

где n — число каскадов усиления; K , K_j — модули коэффициентов усиления.

Выражение коэффициента усиления в децибелах вызвано особенностями нашего слуха, воспринимающего изменение громкости пропорционально логарифму изменения силы (амплитуды) звуковых колебаний.

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость модуля коэффициента усиления напряжения усилителя от частоты. Типовая АЧХ показана на рис. 4.2, а кривой 2. Прямая / на этом

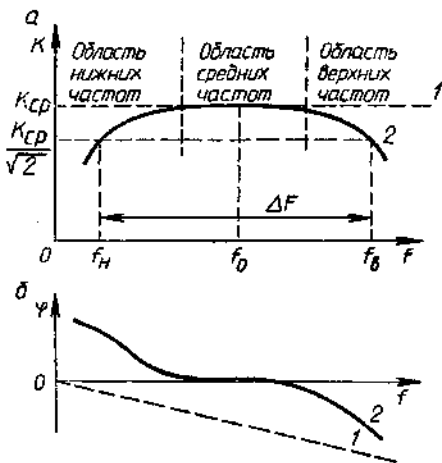


Рис. 4.2. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики усилителя

рисунке соответствует АЧХ идеального усилителя, в котором отсутствуют линейные искажения.

Частоты f_H и f_B , на которых модуль коэффициента усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, называются соответственно нижней и верхней граничными частотами. Интервал частот, заключенный между f_H и f_B , называется полосой пропускания ΔF усилителя.

Область АЧХ, в которой коэффициент усиления не зависит от частоты, т. е. является вещественной величиной, называют областью средних частот. Коэффициент усиления в области средних частот $K_{ср}$ определяет номинальный коэффициент усиления усилителя. Обычно $K_{ср}$ соответствует средней частоте f_0 полосы пропускания.

Изменения коэффициента усиления в области нижних и верхних частот определяются частотными искажениями сигнала. Количественно эти искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M(\omega) = \frac{K_{ср}}{K(\omega)}, \quad (4.1)$$

где $K(\omega)$ — модуль коэффициента усиления усилителя на некоторой частоте, лежащей за пределами области средних частот.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) — это зависимость фазового сдвига между выходным и входным напряжениями от частоты при действии на

входе гармонического напряжения (тока). Появление фазового сдвига между выходным и входным напряжениями в идеальном усилителе объясняется задержкой сигнала в усилителе на некоторое время t_3 . За это время фаза входного напряжения, выраженная в радианах, изменится на ωt_3 , или $n2\pi f t_3$. Вследствие этого уравнение ФЧХ имеет вид

$$\varphi(\omega) = -\omega t_3 = -2\pi f t_3. \quad (4.2)$$

Знак «минус» в этом уравнении отображает отставание по фазе выходного напряжения по сравнению с входным. Графически уравнение (4.2) представляет прямую линию, исходящую из начала координат (прямая 1 на рис. 4.2, б). Реальная ФЧХ (кривая 2 на рис. 4.2, б) отличается от идеальной. Это означает, что различные спектральные составляющие входного сигнала задерживаются усилителем на различное время. Отличия реальной ФЧХ от идеальной характеризуют фазочастотные искажения в усилителе.

Человеческое ухо почти не реагирует на фазовые сдвиги гармонических составляющих сигналов. Поэтому при проектировании усилителей, предназначенных для воспроизведения речи и музыки (УЗЧ), фазовые искажения не нормируются и не учитываются. Но в усилителях импульсных сигналов фазовые искажения могут существенно изменять форму сложного сигнала. Поэтому в таких усилителях к фазовым сдвигам предъявляются жесткие требования.

Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды (или действующего значения) первой гармоники выходного напряжения или тока от амплитуды (или действующего значения) гармонического входного напряжения или тока. Идеальная амплитудная характеристика выражается уравнением $U_{\text{вых}} = K_u U_{\text{вх}}$ и является линейной (прямая 1 на рис. 4.3, а). Реальная амплитудная характеристика отличается от идеальной (кривая 2 на рис. 4.3, а). Линейной оказывается лишь часть амплитудной характеристики (участок АВ на рис. 4.3, а). Шумы в усилителе и другие помехи приводят к тому, что при $U_{\text{вх}} = 0$ на выходе усилителя имеется некоторое напряжение. При $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх max}}$ пропорциональность между входным и выходным напряжениями нарушается из-за нелинейности характеристик активных элементов усилителя.

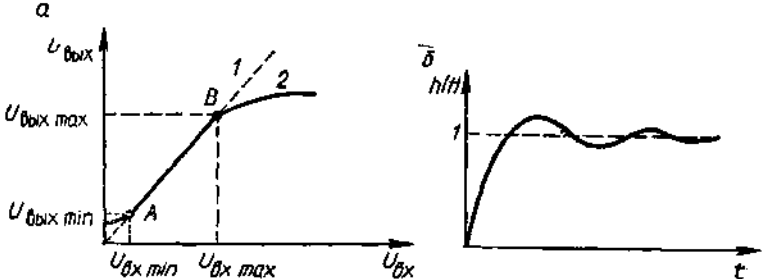


Рис. 4.3. Амплитудная (а) и переходная (б) характеристики усилителя

Переходной характеристикой усилителя называется зависимость выходного напряжения (тока) от времени при ступенчатом изменении напряжения (тока) на входе.

На практике используются *нормированные переходные характеристики* $h(t)$ (рис. 4.3, б), представляющие собой отношение мгновенных значений напряжения или тока на выходе усилителя к их значениям в установившемся режиме:

$$h(t) = \frac{u_{\text{вых}}(t)}{U_{\text{вых.уст}}} \quad \text{или} \quad h(t) = \frac{i_{\text{вых}}(t)}{I_{\text{вых.уст}}}$$

При ступенчатой форме входного воздействия переходный процесс проявляется наиболее ярко и выражения, описывающие этот процесс, получаются самыми простыми.

Усиление сигнала почти неизбежно сопровождается его искажением. Искажения бывают линейные и нелинейные. Линейные искажения — это искажения, обусловленные зависимостью параметров усилителя от частоты и не зависящие от амплитуды входного сигнала. Они подразделяются на частотные, фазовые и переходные.

Искажения, обусловленные зависимостью коэффициента усиления усилителя от амплитуды усиливаемого сигнала, называются нелинейными. Нелинейные искажения вызваны нелинейностью вольт-амперных характеристик активных элементов усилителя (ЭУЛ, транзисторов и др.).

Нелинейные искажения при усилении гармонических сигналов оцениваются коэффициентом гармоник K_r . *Коэффициент гармоник* определяется как отношение среднеквадратичной суммы напряжений или токов высших гармоник, появившихся в выходном сигнале вследствие нелинейных искажений, к напряжению или току первой

гармоники. Чаще всего при расчетах K_r используются амплитудными значениями напряжения. В этом случае

$$K_r = \frac{\sqrt{U_{m \text{ вых. } 1j}^2 + U_{m \text{ вых. } 3j}^2 + \dots}}{U_{m \text{ вых. } j}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_{m \text{ вых. } kj}^2}}{U_{m \text{ вых. } j}}. \quad (4.3)$$

Человеческое ухо очень чувствительно к появлению новых гармоник в звуковых колебаниях. Поэтому в усилителях звуковой частоты высокого качества $K_r \leq (1 \dots 2) \%$, а среднего качества — $K_r \leq (5 \dots 7) \%$.

Оценка нелинейных искажений в импульсных усилителях производится иначе и зависит от формы усиливаемых импульсов.

Искажения в многокаскадных усилителях зависят от искажений, вносимых каждым каскадом. При этом

$$M(\omega) = M_1(\omega) \cdot M_2(\omega) \dots M_n(\omega); \quad \varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \dots + \varphi_n(\omega); \quad K_r = K_{r1} + K_{r2} + \dots + K_{rn}.$$

Динамический диапазон усилителя D_y представляет собой выраженное в децибелах отношение номинального выходного напряжения, при котором нелинейные искажения не превышают допустимых значений, к минимальному значению выходного напряжения, ограниченному уровнем шумов и помех в усилителе, т. е.

$$D_y = 20 \lg \frac{U_{\text{вых. ном.}}}{U_{\text{вых. мин.}}}$$

Пределы изменений ЭДС источника сигнала от $e_{\text{ист. мин}}$ до $e_{\text{вх. макс}}$ определяют динамический диапазон сигнала:

$$D_c = 20 \lg \frac{e_{\text{вх. макс.}}}{e_{\text{вх. мин.}}}$$

Чтобы во всем диапазоне изменений ЭДС источника сигнала нелинейные искажения усилителя не превышали допустимых и обеспечивалась необходимая помехозащищенность, должно быть выполнено условие $D_y \geq D_c$. Если это условие не выполняется, необходимо либо увеличить D_y (взяв, например, активный элемент с более линейной характеристикой), либо уменьшить D_c .

Для источника сигнала усилитель представляет собой

эквивалентное сопротивление, определяющее его входное сопротивление:

$$r_{вх} = \frac{dU_{вх}}{di_{вх}} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}.$$

Относительно нагрузки усилитель можно рассматривать как генератор напряжения с внутренним сопротивлением

$$r_{вых} = \frac{U_{вых, к.к.}}{I_{вых, к.к.}}$$

Для усилителей средней и особенно большой мощности важным показателем является коэффициент полезного действия. КПД определяется как отношение выходной полезной мощности $P_{вых}$, выделяемой в нагрузку, к общей мощности P_0 , потребляемой усилителем от источников питания, т. е.

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_0},$$

В свою очередь выходная полезная мощность при активной нагрузке определяется выражением

$$P_{вых} = \frac{U_{н, вых}^2}{2R_{н}}$$

Выходная мощность усилителя может быть от сотых долей ватта до сотен ватт. Максимальная мощность, которая создается на выходе усилителя при заданном значении нелинейных искажений, называется номинальной.

Наименьшее значение напряжения (или тока) на входе усилителя, при котором на выходе усилителя создается номинальная мощность, называется чувствительностью усилителя.

Для получения требуемых технических показателей и характеристик при проектировании усилителей широко используются обратные связи.