

1. Классификация и основные характеристики усилителей. Частотные характеристики усилительных устройств.

Усилителем называют устройство, предназначенное для усиления входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Таким образом, для обеспечения усиления сигнала усилитель (У), последовательно с которым соединен источник питания Еп, должен включать в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом U_1 . К входной (управляющей) цепи усилителя подключен источник Ес усиливаемого сигнала (при этом \underline{Z}_c — комплексное значение внутреннего сопротивления источника), а к выходной — нагрузочное устройство с сопротивлением \underline{Z}_n (рис. 5.1).

Как видно, действие усилителя заключается в обеспечении условий, при которых маломощный сигнал U_1 управляет изменением существенно большего выходного напряжения U_2 , обусловленного наличием в выходной цепи источника питания Еп

Транзистор в аналоговых усилительных устройствах выполняет роль управляемого сопротивления (\underline{Z}_{yc} на рис. 5.2).

Управляемые нелинейные элементы современных усилителей выполняются, как правило, с использованием биполярных и полевых транзисторов (см. гл. 2). Поэтому их часто называют транзисторными усилителями.

Связь выходного напряжения с параметрами используемых элементов описывается соответственно выражениями:

$$\dot{U}_2 = \frac{E_n \underline{Z}_n}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{yc}};$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_n}{1 + \underline{Z}_{n2} (1/\underline{Z}_{yc} + 1/\underline{Z}_n)};$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_n}{1 + \underline{Z}_{yc} (1/\underline{Z}_{n2} + 1/\underline{Z}_n)}.$$

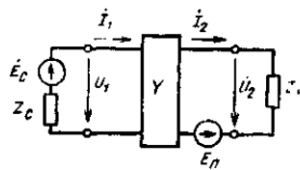


Рис. 5.1. Обобщенная структурная схема усилительного устройства

В зависимости от того, совпадает ли фаза выходного сигнала усилителя с фазой его входного сигнала или она сдвинута на 180° , усилители подразделяют соответственно на неинвертирующие и инвертирующие.

Классификация усилителей. По виду усиливаемого сигнала они делятся на усилители гармонических и импульсных сигналов. По типу усиливаемой величины их делят на усилители напряжения, тока и мощности. По диапазону усиливаемых частот различают усилители постоянного тока и усилители переменного тока. По виду соединительных цепей усилительных каскадов. Так как усилительные устройства строятся, как правило, на основе последовательного включения нескольких типовых каскадов, то различают усилители с гальванической (непосредственной) связью, предусматривающие передачу между каскадами сигнала как переменного, так и постоянного токов; усилители с RC-связями, в которых между выходом предыдущего и входом последующего каскадов включают резистивно-емкостную цепь, исключающую передачу сигналов постоянной частоты; усилители с индуктивной (трансформаторной) связью, в которых между каскадами включается трансформатор.

По виду нагрузки различают усилители с активной, индуктивной и емкостной нагрузкой.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Коэффициент усиления — отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

по напряжению $K_U = \Delta U_2 / \Delta U_1$;

по току $K_I = \Delta I_2 / \Delta I_1$;

по мощности $K_P = \Delta P_2 / \Delta P_1$,

где U_1, U_2, I_1, I_2 — действующие напряжения и токи.

Так как $\Delta P_1 = \Delta U_1 \Delta I_1$ и $\Delta P_2 = \Delta U_2 \Delta I_2$, то коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U K_I$.

При каскадном соединении нескольких усилительных устройств произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы, т. е.

$$K_{общ} = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (5.1)$$

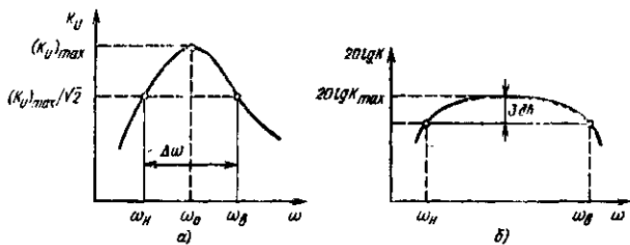


Рис. 5.4. Амплитудно-частотная (а) и логарифмическая амплитудно-частотная (б) характеристики усилительного устройства

Полоса пропускания усилителя — диапазон рабочих частот $\Delta\omega$ в пределах которого коэффициент усиления не снижается ниже значения $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ от своего максимального значения K_{\max} . Зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя. Пример АЧХ показан на рис. 5.4, а. Если восстановить перпендикуляр из точки на оси абсцисс, соответствующей значению $K_{\max}/\sqrt{2}$, до пересечения с АЧХ, то не представляет труда графическим путем определить полосу пропускания усилителя. Проекция на ось абсцисс первой точки пересечения соответствует нижней (ω_H), а второй — верхней (ω_B) частотам пропускания усилителя. Тогда полоса пропускания

$$\Delta\omega = \omega_B - \omega_H.$$

Если коэффициент усиления измеряется в децибелах, то значениям граничных частот усиления ω_H и ω_B соответствует уменьшение коэффициента усиления на 3 дБ (рис. 5.4, б).

$$R_{\text{вх}} = R_1 = (U_1/I_1)_{R_n = \text{const}};$$

$$R_{\text{вых}} = R_2 = (U_{\text{вых}} - U_{\text{вых0}})/I_{\text{вых}} = U_{2x}/I_{2k},$$

где U_{2x} — напряжение холостого хода на выходе усилителя ($R_n = \infty$); I_{2k} — ток короткого замыкания ($R_n = 0$).

Выходная мощность усилителя — это та часть мощности, которая может быть выделена в нагрузочном устройстве. В случае активной нагрузки она равна

$$P_{\text{вых}} = P_2 = I_2^2 R_n = U_{2x}^2 G_n,$$

где $G_n = 1/R_n$ — проводимость нагрузочного устройства.

Искажение сигналов в усилителе связано, во-первых, с нелинейной зависимостью выходного сигнала от входного, обусловленной нелинейностью статических ВАХ применяемых элементов, и, во-вторых, с частотной зависимостью амплитуды и фазы усиливаемого сигнала.

Для количественной оценки нелинейных искажений служит коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) K_n , в основу расчета которого положена оценка относительной величины высших гармоник к основной в выходном сигнале, т. е.

$$K_n = \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}/A_1, \quad (5.5)$$

где $A_2 \dots A_n$ — действующие значения высших гармоник выходного сигнала, начиная со второй; A_1 — действующее значение первой (основной) гармоники выходного сигнала.

Частотные характеристики усилительных устройств.

Количественно частотные искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений M , численно равным отношению коэффициента усиления в области средних частот для амплитудно-частотной характеристики к коэффициенту усиления на заданной частоте

$$M = K_U(\omega_{cp})/K_U(\omega).$$

2. Полевые транзисторы

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал, и управляемым электрическим полем.

Основным способом движения носителей заряда, образующих ток полевого транзистора, является их дрейф в электрическом поле. Проводящий слой, в

котором создается рабочий ток полевого транзистора, называют каналом. Полевой транзистор — полупроводниковый усилительный прибор, которым управляет напряжение (электрическое поле, отсюда и название — полевой).

Металлический электрод, создающий эффект поля, называют затвором (З), два других электрода — истоком (И) и стоком (С). Различают три схемы включения полевого транзистора: с общим истоком (ОИ), с общим затвором (ОЗ) и общим стоком (ОС). Наибольшее распространение на практике нашла схема с ОИ.

Полевые транзисторы делятся на:

-Транзисторы с управляющим р-п переходом

-Транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы)

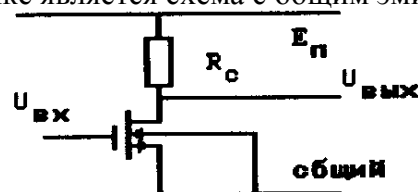
-МДП-транзисторы с индуцированным каналом

-МДП-транзисторы со встроенным каналом

Схемы включения

Схема с общим истоком (ОИ)

Полевые транзисторы чаще всего используются в схемах с заземленным (общим) истоком. Эти схемы характерны высоким входным импедансом и коэффициентом усиления по напряжению больше единицы. Аналогом этой схемы в биполярной схемотехнике является схема с общим эмиттером.



Статический коэффициент усиления определяем из эквивалентной схемы с ОИ

$$k_u = -\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = -\frac{I_c R_c \parallel r_{cн}}{U_{3и}} = -\frac{g U_{3и} R_c \parallel r_{cн}}{U_{3и}} = -g R_c \parallel r_{cн}$$

где g — крутизна усиления полевого транзистора

$$g = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{3и}}.$$

Коэффициент усиления по переменному току

$$k_u(\omega) = -\frac{g - j\omega C_{3с}}{1/R_c + 1/r_{cн} + j\omega(C_{cн} + C_{3с})}$$

Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}}(\omega) = \frac{1}{j\omega[C_{3и} + C_{3с}(1 - k_u(\omega))]} \\ R_{\text{вх}}(0) \approx 0.$$

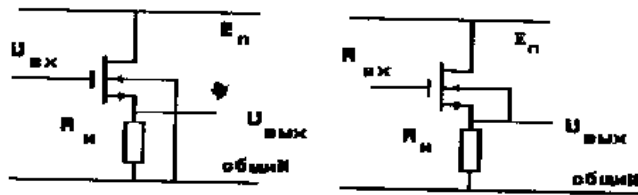
Выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_c r_{cн}}{R_c + r_{cн}} \approx R_c.$$

Схема включения с общим стоком (источковый повторитель)

В этой схеме входной импеданс, выше чем в схеме с ОИ. Выходной импеданс низкий, а

инвертирования нет. Коэффициент усиления по напряжению всегда меньше единицы. Коэффициент усиления по мощности может быть достаточно большим. Истоковый повторитель (рис. 3.11) используется в тех случаях, когда требуется малая входная емкость, в случае необходимости преобразования импедансов или для работы с большими входными сигналами.



а) включение подложки на общий провод,
б) включение подложки на выход.

В этом включении рабочая точка транзистора никогда не попадает в крутую область стоковых характеристик.

$$(U_{сн} = E_{п} - U_{вых} \geq U_{вх} - U_{вых}).$$

$$k_u = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{g_{зп} R_{и} \| r_{сн}}{U_{зп} + g_{зп} R_{зп} \| r_{сн}} = \frac{g R_{и} \| r_{сн}}{1 + g R_{и} \| r_{сн}} \approx 0.7 + 0.8,$$

$$k_u = \frac{g}{g + 1/R_{и} + 1/r_{сн}}.$$

или

Для истокового повторителя существенное значение имеет включение электрода подложки, поскольку крутизна управления полевым транзистором по подложке всего лишь 3—5 раз меньше крутизны управления по затвору. На рис. приведены два варианта включения электрода подложки.

А)
$$k_u(\omega) = \frac{g + j\omega C_{зп}}{1/R_{и} + 1/r_{сн} + g + g_{п} + j\omega(C_{зп} + C_{пн})},$$

Б)
$$k_u(\omega) = \frac{g + j\omega(C_{зп} + C_{пн})}{1/R_{и} + 1/r_{сн} + g + j\omega(C_{зп} + C_{пн} + C_{пс})},$$

Входные проводимости истокового повторителя

$$G_{вх} = j\omega(C_{зп} + C_{зп} + C_{зс}(1 - K_u(\omega)))$$

$$G_{вх} = j\omega(C_{зс} + C_{зп} + C_{зп} + C_{зс}(1 - K_u(\omega))).$$

На постоянном токе входные проводимости равны нулю.

Выходные проводимости рассматриваемых схем

$$G_{вых} = G_0 + g_{сн} + g + g_{п} + j\omega(C_{зс} + C_{пн})$$

$$G_{вых} = G_0 + g_{сн} + g + j\omega(C_{зс} + C_{пн} + C_{зп}),$$

где G_0 — стоковая проводимость ($1/R_c$), $g_{сн}$ — проводимость сток—исток. Так как обычно $g \ll g_{сн}$, то выходные проводимости на низких частотах равны

$$G_{вых} = G_0 + g + g_{п}$$

$$G_{вых} = G_0 + g.$$

Напряжение сдвига между входным и выходным напряжениями

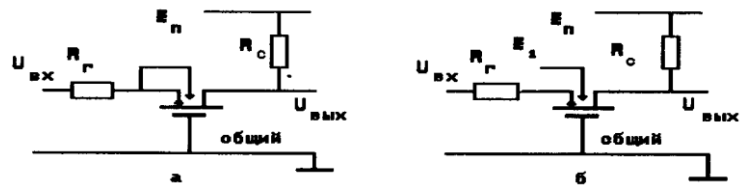
$$U_{сдв} = R_{и} \frac{g_0(U_{вх} - U_0)^2}{2}$$

Схема с общим затвором

Схема с ОЗ (рис.) обладает малым входным

сопротивлением, усилением по току равным единице

и в случае заземленной подложки — малой проходной (между входом выходом) емкостью (экранирование). Усиление по напряжению больше единицы.



а) включение подложки на выход,

б) включение подложки на источник напряжения смещения,

Если выходное сопротивление источника сигнала R_r равно нулю, коэффициенты усиления по напряжению для случаев (а) и (б) рисунка

$$k_u(\omega) = \frac{g + g_{сн} + j\omega C_{пс}}{g_{сн} + G_c + j\omega(C_{пн} + C_{зп})},$$

$$g_{сн} = 1/r_{сн} \quad G_c = 1/R_c,$$

$$k_u(\omega) = \frac{g + g_{п} + g_{сн}}{g_{сн} + G_c + j\omega(C_{пн} + C_{зп})}.$$

Входные проводимости.

$$G_{вх} = g - g_{сн}[k_u(\omega) - 1] + j\omega(C_{зп} + C_{пс} - [k_u(\omega) - 1]C_{пс}),$$

$$G_{вх} = g + g_{п} - g_{сн}[k_u(\omega) - 1] + j\omega(C_{зп} + C_{пс}).$$

Отрицательная обратная связь через емкость сток—подложка в схеме (а) делает эту схему менее предпочтительной для использования на высоких частотах (уменьшает коэффициент усиления на высоких частотах). При $R_r \neq 0$ коэффициенты усиления определяются подстановкой вышеприведенных выражений в соотношение

$$k_u(\omega) = \frac{k(\omega)|_{R_r=0}}{1 + R_r G_{вх}}.$$

Откуда для низких частот

$$k_u = \frac{g + g_{сн}}{g_{сн} + G_c + R_r(g_{сн} + G_c)} \quad (а)$$

$$k_u = \frac{g + g_{п} + g_{сн}}{g_{сн} + G_c + R_r G_c(g + g_{п} + g_{сн})} \quad (б)$$

коэффициенты усиления

$$k_u \approx g R_c$$

$$k_u \approx (g + g_{п}) R$$

входные проводимости

$$G_{вх} \approx g(1 - R_c g_{сн})$$

$$G_{вх} \approx (g + g_{п})(1 - R_c g_{сн})$$

3. Мультивибраторы. Принципы их функционирования

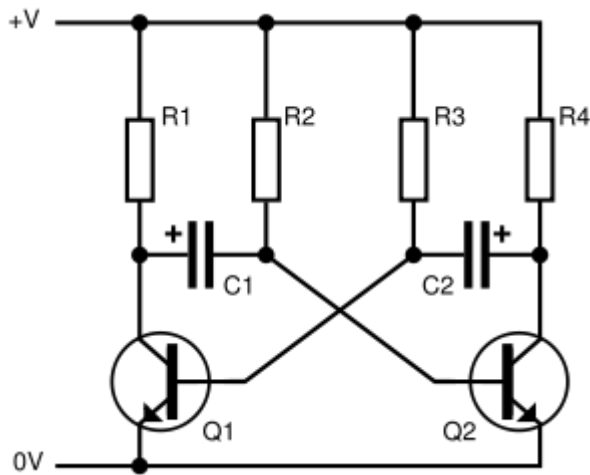
Мультивибратор — релаксационный генератор импульсов почти прямоугольной формы,

выполненный в виде усилительного устройства с

цепью положительной обратной связи. Различают

два вида мультивибраторов автоколебательные (не обладают состоянием устойчивого равновесия) и

жающие (обладают одним состоянием устойчивого равновесия и поэтому часто называются мультивибраторы).



Принцип функционирования мультивибраторов рассмотрим на примере схемы с коллекторно-базовыми связями. Схема фактически повторяет схему симметричного триггера. Отличие состоит в том, что связи между схемами коммутации, как прямая, так и обратная, выполнены не по постоянному, а по переменному току. Это качественно меняет свойства устройства, так как в отличие от симметричного триггера у схемы нет устойчивых состояний равновесия, в которых она находится сколь угодно длительное время. Вместо этого существуют два состояния квазиустойчивого равновесия, в каждом из которых схема может находиться строго фиксированное время. Это время зависит от переходных процессов, протекающих в схеме. Длительность одной из двух частей периода равна $t = \ln(2)RC$. Длительность периода из двух частей равна: $T = t_1 + t_2 = \ln(2) \cdot R_2 \cdot C_1 + \ln(2) \cdot R_3 \cdot C_2$. Поэтому в состоянии квазиустойчивого равновесия токи и напряжения элементов схемы в общем случае не остаются постоянными. Работа устройства сводится к постоянной смене этих состояний, что сопровождается формированием на выходе напряжения, близкого по форме к прямоугольному.