

Лекция 5. Элементы аналоговых устройств

5.1 Общие сведения

5.2 Усилители

5.3 Фильтры

5.4 Электронные регуляторы и аналоговые ключи

5.5 Импульсные устройства

5.1. Общие сведения

Аналоговыми называются устройства, у которых сигналы являются непрерывными функциями времени. К основным классам аналоговых устройств относятся: усилители, генераторы, фильтры, электронные регуляторы, аналоговые перемножители напряжений, преобразователи, вторичные источники питания [1,3,4].

В зависимости от конкретной области применения аналоговые устройства подразделяются на измерительные, телевизионные, радиоприемные, телефонные, радиовещательные и др. Дополнительными признаками для классификации являются диапазон рабочих частот и потребляемая мощность. В зависимости от массы и объема аналоговые устройства подразделяются на носимые, бортовые и стационарные. В зависимости от используемой элементной базы аналоговые устройства подразделяются на электровакуумные, транзисторные и интегральные. Наиболее перспективными являются интегральные аналоговые устройства, обладающие высокой надежностью, экономичностью, малой массой и объемом.

5.2. Усилители

Основные понятия

Важным назначением электронных приборов является усиление электрических сигналов. Устройства для решения этой задачи называются усилителями.

Структурная схема усилителя имеет вид в соответствии с рис. 5.1.

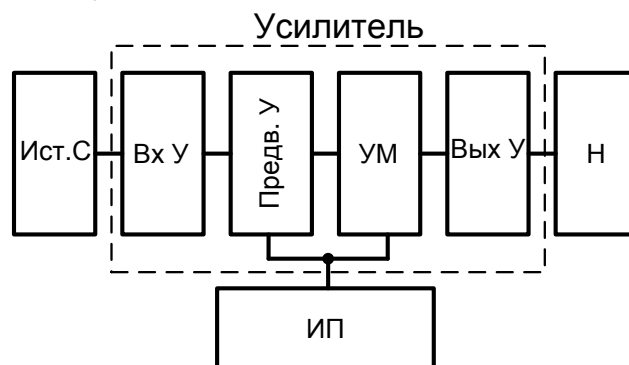


Рис. 5.1. Структурная схема усилителя

Устройство содержит входное устройство (Вх. У) для передачи сигнала от источника сигнала (Ист. С) ко входу первого каскада (предварительного усилителя). Его применяют, когда непосредственное подключение источника сигнала ко входу усилителя невозможно или нецелесообразно. Обычно входное устройство выполняется в виде трансформатора или RC-цепочки, предотвращающих прохождение постоянной составляющей тока от источника к усилителю, или наоборот.

Предварительный усилитель (Предв. У) состоит из одного или нескольких каскадов усиления. Он служит для усиления входного сигнала до величины, достаточной для работы усилителя мощности. Наиболее часто в качестве предварительных усилителей используют усилители напряжения на транзисторах. Усилитель мощности (УМ) служит для отдачи в нагрузку необходимой мощности сигнала. В зависимости от отдаваемой мощности он содержит один или несколько каскадов усиления. Выходное устройство (Вых. У) используется для передачи усиленного сигнала из выходной цепи усилителя мощности в нагрузку (Н). Оно применяется в тех случаях, когда непосредственное подключение нагрузки к усилителю мощности невозможно или нецелесообразно. Роль выходного устройства могут выполнять разделительный конденсатор или трансформатор, не пропускающие постоянную составляющую тока с выхода усилителя в нагрузку. При использовании трансформатора добиваются согласования сопротивления выхода усилителя и нагрузки с целью достижения максимальных значений КПД и малых нелинейных искажений. В усилителях на основе интегральных схем избегают применения трансформаторов вследствие их больших габаритных размеров и технологических трудностей изготовления.

Источник питания (ИП) обеспечивает питание активных элементов усилителя.

Основными признаками для классификации усилителей являются диапазон рабочих частот и параметры, характеризующие его усилительные способности: напряжение, ток, мощность на выходе. Важнейшими техническими показателями усилителя являются: коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления, диапазон усиливаемых частот, динамический диапазон, нелинейные, частотные и фазовые искажения. Усилители мощности характеризуются выходной мощностью и КПД.

Для реализации высоких значений коэффициента усиления используют последовательное включение нескольких каскадов. Для многокаскадных усилителей (содержащих n каскадов) общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$K = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (5.1)$$

Первый каскад определяет входное сопротивление усилителя R_{BX}

$$R_{BX} = U_{BX} / I_{BX}. \quad (5.2)$$

Если этот каскад работает при слабых входных сигналах, то к нему предъявляются жесткие требования по уровню собственных шумов.

Выходной каскад усилителя обычно является усилителем мощности. Он характеризуется выходным сопротивлением $R_{ВЫХ} = U_{ВЫХ} / I_{ВЫХ}$. Важным показателем является полезная мощность $P_{ПОЛ}$ в нагрузке R_H

$$P_{ПОЛ} = U_{ВЫХ}^2 / R_H = I_{ВЫХ}^2 R_H, \quad (5.3)$$

где $U_{ВЫХ}$ и $I_{ВЫХ}$ – действующие значения выходного напряжения и тока соответственно.

Коэффициент полезного действия η , % определяется отношением полезной мощности в нагрузке $P_{ПОЛ}$ к мощности, потребляемой усилителем от всех источников питания $P_{ПОТ}$, %

$$\eta = \frac{P_{ПОЛ}}{P_{ПОТ}} 100. \quad (5.4)$$

При больших амплитудах сигналов из-за нелинейности характеристик усилительных элементов возникают нелинейные искажения. Поэтому в практике используют понятие номинальной выходной мощности – максимальной мощности при искажениях, не превышающих допустимое значение. Степень нелинейных искажений усилителя оценивают величиной коэффициента гармоник K_G , %

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100, \quad (5.5)$$

где U_2, U_3, U_n – действующие значения напряжений гармоник, возникших в результате нелинейного усиления; U_1 – действующее напряжение первой гармоники.

Общая величина коэффициента гармоник $K_{Г ОБЩ}$ многокаскадного усилителя зависит от нелинейных искажений, вносимых отдельными каскадами, и определяется по формуле

$$K_{Г ОБЩ} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}. \quad (5.6)$$

В электросвязи нелинейность усилителей принято оценивать затуханием нелинейности A в децибелах:

$$A = 20 \lg(U_1 / \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}). \quad (5.7)$$

Наличие в усилителях реактивных элементов (емкостей и индуктивностей) приводит к возникновению частотных искажений и не позволяет получить постоянный коэффициент усиления в широкой полосе частот. Примерный вид АЧХ усилителя имеет вид в соответствии с рис. 5.2, а.

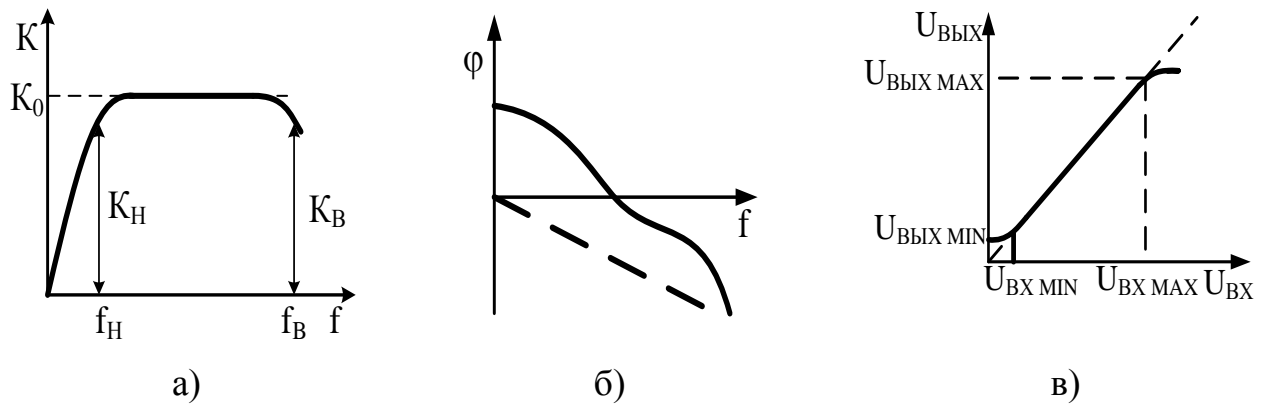


Рис. 5.2. Характеристики усилителя: а) АЧХ; б) ФЧХ; в) амплитудная

Степень искажений на отдельных частотах оценивается коэффициентом частотных искажений M , равным отношению коэффициента усиления K_0 на средней частоте f_0 к коэффициенту усиления K_f на данной частоте f :

$$M = K_0 / K_f \quad (5.8)$$

Обычно наибольшие частотные искажения возникают на границах диапазона рабочих частот: нижней f_H и верхней f_B . Коэффициенты частотных искажений в этом случае $M_H = K_0 / K_H$, $M_B = K_0 / K_B$. Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов:

$$M_{(PA3)} = M_1 M_2 \dots M_n \quad (5.9)$$

Обычно коэффициент частотных искажений выражают в децибелах:

$$M_{(дБ)} = 20 \lg M_{(PA3)} = M_{1(дБ)} + M_{2(дБ)} + \dots + M_{n(дБ)} \quad (5.10)$$

Частотные искажения в усилителе сопровождаются появлением сдвига фаз между входным и выходным напряжениями, что приводит к фазовым искажениям. Фазовые искажения, вносимые усилителем, оцениваются по его ФЧХ (рис. 5.2, б). Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты [1,3].

Идеальная АЧХ представляет собой прямую, параллельную оси частот (штриховая линия на АЧХ рис. 5.2, а).

Идеальная ФЧХ – прямая, начинающаяся из начала координат (штриховая линия на рис. 5.2, б). Идеальная амплитудная характеристика усилителя показана штриховой линией на амплитудной характеристике (рис. 5.2, в). В реальных усилителях наблюдаются отклонения от идеальной характеристики при слабых и больших входных сигналах. В первом случае это объясняется наличием собственных шумов усилителя, во втором – ограниченностью линейного участка характеристик усилительных каскадов (обычно последнего).

Отношение амплитуд наиболее сильного и наиболее слабого сигнала на входе усилителя называют его динамическим диапазоном D , дБ:

$$D = 20 \lg (U_{BX \max} / U_{BX \min}) \quad (5.11)$$

В качестве базового узла предварительных усилителей наиболее широко применяется усилительный каскад на БТ, включенный по схеме с общим эмиттером.

Различные способы включения биполярных и полевых транзисторов в простейших схемах усилителей выполнены в соответствии с рис. 5.3 и рис. 5.4.

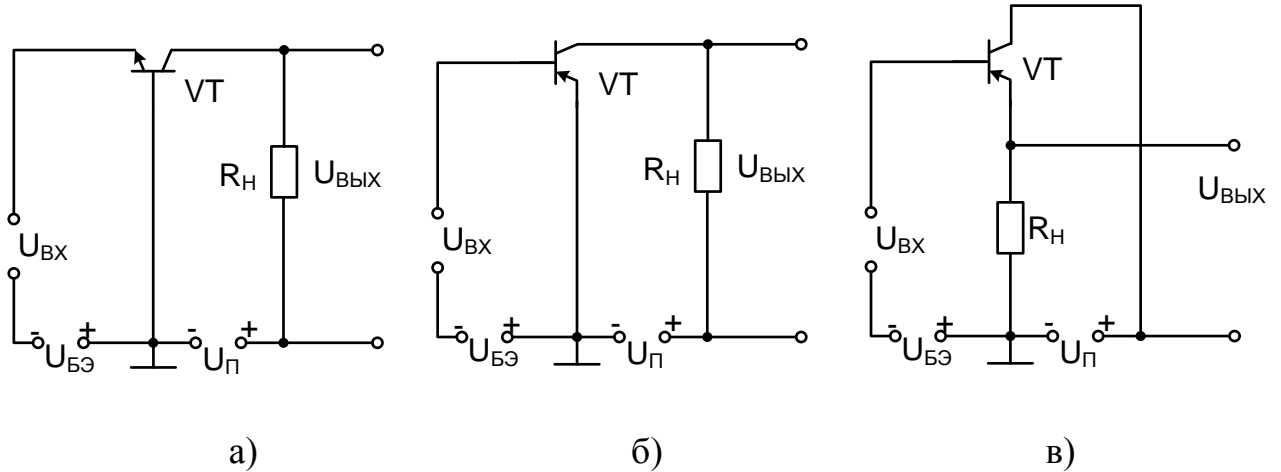


Рис. 5.3. Схемы включения БТ: а) с общей базой; б) с общим эмиттером; в) с общим коллектором

Основным показателем усилителей является коэффициент усиления по напряжению $K_U = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ}$. В усилителях на БТ обычно используют также коэффициенты усиления по току K_I и мощности K_P : $K_I = \Delta I_{ВЫХ} / \Delta I_{ВХ}$; $K_P = \Delta P_{ВЫХ} / \Delta P_{ВХ} = K_I \cdot K_U$. В низкочастотных усилителях на ПТ значения K_I и K_P очень велики, и их обычно не рассчитывают.

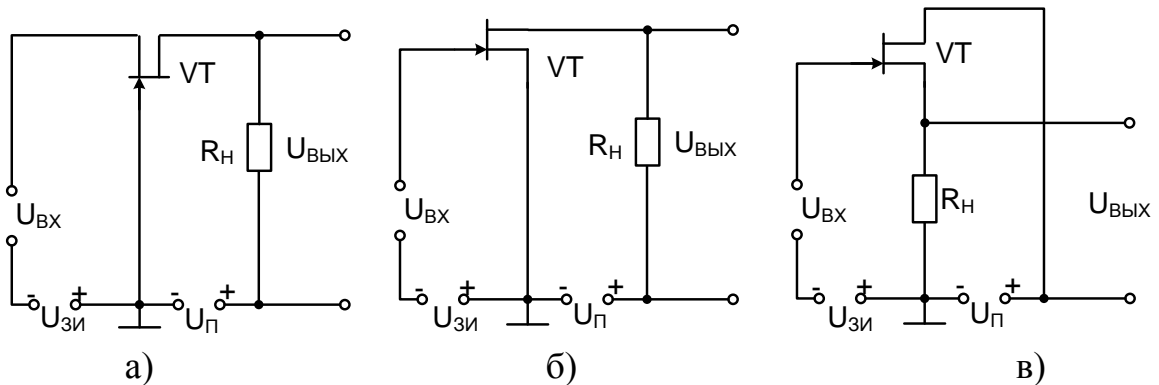


Рис. 5.4. Схемы включения ПТ: а) с общим затвором; б) с общим истоком; в) с общим стоком

Усилители на основе ПТ, включенных по схемам с общим истоком и общим стоком имеют чрезвычайно большое входное сопротивление при работе на постоянном токе и низких частотах.

При использовании сопротивлений нагрузки, существенно меньших выходного сопротивления транзистора, коэффициенты усиления по напряжению для схем с общим истоком и стоком определяются по формулам

$$K_{U \text{ ОИ}} = S \cdot R_H, \quad (5.12)$$

$$K_{U\text{ oc}} = S \cdot R_H / (1 + S \cdot R_H), \quad (5.13)$$

где S – крутизна транзистора в рабочей точке.

При включении транзистора по схеме с общим стоком усилитель выполняет функции повторителя напряжения и имеет низкое выходное сопротивление, близкое к значению $R_{BBLX} = 1/S$.

Усилитель на БТ, включенный по схеме с ОБ, имеет низкое входное сопротивление и коэффициент передачи тока меньше 1. Наилучшими усилительными свойствами обладают усилители с включением транзисторов по схемам с общим эмиттером и общим истоком. При включении БТ по схеме с общим коллектором усилитель работает как повторитель напряжения ($K_U \rightarrow 1$), имеет высокое входное и низкое выходное сопротивления.

Основные показатели усилителей на основе БТ сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Усилительные характеристики БТ для различных схем включения

| Схема включения | K_I | K_U | K_P |
|---------------------|---|---|--|
| С общей базой | $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} = \alpha$ | $\frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_{\mathcal{E}} \cdot R_{BK.B}} = \frac{\alpha \cdot R_H}{R_{BK.B}}$ | $\frac{\alpha^2 \cdot R_H}{R_{BK.B}}$ |
| С общим эмиттером | $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta$ | $\frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_B \cdot R_{BK.\mathcal{E}}} = \frac{\beta \cdot R_H}{R_{BK.\mathcal{E}}}$ | $\frac{\beta^2 \cdot R_H}{R_{BK.\mathcal{E}}}$ |
| С общим коллектором | $\frac{\Delta I_{\mathcal{E}}}{\Delta I_B} = \beta + 1$ | $\frac{\Delta I_{\mathcal{E}} \cdot R_H}{\Delta I_B \cdot R_{BK.K}} = (\beta + 1) \frac{R_H}{R_{BK.K}}$ | $(\beta + 1)^2 \frac{R_H}{R_{BK.K}}$ |

Интегральные операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют высококачественный интегральный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и однотактным выходом, предназначенным для работы в схемах с обратной связью. Название усилителя связано с первоначальным применением – выполнением различных математических операций с аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, логарифмирование, интегрирование, дифференцирование и др.). В настоящее время ОУ выполняют более ста функций в разнообразных устройствах. Они применяются для усиления, ограничения, перемножения, частотной фильтрации, генерирования сигналов в аналоговых и цифровых устройствах.

Условное графическое обозначение ОУ приведено на рис. 5.5, где наряду с инверсным (Вх 1) и прямым (Вх 2) входами и выходом используются также цепи частотной коррекции, и балансировки (FC , NC), и два источника питания: U_1 , у которого минус соединен с общим проводом, и U_2 , у которого на общем проводе плюс. Использование двух источников питания позволяет получить двухполярный сигнал на выходе [4].

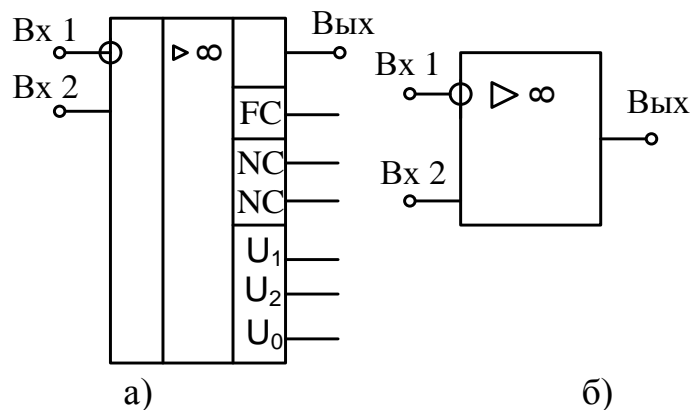
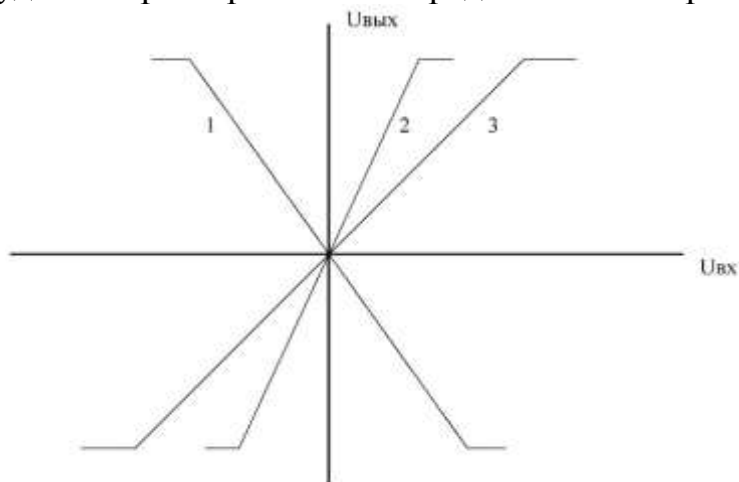


Рис. 5.5. Условные обозначения ОУ: а) полное; б) упрощенное

Для достаточной устойчивости и выполнения математических операций над сигналами с высокой точностью реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

- 1) высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и по постоянному;
- 2) малым напряжением смещения нуля;
- 3) малыми входными токами;
- 4) высоким входным и низким выходным сопротивлением;
- 5) высоким коэффициентом ослабления синфазной составляющей (КОСС);
- 6) амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот -20дБ/дек .

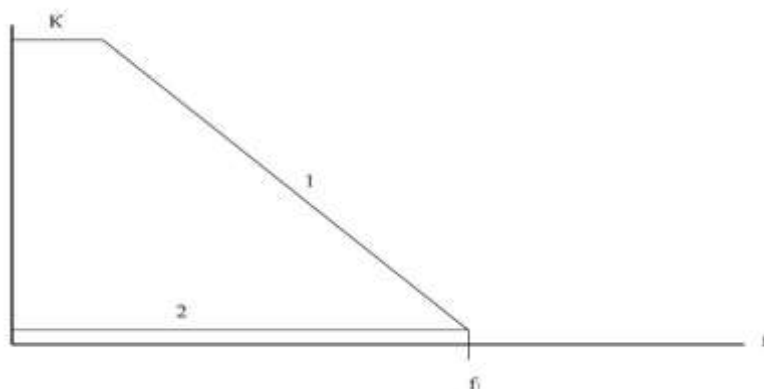
Виды амплитудных характеристик ОУ представлены на рисунке 5.6



- 1 – для инвертирующего усилителя;
- 2 – для неинвертирующего усилителя;
- 3 – для повторителя напряжения.

Рис.5.6. Амплитудные характеристики

Виды амплитудно-частотных характеристик представлены на рисунке 5.7



1 – для неинвертирующего усилителя;

2 – для повторителя напряжения

Рис.5.7. Амплитудно-частотные характеристики

Основные параметры ОУ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 - Основные параметры ОУ

| Параметр | Идеальный ОУ | Реальный ОУ |
|----------------------|--------------|-------------------------------------|
| K_U | ∞ | $(10-1000) \cdot 10^3$ |
| R_{BX} , кОм | ∞ | $10-10^3$ (БТ), 10^3-10^{12} (ПТ) |
| $R_{BЫX}$, Ом | 0 | 1-1000 |
| f_1 , МГц | ∞ | 0,1-100 |
| $K_{OC\ c\Phi}$, дБ | ∞ | 40-110 |

В данной таблице: K_U – коэффициент усиления ОУ $K_U = U_{BЫX} / (U_{BX2} - U_{BX1})$, R_{BX} – входное сопротивление (БТ – входной каскад выполнен на биполярных транзисторах, ПТ – а полевых транзисторах), $R_{BЫX}$ – выходное сопротивление, f_1 – частота единичного усиления, т.е. частота, на которой коэффициент усиления снижается до единицы, $K_{OC\ c\Phi}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{OC\ c\Phi} = K_U / K_{U\ c\Phi}$; $K_{U\ c\Phi} = U_{BЫX} / U_{BX\ c\Phi}$; $U_{BX\ c\Phi} = U_{BX1} = U_{BX2}$.

На практике ОУ обычно используют с цепями обратной связи (ОС). Под ОС понимают полную или частичную передачу сигнала с выхода усилителя на его вход в соответствии с рис. 5.8. Если сигнал ОС суммируется с входным сигналом – положительная ОС (ПОС), если вычитается из входного сигнала – отрицательная ОС (ООС).

В качестве цепей ОС используются пассивные цепи, коэффициенты преобразования и частотные характеристики которых существенно влияют на свойства усилителя.

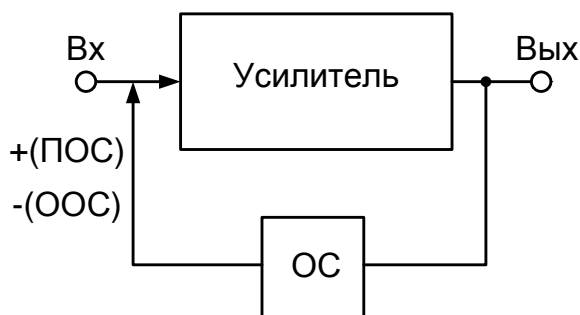


Рис.5.8. ОС в усилителе

ООС широко используют в усилителях на основе ОУ.

В зависимости от способа получения сигнала ОС различают: ОС по напряжению, по току и комбинированную. В зависимости от способа введения сигнала ОС во входную цепь различают: последовательную, параллельную и комбинированную. Последовательную ООС по напряжению и параллельную по току выполняют в соответствии с рис. 5.9.

Для количественной оценки ОС используют коэффициент β , который показывает, какая часть выходного сигнала поступает на вход усилителя.

Обратная связь оказывает влияние на все основные характеристики усилителя.

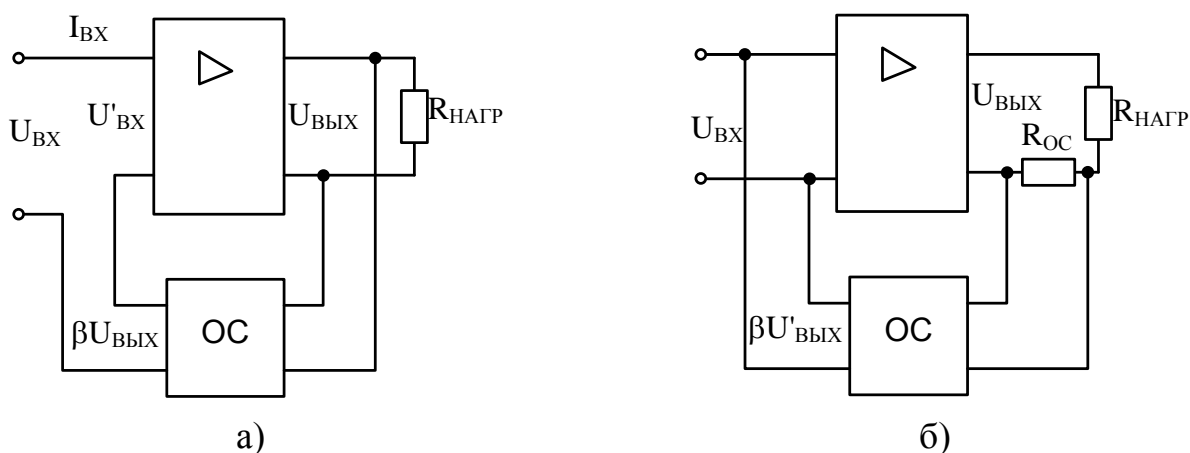


Рис. 5.9. Виды ОС: а) последовательная ООС по напряжению; б) параллельная ООС по току

5.3 Фильтры

В современных радиотехнических устройствах наблюдается тенденция широкого использования ИМС на основе полевых транзисторов (ПТ) для микромощных устройств, так как они потребляют значительно меньшую мощность в цепях смещения. Интерес представляет режим управляемого сопротивления при отсутствии источников питания стоковых цепей. Как известно, при малых напряжениях на стоке дифференциальное сопротивление сток-исток постоянно, и прибор можно представить в виде линейного резистора, сопротивление которого зависит от потенциала затвора [1,4].

Применение полевых транзисторов дает возможность конструировать активные фильтры с регулируемой частотой среза, резонанса, добротности.

Принципиальная схема фильтра нижних частот второго порядка с регулируемой частотой среза приведена на рис. 5.10.

В схеме резисторы заменены согласованными полевыми транзисторами с управляющим $p-n$ -переходом. Частота среза такого фильтра определяется по формуле

$$f_{CP} = \frac{1 - U_{УПР} / U_{ЗИ\ OTC}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot (R_{СИ})_{U_{ЗИ}=0}} \cdot \quad (5.14)$$

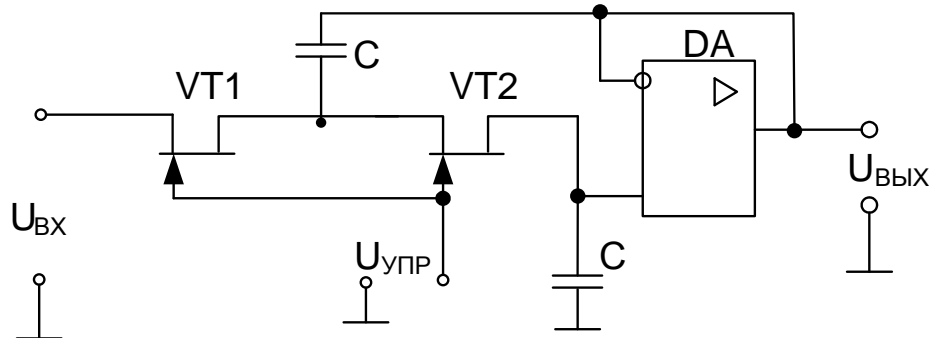


Рис. 5.10. Активный НЧ-фильтр с регулируемой частотой среза

Управлять частотой среза, не изменяя затухания, можно одновременным изменением сопротивлений сток-исток ПТ1 и ПТ2 так, чтобы $R_{СИ1} = R_{СИ2}$.

На рис. 5.11 изображена схема полосового высокодобротного фильтра. Если изменять сопротивления каналов транзисторов VT_1 и VT_2 , то можно регулировать резонансную частоту, которая определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_5}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_{СИ1} \cdot R_{СИ2}}} \cdot \quad (5.15)$$

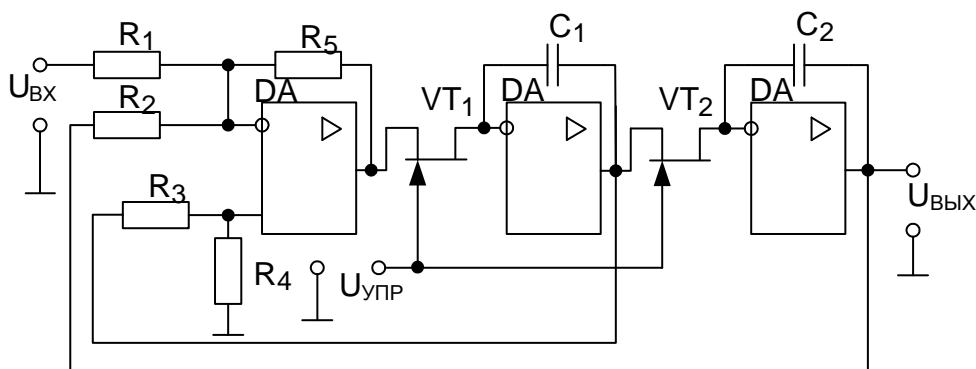


Рис. 5.11. Полосовой высокодобротный фильтр

При необходимости управлять добротностью активных фильтров можно заменить сопротивления R_2 и R_5 полевыми транзисторами. Добротность

регулируется изменением коэффициента усиления операционного усилителя, что достигается регулировкой глубины обратной связи.

5.4 Импульсные устройства

Общие сведения

Наряду с аналоговыми устройствами, в которых сигналы представляют собой непрерывные функции времени, широко распространены импульсные устройства, у которых сигналы являются дискретными функциями (кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой).

Импульсные устройства удобно классифицировать по форме используемых сигналов. В соответствии с рис. 5.12 формы основных типов импульсов имеют вид: прямоугольный, пилообразный, экспоненциальный, колоколообразный, ступенчатый, трапецеидальный, а также последовательность периодических импульсных и высокочастотных колебаний, называемых *радиоимпульсами*.

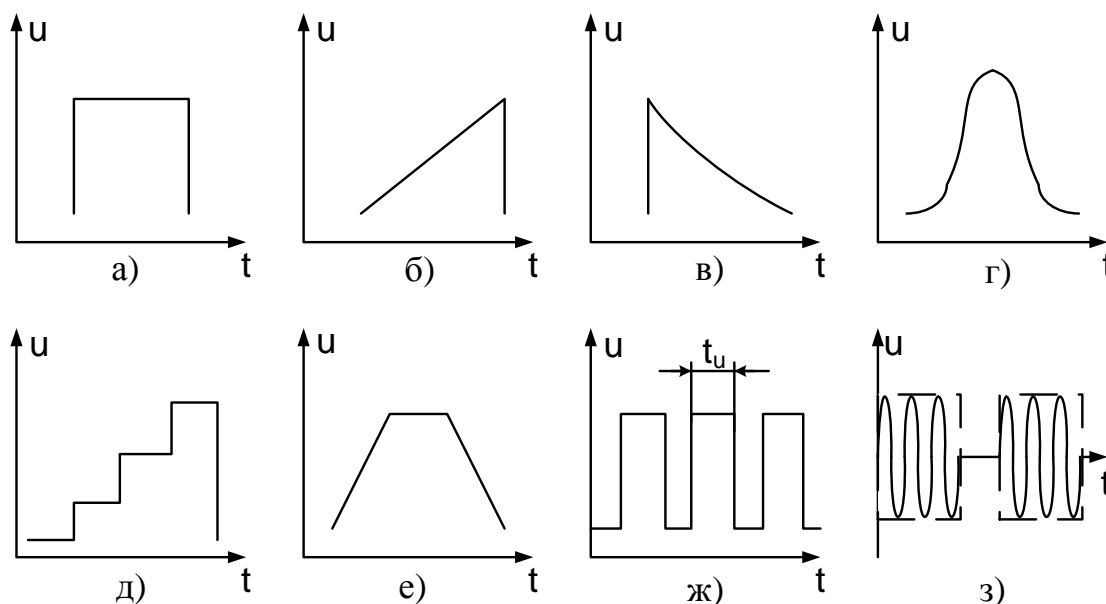


Рис. 5.12. Формы импульсов

Для усиления сигналов импульсной формы требуются широкополосные усилители (обозначаемые УК), повторители напряжения (УЕ) и специальные импульсные усилители (УИ).

Группа импульсных устройств, работающих с одиночными прямоугольными импульсами или с последовательностями прямоугольных импульсов, выделилась (в силу большой значимости в современной электронике) в самостоятельный класс цифровых устройств.

Импульсные устройства, как правило, используют ключевой режим работы транзисторов, в отличие от активного режима, используемого в аналоговых устройствах. Импульсный режим работы имеет ряд преимуществ перед активным режимом, что обеспечивает следующие достоинства импульсных устройств:

- в импульсном режиме достигается большая мощность во время действия импульсов при малом значении средней мощности устройства. Поэтому импульсные устройства обладают меньшими массой и габаритными размерами;
- при использовании импульсного режима может быть расширен температурный интервал работы полупроводниковых приборов и снижены требования к разбросу их параметров. Первое объясняется уменьшением энергии, выделяемой в полупроводниковых элементах устройства, второе – использованием ключевого режима. Разброс параметров может привести к некоторому искажению формы импульсов, однако это не является существенным, если в данном случае не искажается информация, заключенная в определенном сочетании импульсов. Указанная особенность объясняет повышенную помехоустойчивость импульсной электронной аппаратуры;
- для реализации импульсных устройств любой сложности требуются однотипные элементы, легко выполняемые методами интегральной технологии.

В аналоговых устройствах нередко используется режим малого сигнала, а устройства, в которых применяется такой режим работы, являются *линейными*. В линейных устройствах амплитуды переменных составляющих напряжений и токов существенно меньше значений постоянного тока и постоянного напряжения, используемых для установки режима транзисторов. При этом параметры усилительных приборов считают неизменными, так как используются линейные участки ВАХ.

На практике находят применение и устройства, работающие в режиме больших сигналов. В этих устройствах используется практически вся область ВАХ электронных приборов. При этом параметры приборов не остаются постоянными, а меняются в значительных пределах. Устройства, работающие в режиме больших сигналов, являются *нелинейными*. Простейшими, уже знакомыми примерами нелинейных устройств являются усилители мощности при больших амплитудах входного напряжения, а также электронные ключи цифровых сигналов.

Основными типами нелинейных устройств являются: ограничители, выпрямители, детекторы – устройства для выделения требуемого сигнала из сигнала более сложной формы, умножители частоты, преобразователи частоты, модуляторы.

Особую группу составляют устройства, у которых в процессе работы параметры меняются не только в зависимости от электрического режима, но и от времени. Такие устройства получили название *нелинейно-параметрических*.

К нелинейно-параметрическим относят устройства, использующие нелинейно-параметрические резисторы, емкости и индуктивности.

Общей отличительной особенностью нелинейных устройств является резкое отличие спектра выходного сигнала от спектра входного сигнала. Эта особенность позволяет решать задачи умножения, преобразования, модуляции и детектирования сигналов.