VITMO

Электронные усилители Обратные связи

Николаев Николай Анатольевич



Структура лекции:

- Определение обратной связи
- Классификация обратных связей







Обратной связью (ОС) называют передачу усиливаемого сигнала из выходной цепи усилителя во входную цепь.

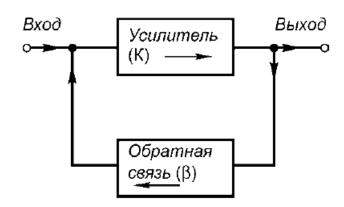


На рисунке показана структурная схема усилителя с обратной связью. Цепь обратной связи характеризуется коэффициентом передачи, или коэффициентом обратной связи, показывающим, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя.

Обратная связь может быть внутренней, паразитной и искусственной. <u>Внутренняя и паразитная обратные связи являются нежелательными</u>, и их пытаются устранить.

Искусственную ОС применяют с целью:

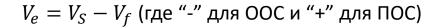
- 1) увеличить стабильность коэффициента усиления;
- 2) расширить диапазон усиливаемых частот;
- 3) уменьшить искажение, создаваемое усилителем;
- 4) управлять входным и выходным сопротивлением в нужном направлении.





Уравнение обратной связи

$$V_0 = A \cdot V_e$$



$$V_f = B \cdot V_0$$

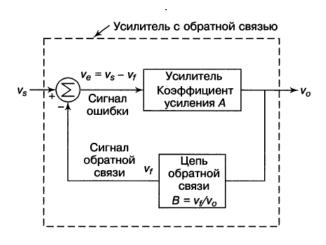
Для сигнала ООС имеем $V_e = V_S - B \cdot V_0$

Для выходного сигнала имеем $V_0 = A(V_S - B \cdot V_0)$

Таким образом коэффициент передачи усилителя с ООС

$$A_{FB} = \frac{V_0}{V_S} = \frac{A}{1 + A \cdot B}$$



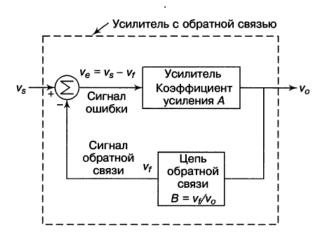


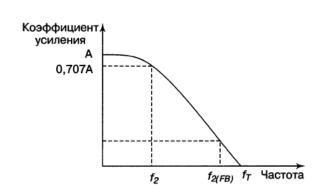


Коэффициент усиления усилителя с обратной связью можно сделать нечувствительным к изменению коэффициента усиления усилителя без ОС.

Если
$$A\cdot B\gg 1$$
, тогда $A_{FB}=rac{V_0}{V_S}=rac{A}{1+A\cdot B}pprox rac{A}{A\cdot B}pprox rac{1}{B}$

 f_T - частота, при которой коэффициент усиления снижается до единицы.







Снижение нелинейных искажений



Транзистор имеет нелинейные характеристики, что может вызвать нелинейные искажения формы сигнала.

Влияние нелинейностей в усилителе с ООС менее сильное по сравнению с усилителем без обратной связи.

Искажения D в усилителе без ОС определяются как

$$D=\frac{\Delta A}{A},$$

где ΔA — изменение коэффициента усиления; A — коэффициент усиления.

Примем
$$\frac{\Delta A}{A}=\frac{dA}{A}$$
, тогда $D=\frac{dA}{A}$.



Снижение нелинейных искажений



Аналогично для усилителя с ООС запишем

$$D_{(FB)} = \frac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}}.$$

Продифференцируем коэффициент передачи $A_{FB}=rac{V_0}{V_S}=rac{A}{1+A\cdot B}$ по А $dA_{FB}=rac{[(1+BA)dA-BAdA]}{(1+BA)^2},$ $dA_{FB}=rac{dA}{(1+BA)^2}$



Снижение нелинейных искажений



Перейдем к обычной форме записи $D_{(FB)}=rac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}}$

$$D_{(FB)} = \frac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}} = \left[\frac{dA}{(1+BA)^2}\right] \left[\frac{1+A\cdot B}{A}\right] = \frac{dA}{A} \left(\frac{1}{1+BA}\right)$$

Откуда

$$D_{(FB)} = \frac{D}{1 + BA}.$$

Последнее уравнение показывает, что искажения в усилителе с ООС снижаются в (1+BA) раз по сравнению с усилителем без ОС.



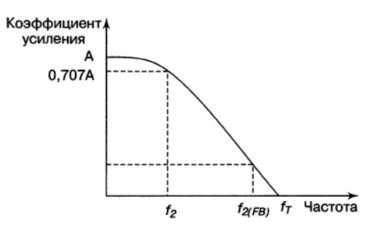
Расширение полосы пропускания



ООС препятствует всяким изменениям, в том числе и уменьшению коэффициента усиления вблизи граничной частоты (частоты среза). В результате ООС расширяет полосу пропускания.

Нижняя граничная частота $f_{1(FB)}=\frac{f_1}{(1+B\cdot A)}.$ Верхняя граничная частота $f_{2(FB)}=(1+B\cdot A)f_2.$

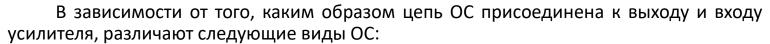
У большинства усилителей $f_{2(FB)}\gg f_{1(FB)}$, следовательно полоса пропускания $FB\approx f_{2(FB)}$.



Изменение граничных частот усилителя с ООС означает увеличение полосы пропускания.

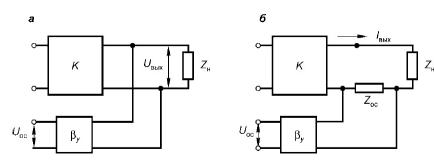


Классификация обратных связей





ОС по напряжению — где цепь ОС соединяют с выходом схемы параллельно нагрузке так, что напряжение ОС пропорционально напряжению на нагрузке усилителя (рисунок а); ОС по току — цепь ОС соединяют с выходом схемы последовательно С нагрузкой так, что напряжение ОС пропорционально току в нагрузке (рисунок б);

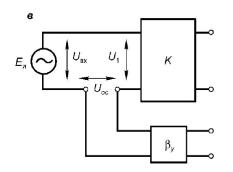


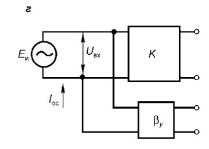


Классификация обратных связей обратную



связь последовательную — цепь ОС подключают со стороны входа, где она соединена последовательно с источником сигнала (рисунок в), обратную связь параллельную — цепь ОС со стороны входа соединена параллельно с источником сигнала (рисунок г).



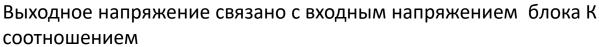




Последовательная ОС по напряжению

Напряжение обратной связи связано с выходным соотношением

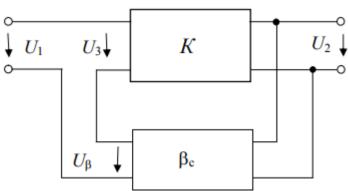
$$U_{\beta} = \beta_{\rm c} U_2$$



$$U_2 = KU_3 = K(U_1 + U_\beta) = K(U_1 + \beta_c U_2)$$

Т.о. коэффициент усиления усилителя с ОС равен

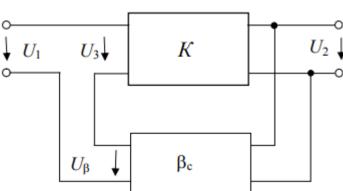
$$K_{\beta} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K}{1 - \beta K}$$





В зависимости от значения коэффициента обратной связи, ОС может быть положительная и отрицательная. Для вещественной положительной ОС для расчета коэффициента усиления применяется выражение со знаком «-» в знаменателе. Если вещественная ОС отрицательная и блок ОС подает сигнал U3 на вход усилителя в противофазе со входным напряжением U1 знак в знаменателе меняется на «+». Из выражения видно, что при отрицательной ОС коэффициент усиления усилителя уменьшается, а при положительной — увеличивается.

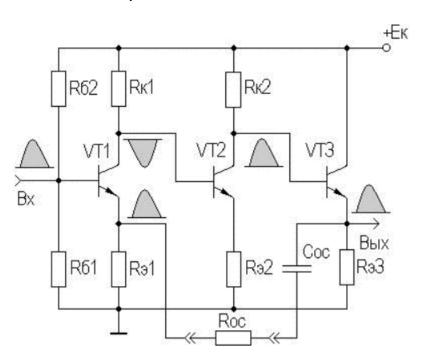
$$K_{\beta} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K}{1 - \beta K}$$





Последовательная ООС по напряжению







Последовательная ОС по току

В данной схеме сигнал ОС снимается с сопротивления R и пропорционален току, протекающему через нагрузку

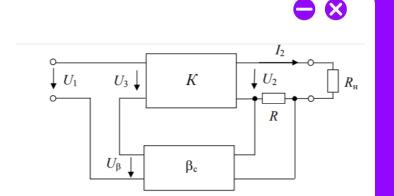
$$I_2 = U_2/(R + R_{\rm H})$$

Напряжение обратной связи определяется как

$$U_{\beta} = \beta_{\rm C} \frac{U_2 R}{R + R_{\rm H}}$$

Поэтому выходное напряжение может быть определено как

$$U_2 = \left(U_1 + \beta_C \frac{U_2 R}{R + R_H}\right) K$$





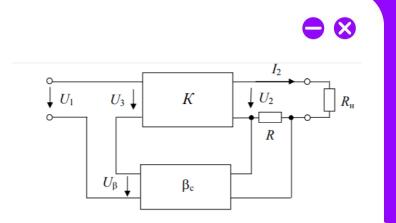
Последовательная ОС по току

из выражения

$$U_2 = \left(U_1 + \beta_C \frac{U_2 R}{R + R_H}\right) K$$

можно выразить коэффициент усиления усилителя

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - \beta_{\rm C} K \frac{R}{R + R_{\rm H}}}$$



В данном случае полезный сигнал распределяется между сопротивлениями R и Rн, причем на Rн выделяется полезный сигнал, а на R сигнал, пропорциональный выходному току, дающий напряжение для цепи обратной связи.



Параллельная обратная связь по напряжению

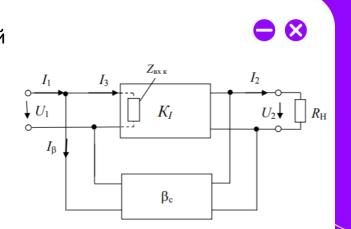
В этой схеме будем выяснять влияние цепи обратной связи на коэффициент усиления по току, поскольку на входе УУ происходит суммирование входного тока I1 и тока Ib с выхода цепи обратной и связи.

Выходное напряжение можно найти как

$$U_2 = I_2 R_{\rm H}$$

Выходной ток связан с токами на входе усилителя выражением

$$I_2 = (I_1 + I_\beta)K_{I}$$





Параллельная обратная связь по напряжению

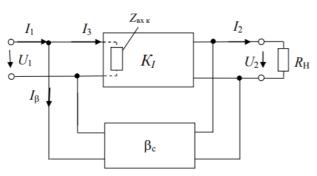
С учетом последнего уравнения и допущения равенства нулю проводимости цепи обратной связи, можно записать

$$\frac{U_2}{R_{\rm H}} = \left(\frac{U_1}{Z_{\rm BX,K}} + \frac{\beta_{\rm C} U_2}{Z_{\rm BX,K}}\right) K_I$$

После математических преобразований получаем выражение для коэффициента усиления по току усилителя с ОС

$$K_{I\beta} = \frac{K_I}{1 - \beta_C K_I \frac{R_H}{Z_{RXK}}}$$







Параллельная ОС по току

Удобно рассматривать влияние цепи ОС на коэффициент усиления по току K_I .

Напряжение OC, снимаемое с некоторого добавочного сопротивления R, равно

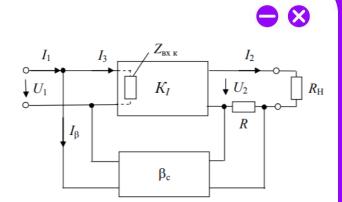
$$RI_2 = RU_2/(R + R_H)$$

оно пропорционально выходному току

$$I_2 = U_2/(R + R_H)$$

С учетом того, что

$$I_2 = (I_1 + I_\beta)K_I$$





Параллельная ОС по току

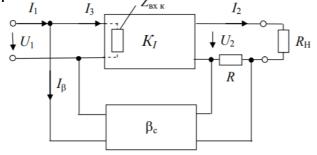


и допущения равенства нулю проводимости цепи обратной связи, можно записать

$$\frac{U_{2}}{R + R_{H}} = \left(\frac{U_{1}}{Z_{\text{BX,K}}} + \frac{R}{R + R_{H}} \frac{\beta_{\text{C}} U_{2}}{Z_{\text{BX,K}}}\right) K_{I}$$

Или после преобразований

$$K_{I\beta} = \frac{K_I}{1 - \beta_C K_I \frac{R}{Z_{\text{BX.K}}}}$$

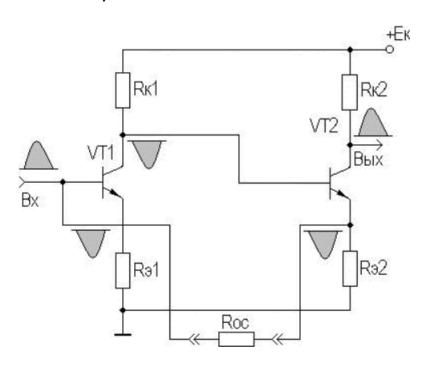


Следует помнить, что для отрицательной ОС необходимо изменить знак в знаменателе этих выражений с «— »на «+».



Параллельная ООС по току







Входной импеданс усилителя с ООС

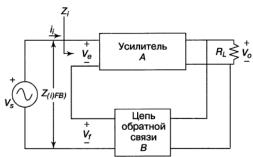


Введение ООС в усилитель изменяет входной и выходной импедансы. В зависимости от того, какая применяется ОС, импедансы увеличиваются или уменьшаются в $(1+B\cdot A)$ раз.

Рассмотрим последовательную ОС напряжению.

 Z_i - входной импеданс без ОС, $Z_{i(FB)}$ - входной импеданс с ООС.

$$Z_i = rac{V_e}{i_i}$$
; $Z_{i(FB)} = rac{V_S}{i_i}$ $V_e = V_S - B \cdot V_0$ или $V_S = V_e + B \cdot V_0 = V_e + A \cdot B \cdot V_e$, т.о. $V_S = (1 + A \cdot B) \cdot V_e$





Входной импеданс усилителя с ООС

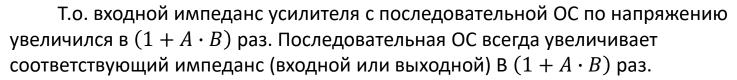


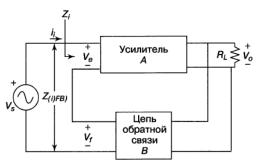
Поделив обе части последнего на i_i имеем

$$V_S/_{i_i} = (1 + A \cdot B) \cdot V_e/_{i_i}$$

Таким образом получаем соотношения для соответствия входных импедансов

$$Z_{i(FB)} = (1 + A \cdot B)Z_i$$







Выходной импеданс усилителя с ООС

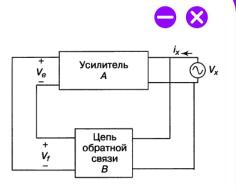
 Z_0 - выходной импеданс без ОС, $Z_{0(FB)}$ - выходной импеданс с ООС. Пусть к выходу усилителя подключено тестовое напряжение V_{r} .

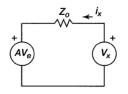
Тогда
$$Z_{0(FB)} = \frac{v_X}{i_X}$$
.

Для анализа предполагается, что отключена нагрузка от выхода усилителя и закорочен входной источник.

$$V_e = V_S - V_f = -V_f$$

Или
$$V_e = -B \cdot V_X$$
.







Выходной импеданс усилителя с ООС

Схема усилителя может быть заменена на эквивалентную схему выходного порта для расчета $Z_{0(FB)}.$

$$i_X = \frac{(V_X - A \cdot V_e)}{Z_0}$$

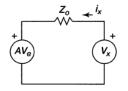
или
$$i_X=rac{(V_X-A\cdot(-B\cdot V_X))}{Z_0}=rac{(1+B\cdot A)V_X}{Z_0}$$
 .

Тогда для выходного импеданса имеем

$$Z_{0(FB)} = \frac{V_X}{i_X} = \frac{Z_0}{(1+B\cdot A)}$$

Последовательная ООС увеличивает импеданс, параллельная — уменьшает импеданс.







ООС и ПОС выводы



- Отрицательная ОС (ООС) снижает коэффициент усиления в $\mathbf{1} + \beta_y K$ раз. Значение $\beta_y K$ характеризует усиление цепи ОС , а значение $\mathbf{1} + \beta_y K$ называют *глубиной ООС*.
- Введение ООС повышает стабильность коэффициента усиления усилителя при изменении режима усилительного элемента, частоты, амплитуды сигнала и т.д.
- ООС позволяет расширить полосу пропускания сигнала, снижает уровень нелинейных искажений, фон и шумы, возникающие внутри усилителя.
- Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления в раз. Это значение называют *глубиной ПОС*.



Стабилизация положения рабочей точки усилителя



Основные свойства усилительного каскада, определяющие КПД, нелинейные искажения, мощность сигнала на нагрузке определяются положением начальной рабочей точки. Поэтому изменение положения рабочей точки должно находиться в заданных пределах.

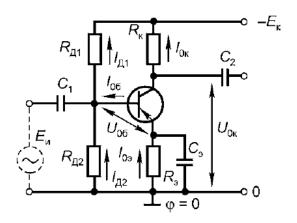
Начальный ток коллектора удваивается при повышении температуры на 8 градусов, т.о. при изменении температуры от 0 до 40 градусов начальный ток коллектора увеличивается в 32 раза.

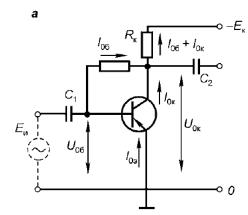


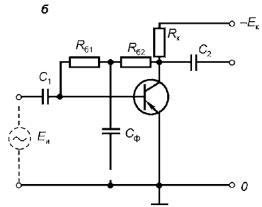
Стабилизация положения рабочей точки усилителя



Различают эмиттерную и коллекторную стабилизации. Эмиттерную стабилизацию осуществляют введением в схему последовательной ООС по постоянному току (левый рисунок). Коллекторная стабилизация работы транзистора показана на рисунке: а) — резисторная ОС; б) — конденсаторная ОС.









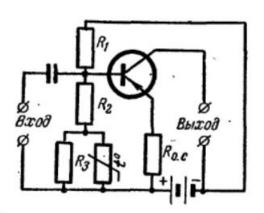
Стабилизация с использование нелинейных свойств полупроводниковых материалов

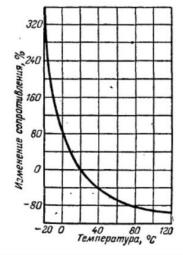


При повышении температуры сопротивление полупроводника уменьшается.

При увеличении температуры уменьшается сопротивление термистора, как следствие уменьшается потенциал базы и, следовательно, уменьшается ток базы и

коллектора.



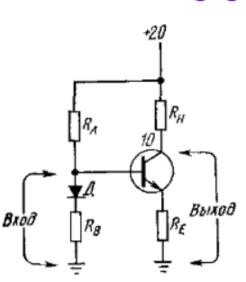




Стабилизация с использование нелинейных свойств полупроводниковых материалов

Диод, устанавливается в прямом направлении, используется диод, изготовленный из того же материала, что и транзистор.

Таким образом падение напряжения на диоде и переходе база-эмиттер являются одинаковыми при вариациях температуры.





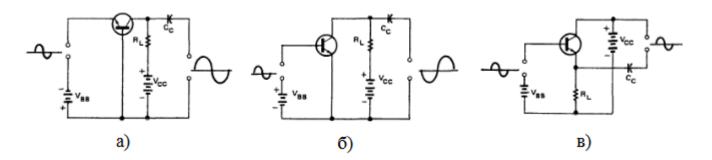
Особенности схем включения транзисторов в усилительном каскаде



В схеме с ОБ (рисунок а) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной наблюдается в цепи коллектор-база. База является общим элементом для входа и выхода.

В схеме с ОЭ (рисунок б) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной сигнал снимается с нагрузки в цепи коллектор-эмиттер. Эта схема используется наиболее широко.

Третий тип соединения (рисунок в) — схема с ОК. В этой схеме входной сигнал подается в цепь база-коллектор, а выходной снимается в цепи эмиттер-коллектор. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Эта схема используется для согласования импедансов.





Сравнительные характеристики усилителей



В данной таблице приведены входные и выходные сопротивления, а также величины усиления по току, напряжению и мощности для трех схем включения.

Тип цепи	Входное сопротив- ление	Выходное сопротив- ление	Усиление по напря- жению	Усиление по току	Усиление по мощ- ности
Общая база	Низкое	Высокое	Высокое	Меньше 1	Среднее
Общий эмиттер	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
Общий коллектор	Высокое	Низкое	Меньще 1	Среднее	Среднее



Сравнительные характеристики усилителей



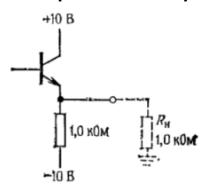
Фазовые соотношения входного и выходного сигналов для трех схем включения приведены в данной таблице.

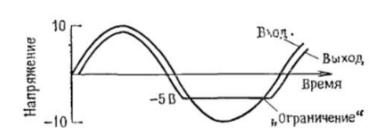
Заметим, что схема с общим эмиттером обеспечивает изменение фазы выходного сигнала по отношению к входному на 180°.

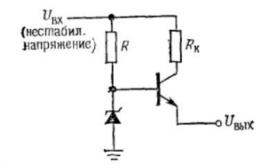
Тип усилителя	Форма вход- ного сигнала	Форма выход- ного сигнала	
Общая база	Ф-	\bigcirc	
Общий эмиттер	4	$ \leftarrow $	
Общий коллектор	←		



Простейшие примеры









Контрольные вопросы



1. Что такое схема без обратной связи?

- 2. Что такое положительная обратная связь?
- 3. Как влияет положительная ОС на усилитель?
- 4. Что такое отрицательная обратная связь?
- 5. Отрицательная ОС стабилизирует коэффициент усиления усилителя. Что это значит?
- 6. Назовите вид ООС
- 7. Какие параметры усилителя меняет ООС? За счет чего?
- 8. Во сколько раз меняются параметры усилителя с отрицательной обратной связью?
- 9. При последовательной ОС по напряжению, входной импеданс выше или ниже, чем у усилителей без ОС?
- 10. При последовательной ОС по напряжению, выходной импеданс выше или ниже, чем у усилителей без ОС?
- 11. ООС расширяет полосу пропускания усилителя. Объясните, почему?

Аналоговые микросхемы

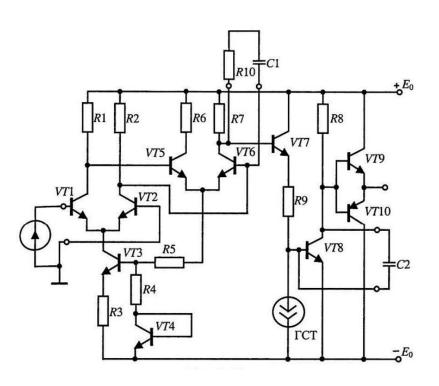




Аналоговые микросхемы
Особенности современных микросхем
Операционные усилители
Дифференциальный каскад

VITMO







Существует **два типа электронных схем** — схемы на дискретных элементах и интегральные схемы.



Применение электронных устройств для решения все более сложных задач приводит к постоянному усложнению их электрических схем. Анализ развития электронной техники показывает, что примерно в течение 5 — 7 лет сложность электронных устройств повышается в 10 раз.

Такой рост сложности электронных устройств на дискретных элементах приводит к ряду проблем:

- 1) снижение надежности устройства из-за большого числа элементов и электрических соединений между ними;
 - 2) большие габариты и вес;
 - 3) возрастание потребляемой мощности;
 - 4) слабые возможности автоматизации производства РЭА;
 - 5) трудность получения одинаковых параметров электронных приборов.

Стремление избавиться от этих недостатков привело к появлению и развитию микроэлектроники – области электроники, которая занимается разработкой и применением интегральных микросхем и аппаратуры на основе ИМС.



современном этапе развития радиоэлектронной аппаратуры наблюдается тенденция полной замены схем, собранных из отдельных дискретных компонентов, на 💳 🔀 готовые функциональные узлы, изготовленные методами микроэлектроники и называемые микросхемами.



имс ЭТО микроэлектронное, конструктивно законченное изделие, выполняющее определенную функцию (усиление, генерацию, логическую операцию и др.) преобразования и обработки сигналов и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов в единице объема.

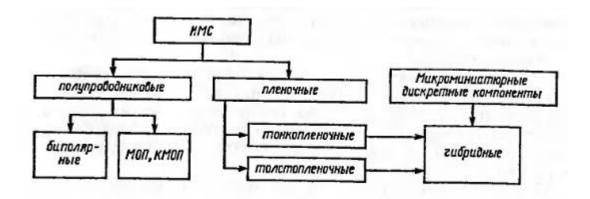
При изготовлении ИМС используется групповой метод производства, при котором на одной подложке одновременно изготавливается множество однотипных элементов или целых микросхем, что позволяет получить изделия с одинаковыми параметрами.

В настоящее время наибольшее количество выпускаемых ИМС предназначено для выполнения логических операций в цифровых вычислительных устройствах. Эти микросхемы практически не нуждаются в дополнительных внешних элементах, и для их применения во многих случаях не требуется знать внутреннюю структуру (электрическую схему). При проектировании аппаратуры достаточно иметь сведения о выходных параметрах.



Структурная схема классификации ИМС [Бурков]







Современные МС по методу изготовления делятся на **полупроводниковые** (интегральные схемы), **пленочные** и **гибридные**.



Полупроводниковые Интегральные схемы (ИС) создают локальным внедрением различных примесей на отдельных участках исходного полупроводникового кристалла. В результате в кристалле образуются области, по характеристикам соответствующие транзисторам, диодам, резисторам и соединения между ними.

Транзисторы представляют собой трехслойную структуру с двумя p-n - переходами; обычно применяют n-p-n-, реже p-n-p-транзисторы. Для изоляции транзисторов друг от друга используют методы изоляции диэлектриком и p-n-переходом.

Диоды в ИМС — это двухслойная структура с одним p-n-переходом, обычно в качестве диода используют транзистор в диодном включении.

Конденсаторы в ИМС получают на основе p-n-перехода транзистора, смещенного в обратном направлении. Максимально допустимая емкость конденсатора, применяемая в ИМС, не должна превышать 200 пФ.



Резисторы в ИМС — это участки легированного полупроводника с двумя выводами. Сопротивление диффузионных резисторов зависит от удельного сопротивления полупроводника и геометрических размеров и обычно не превышает единиц кОм. В качестве высокоомных резисторов используют входные сопротивления эмиттерных повторителей, сопротивление которых может достигать сотен кОм.



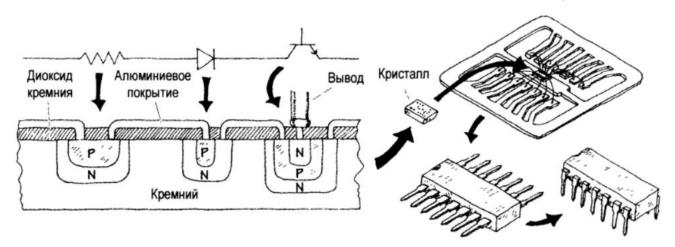
Поскольку все элементы ИС получают в едином технологическом цикле в кристалле полупроводника, количество операций на их изготовление ненамного превышает количество операций по изготовлению отдельного транзистора. Поэтому стоимость ИС ненамного превышает стоимость одного транзистора. Это вносит особенности в схемотехнику интегральных схем: в ИС предпочтительно использовать транзисторы одного вида, так как это упрощает технологию изготовления ИС. В зависимости от транзисторов, которые используются в ИС, различают целый ряд технологий изготовления ИС: биполярную n-p-n-технологию; биполярную p-n-p-технологию; совмещенную биполярную технологию и т.д.;



Структура ИМС



Кристалл подсоединяется к металлической рамке с выводами



Кристалл с выводами заключается в пластмассовый или эпоксидный корпус Конечный результат (DIP)

прочности и герметизации.



Пленочные МС изготавливают посредством послойного нанесения на диэлектрическое основание (подложку) пленок различных материалов и одновременно формируются транзисторные и диодные структуры, а также соединения между ними. Пленочные МС делятся на тонкопленочные (толщина до 1 мкм) и толстопленочные. Тонкопленочные элементы формируют, как правило, термическим вакуумным испарением и ионным распылением, а толстопленочные элементы наносят на подложку методом трафаретной печати с последующим вжиганием. Подложка с расположенными на ней элементами, проводниками и контактными площадками называется платой. Плату помещают в жесткий металлический или пластмассовый корпус, который предназначен для механической

Гибридная МС содержит пленочные пассивные элементы (R, C, L), расположенные на диэлектрической подложке, и соединения между ними, а также транзисторы и диоды, изготовленные отдельно в бескорпусном варианте и затем монтируемые в подложку. В состав гибридных МС могут входить в качестве компонентов и МС (обычные интегральные).





Классификация микросхем



Тенденция развития ИМС — увеличение числа элементов на кристалле (увеличение функциональной сложности), характеризуется степенью интеграции

$$k = lgN$$
,

где N — число элементов, входящих в ИМС

• **По** степени интеграции — показатель сложности ИМ. Степень интеграции — это число простых элементов и компонентов, входящих в состав ИС.

По степени интеграции ИМС делятся на:

- малая интегральная схема (МИС или SSI) до 100 элементов в кристалле,
- средняя интегральная схема (СИС или MSI) до 1000 элементов в кристалле,
- большая интегральная схема (БИС или LSI) до 10 тыс. элементов в кристалле,
- сверхбольшая интегральная схема (СБИС или VLSI) до 100 тыс. элементов в кристалле;
 - VVLSI более 100 тыс. элементов в кристалле.



Сложность ИС характеризуется также **плотностью упаковки**, т.е. числом элементов в единице объема или на единице площади кристалла.

Выпускаются ИС в основном на основе кремния в виду того, что на его поверхности легко образуется окись, ширина запрещенной зоны больше чем у германия (менее чувствительны к температуре, больший диапазон рабочих температур), кремний входит в состав обычного песка, соответственно низкая себестоимость. Также для производства ИМС используют аресенид галия (GaAs)





Классификация микросхем



• По функциональному назначению:

- 1) Аналоговые (АИС) или линейные (ЛИС) предназначены для преобразования и обработки сигнала и представленные в аналоговом виде. Это сигналы, которые описываются непрерывными функциями времени. В основе аналоговых схем лежит простейший усилительный каскад, на основе которого строят другие устройства. В настоящее время под аналоговыми принято называть следующие операции: усиление, сравнение, ограничение, перемножение, частотную фильтрацию. Используются в усилителях, модуляторах, стабилизаторах напряжения и т.д.;
- 2) цифровые (ЦИС) предназначены для преобразования и обработки сигналов, представленных в двоичном или другом цифровом коде. В основе цифровых схем лежит ключ и переключатель тока. Используются в логических схемах, элементах памяти, цифровых измерителях, цифровых коммуникационных схемах, ЦАП, АЦП и т.д.





Классификация микросхем



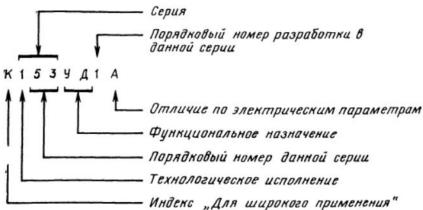
- По виду активных элементов:
- на биполярных транзисторах;
- на полевых МДП-транзисторах (металл диэлектрик –проводник);
- на КМДП-транзисторах (комплементарных полевых транзисторах со структурой металл диэлектрик проводник) комплементарными называются транзисторы с одинаковыми параметрами, но имеющие разный тип проводимости канала.



Маркировка микросхем



ИМС выпускаются сериями, объединяющими ряд отдельных схем, единых по технологическому признаку, согласованных по напряжению питания, уровням входных и выходных сигналов и конструктивному оформлению. Серии стремятся разрабатывать так, чтобы из входящих в них схем можно было построить законченное устройство.





Маркировка ИМС по ГОСТ состоит из четырех элементов, например, 140 УД 8 А или К 155 ЛА 3:

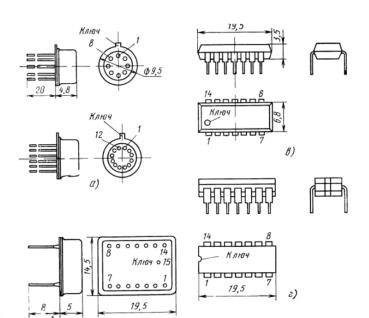


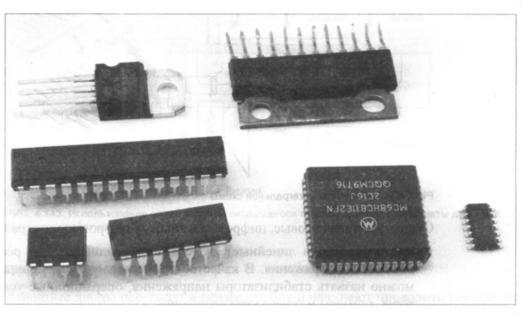
- 1) первые три или четыре цифры номер серии, характеризующий конструктивнотехнологическое деление и состоящий из двух частей: первая цифра дает деление по технологии изготовления: 1, 5, 7 полупроводниковые ИМС (7 это бескорпусные ИС); 2, 4, 6, 8 ГИМС; 3 прочие (пленочные) ИМС, следующие две или три цифры означают порядковый номер разработки ИМС (от 0 до 999);
- 2) две буквы это функциональное назначение ИМС. Например, УД операционный усилитель; ПС аналоговый перемножитель; ЛА логический элемент «ИЛИ-НЕ»; ПЕ линейный стабилизатор напряжения; ЕП импульсный стабилизатор напряжения;
 - 3) третий элемент две цифры: порядковый номер разработки в данной серии;
- четвертый буква, элемент характеризующая деление И ПО параметрическим группам. Иногда перед условным обозначением стоит буква «К», это буквы означает микросхему широкого применения, если нет, это ИС специального назначения. Иногда перед условным обозначением стоят две буквы, которые например: КМ указывают ТИП корпуса, ТИП корпуса; KΡ пластмассовый корпус; КМ – керамо-металлический; КЕ – металло-полимерный.

VİTMO

Типы корпусов ИМС









Наиболее распространенные типы корпусов





Тип корпуса	Расшифровка названия	Шаг выводов, мм	Примечания
DIL	Корпус с двухрядным расположением выводов	2,54	_
SO/SOIC/SOP	Малогабаритный корпус (Small outline IC package)	1,27	-
MSOP/SSOP	Плоский мини-корпус с двусторонним малошаговым расположением выводов в форме крыла чайки (Mini/shrink small outline package)	0,65	_
SOT	Мини-корпус транзисторного типа (Small outline transistor)	0,65	_
TQFP	Тонкий плоский микрокорпус с четырехсторонним расположением выводов (Thin quad flat pack)	0,8	Выводы расположены с четырех сторон корпуса
TQFN	Тонкий плоский микрокорпус с четырехсторонним расположением контактных выводов (Thin quad flat no leads)	0,4-0,65	Выводы в виде контактных площадок на нижней стороне корпуса



Аналоговые микросхемы. Операционные усилители



Операционный усилитель (ОУ) — это электронный усилитель, предназначенный для различных операций над аналоговыми величинами в схемах с отрицательной обратной связью (ООС).

Чаще под ОУ понимают усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, большим коэффициентом усиления Ко, малыми входными токами Івх, большим входным сопротивлением Rвх, малым выходным сопротивлением Rвых, достаточно большой граничной частотой усиления frp, малым смещением нуля Ucм.

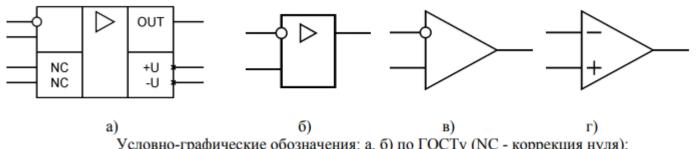
Под большими и малыми понимаются такие величины, которые в простых расчетах можно считать соответственно бесконечными или нулевыми (идеальный ОУ). Для идеального ОУ Ко = ∞ ; Iвх = 0; Rвх = ∞ ; Rвых = 0; fгр = ∞ ; Uсм = 0



Операционный усилитель



Операционный усилитель изначально был спроектирован для выполнения математических операций (отсюда его название), путём использования напряжения как аналоговой величины. Такой подход лежит в основе аналоговых компьютеров, в которых ОУ использовались для моделирования базовых математических операций.



Условно-графические обозначения: а, б) по ГОСТу (NC - коррекция нуля); в, г) устаревшее обозначение, а также обозначение зарубежных производителей ОУ.



Операционный усилитель



Идеальный ОУ является многофункциональным схемотехническим решением, он имеет 🛑 🔀 множество применений помимо математических операций. Реальные ОУ, основанные на транзисторах, электронных лампах или других активных компонентах, выполненные в виде дискретных или интегральных схем, являются приближением к идеальным.

В <u>1963 году</u> Роберт <u>Видлар</u>, инженер фирмы «Fairchild Semiconductor», спроектировал первый интегральный ОУ — µА702. При цене в 300 долларов, прибор, содержавший 9 транзисторов, использовался только в военных применениях. Первый доступный интегральный ОУ, µА709, также спроектированный Видларом, был выпущен в <u>1965 году</u>; вскоре после выпуска его цена упала ниже 10 долларов, что было всё ещё слишком дорого для бытового применения, но вполне доступно для массовой промышленной автоматики и т. п. гражданских задач.

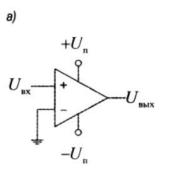
В 1967 году фирма «National Semiconductor», куда перешёл работать Видлар, выпустила LM101, а в 1968 году фирма Fairchild выпустила ОУ, практически идентичный µА741 — первый ОУ со встроенной частотной коррекцией. ОУ LM101/µA741 был более стабилен и прост в использовании, чем предшественники. Многие производители до сих пор выпускают версии этого классического чипа (их можно узнать по числу «741» в наименовании). Позднее были разработаны ОУ и на другой элементной базе: на полевых транзисторах с p-n переходом (конец 1970-х годов) и с изолированным затвором (начало 1980-х годов), что позволило существенно улучшить ряд характеристик.

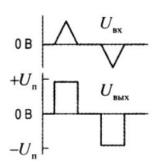


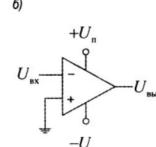
Режимы работы ОУ

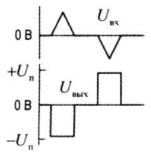
ОУ без ОС



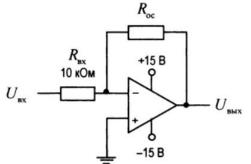


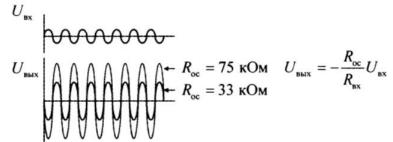






ОУ с ОС

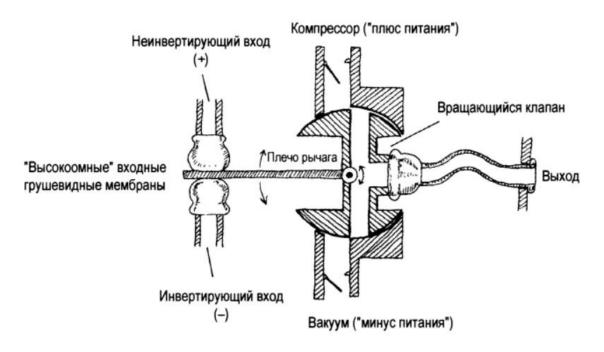






Водяная модель ОУ







Блок-схема операционного усилителя

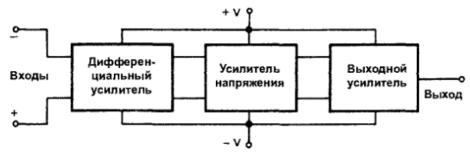


На рисунке изображена блок-схема операционного усилителя. Операционный усилитель состоит из трех каскадов. Каждый из каскадов является усилителем со своими характерными особенностями.

Входной каскад это дифференциальный усилитель. Он позволяет операционному усилителю реагировать только на разность входных сигналов. Кроме того, дифференциальный усилитель усиливает сигнал, пропорциональный разности входных напряжений, и не реагирует на одинаковые сигналы на обоих входах.

Второй каскад – это усилитель напряжения с высоким коэффициентом усиления.

Последний каскад это выходной усилитель. Обычно это эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах. Он используется для того, чтобы операционный усилитель имел низкий выходной импеданс.



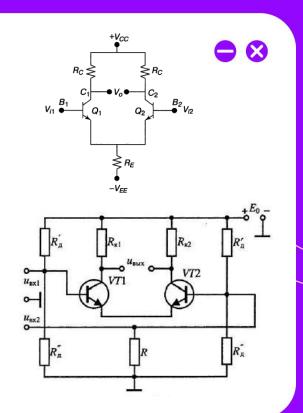
VITMO

Дифференциальный каскад и его свойства

Обычно в радиотехнике дифференциальным или разностным каскадом (усилителем) называют каскад, выходное напряжение (ток) которого зависит не от абсолютных значений входных колебаний, а от их взаимного приращения.

Подобные усилители были созданы, когда потребовалось обрабатывать сигналы инфранизких частот, для усиления которых обычные схемы усилительных каскадов с разделительными и блокирующими емкостями оказались малопригодными из-за необходимости использовать конденсаторы большой емкости, а, следовательно, и больших габаритным размерам.

Для обеспечения качественной работы схемы параметры элементы должны быть идентичными (полностью совпадать), при современных технологиях это достижимо, т.к. вся схема изготавливается на одном кристалле одновременно.



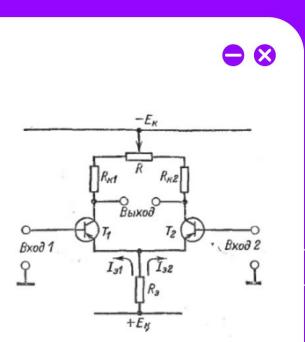
LITMO

Общие свойства ДК

- 1. ДК симметричен, что позволяет значительно уменьшить величину приведенного дрейфа по сравнению с однотактным каскадом.
- 2. ДК обладает значительно большим коэффициентом усиления.

Если Uвх подается на базы транзисторов, то напряжения на его входах относительно земли будет Uвх/2 и –Uвх/2. Соответственно ΔI э1 = - ΔI э2. Сумма токов не меняется, следовательно не меняется потенциал эмиттера. От сюда очевидно, что отсутствует обратная связь через резистор Rэ.

ДК можно соединять друг с другом непосредственно: коллекторы предыдущего каскада с базами следующего.





Общие свойства ДК

При анализе ДК используют понятиями *синфазного* и **противофазного** (дифференциального) входных сигналов.

Если на базы транзисторов поступает одинаковый по значению и по фазе сигнал, то его называют *синфазным*.

Если фазы колебаний на базах отличаются на 180 градусов, то сигнал называют **противофазным**.

Синфазный сигнал одинаковые вызывает ПО абсолютному значению и знаку приращения эмиттерных и коллекторных токов.

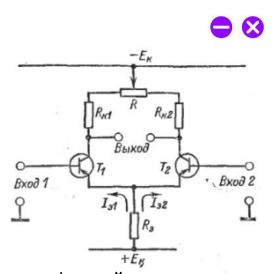


В результате в полностью симметричной схеме значение выходного сигнала не изменится (каскад не реагирует на синфазный сигнал). В тоже время одинаковые приращения эмиттерных токов вызовут увеличение напряжения на Rэ, который является ООС, которое приведет к уменьшению потенциала коллекторов транзисторов, как часто говорят к подавлению синфазного сигнала.



Общие свойства ДК

При дифференциальном входном сигнале токи каждого из транзисторов получают одинаковые по абсолютному, но разные по знаку приращения (считается, что начальная рабочая точка на ВАХ транзисторов выбрана на линейном участке). Разность потенциалов коллекторов транзисторов VT1 и VT2 будет отличной от нуля, т.е. появится выходной сигнал. Напряжение на резисторе Rэ при дифференциальном входном сигнале не изменится, так как не изменится протекающий через резистор ток, равный сумме эмиттерных токов транзисторов VT1 и VT2.

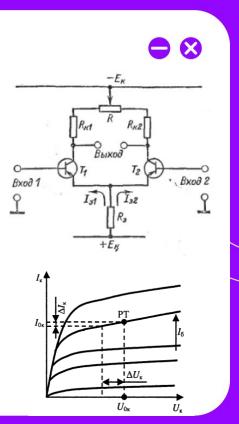


Таким образом, схема в идеальном случае реагирует на противофазный и не реагирует на синфазный сигнал. Изменение температуры, паразитные наводки, старение деталей, временные флуктуации параметров транзисторов можно рассматривать как синфазные входные воздействия. Следовательно, схема ДК оказывается устойчивой (не изменяет своих параметров) в процессе эксплуатации и малочувствительной к помехам.

VITMO

Общие свойства ДК

Увеличение сопротивления резистора, включенного в цепи эмиттеров, способствует подавлению синфазных (паразитных) сигналов, т.о. сопротивление резистора д.б. как можно больше. Включение резистора с большим сопротивлением в цепь эмиттеров транзисторов VT1 и VT2 приводит к необходимости увеличивать напряжение питания схемы, что не всегда желательно. Сопротивление в цепи эмиттеров должно быть большим не для постоянной составляющей тока, а для его приращенией. Стремление обеспечить как можно большее сопротивление для приращений (переменных составляющих) токов эмиттеров транзисторов VT1 и VT2 при приемлемом (1-5 B) падении постоянного напряжения на нем привело к замене резистора на транзистор. При такой замене используется свойство транзистора, работающего в активном режиме, заключающееся в том, что сопротивление транзистора постоянному току: $R_{=}=U_{0k}/I_{0k}$, где U_{0k} и I_{0k} - координаты рабочей точки (РТ), и переменному току $R_{\sim} = \Delta U_k/\Delta I_k$ — существенно разные, причем $R_{\sim} \gg R_{-}$



VITMO

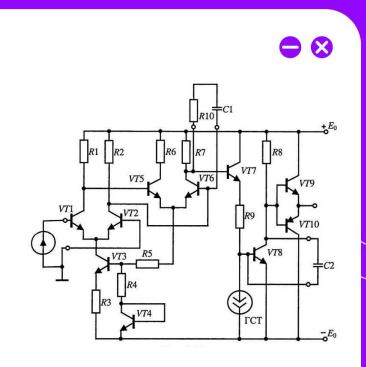
Принципиальная схема ОУ

Можно выделить несколько участков:

1. Дифференциальный каскад на транзисторах VT1, VT2, VT3, VT4. VT4 использован в качестве диода. Для обеспечения большого входного сопротивления токи эмиттеров и коллекторов VT1 и VT2 выбирают небольшими (десятки микроампер). Для повышения входного сопротивления входной каскад м.б. выполнен на полевых транзисторах.

Дифференциальный каскад на транзисторах VT5 и VT6, эмиттеры которых связаны со схемой генератора стабильного тока входного дифференциального каскада. Служит для обеспечения большого коэффициента усиления по напряжению.

- 3. Двухтактный выходной каскад на VT9, VT10.
- 4. Схема развязки на VT7, VT8.





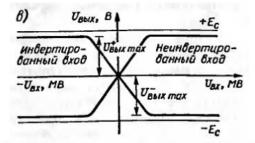
Амплитудные (передаточные) характеристики операционного усилителя





Важнейшей для ОУ является передаточная характеристика в виде двух кривых для инвертирующего и неинвертирующего входов, снимаемые при нулевом сигнале на другом входе.

Каждая из кривых состоит из наклонного и горизонтального участков. Горизонтальные участки соответствуют режиму полностью открытого (насыщенного) или закрытого транзистора выходного каскада (эмиттерного повторителя). Значения этих выходных напряжений близки к ЭДС источника питания. Наклонному (линейному) участку кривых соответствует пропорциональная зависимость выходного сигнала от входного. Угол наклона этой характеристики определяется коэффициентом усиления. Он зависит от типа ОУ и может изменяться от нескольких сотен до сотен тысяч и более.





Правила



Во-первых, операционный усилитель обладает таким большим коэффициентом усиления по напряжению, что изменение напряжения между входами на несколько долей милливольта вызывает изменение выходного напряжения в пределах его полного диапазона, поэтому не будем рассматривать это небольшое напряжение, а сформулируем

правило 1: Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равной нулю.

Во-вторых, операционный усилитель потребляет очень небольшой входной ток (ОУ типа 741 потребляет 0,08 мкА, ОУ со входами на полевых транзисторах – порядка пикаампер); не вдаваясь в более глубокие подробности, сформулируем

правило 2: Входы операционного усилителя тока не потребляют.

правило 3: Операционный усилитель имеет бесконечно большой импеданс



Инвертирующий усилитель

Рассмотрим схему, приведенную на рисунке. Проанализировать ее будет несложно, используя приведенные выше правила.

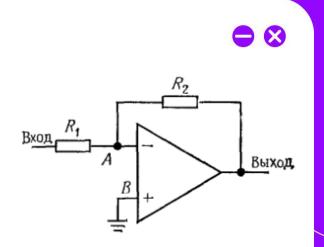
Потенциал в точке В равен потенциалу земли, потенциал точки А тоже должен быть равен потенциалу земли.

Это означает, что:

- а) падение напряжения на резисторе R2 равно Uвых,
- б) падение напряжения на резисторе R1 равно Uвх.

Таким образом Uвых/R2=-Uвх/R1, или коэффициент усиления по напряжению равен Uвых/Uвх= R2/R1.

Чаще всего точку В лучше заземлять не непосредственно, а через резистор.





Неинвертирующий усилитель

Схема неинвертирующего усилителя приведена на рисунке.

Анализ ее также крайне прост:

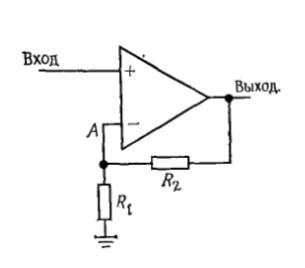
1. UA=UBX.

Напряжение UA снимается с делителя напряжения:

Ua=Uвых*R1/(R1+R2).

Если Ua=Uвх, то коэффициент усиления равен

Uвых/Uвх=1+R2/R1.





Основные предостережения по работе с ОУ

• Правила 1 и 2 (сформулированные ранее) справедливы для любого операционного усилителя при условии, что он находится в активном режиме, т.е. его входы и выходы не перегружены.



Например, если подать на вход усилителя чересчур большой сигнал, то это приведет к тому, что выходной сигнал будет срезаться вблизи уровня (напряжение источника питания). В то время когда напряжение на выходе оказывается фиксированным на уровне напряжения среза, напряжение на входах не может изменяться. Размах напряжения на выходе операционного усилителя не может быть больше диапазона напряжения питания (обычно размах на 2 В меньше диапазона питания).

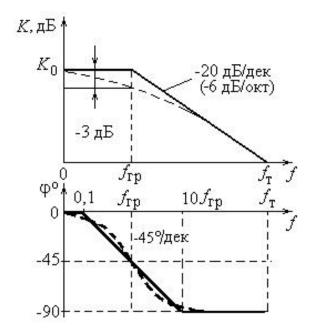
- Нельзя путать инвертирующий и неинвертирующий входы.
- В схеме операционного усилителя обязательно предусмотрена цепь обратной связи по постоянному току. В противном случае ОУ обязательно попадет в режим насыщения.
- Многие операционные усилители имеют довольно малое предельно допустимое дифференциальное входное напряжение. Максимальная разность напряжений между инвертирующим и неинвертирующим входами может быть ограничена величиной 5 В для любой полярности напряжений. Если пренебречь этим условием, то возникают большие входные токи, которые приведут к ухудшению характеристик или даже к разрушению ОУ.



Частотные свойства операционных усилителей

Графическая зависимость от частоты модуля коэффициента передачи напряжения ОУ и сдвига фазы выходного сигнала относительно входного (АЧХ и ФЧХ) приведена на рисунке.





Список использованных источников



- Дьюб Динеш С. Электроника: схемы и анализ. М.: Техносфера, 2008. 432 с.
- Красько А.С. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2005. 178 с.
- Ровдо А. А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах. М.: Додэка-ХХІ 2002.
- Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1999
- Монк С., Шерц П. Электроника. Теория и практика. 4-е изд.: Пер. с англ //Санкт-Петербург: БXВ-Петербург. – 2018.
- Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех //Додека XXI. 2011.
- Мамий А. Р., Тлячев В. Б. Операционные усилители //Майкоп: АГУ. 2005.
- Масленников В. В. Микросхемы операционных усилителей и их применение //Москва: МИФИ. – 2009.
- Абрамов К. Д., Абрамов С. К. Схемотехника устройств на операционных усилителях, « //Харьковский авиационный институт. – 2008.
- 10. Алексеев А. Г., Войшвилло Г. В. А47 Операционные усилители и их применение.—М.: Радио и связь, 1989.—120 с.: ил.—(Массовая радиобиблиотека; Вып. 1130).





Спасибо за внимание!

ITSMOre than a UNIVERSITY