

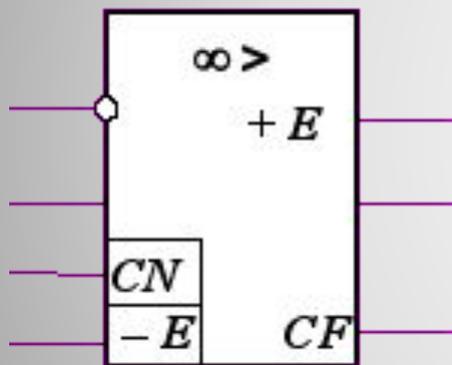
Операционный усилитель (ОУ) - это модульный многоканальный усилитель с дифференциальным входом, по своим характеристикам приближающийся к идеальному усилителю.

Само название "операционный усилитель" связано с математическими операциями, которые в начале развития вычислительных устройств осуществлялись с помощью операционных усилителей (ОУ).

Функции современных интегральных ОУ стали более универсальными, а сами ОУ, являясь источниками напряжения, управляемыми напряжением, находят широкое применение в устройствах современной электроники.

Операционный усилитель

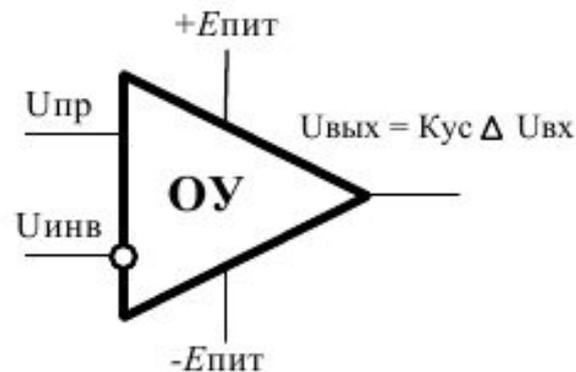
Условное обозначение операционного усилителя

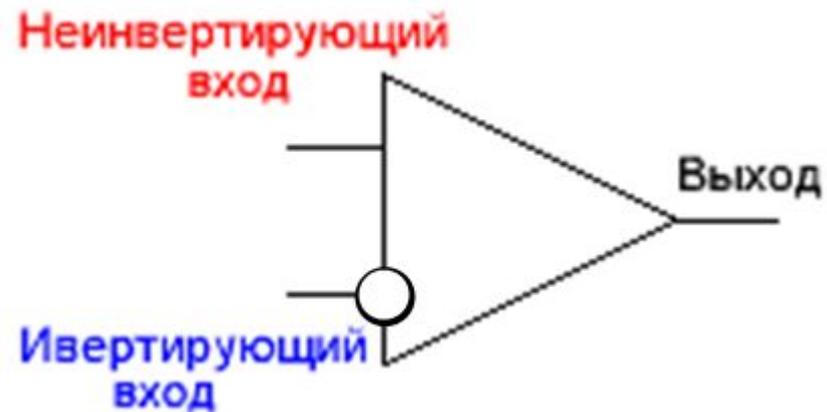
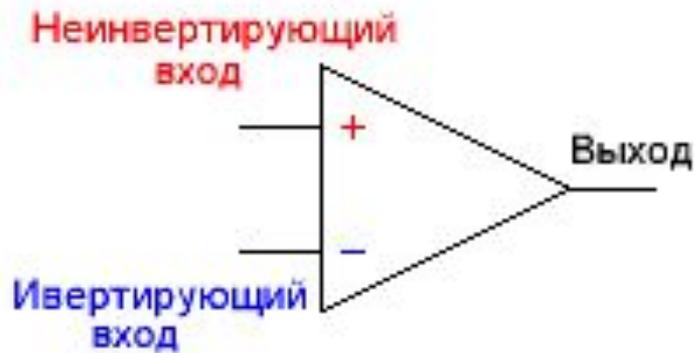


-E и **+E** - два вывода подключения питания

NC (Null Correction) - выводы, служащие для коррекции нуля операционных усилителей

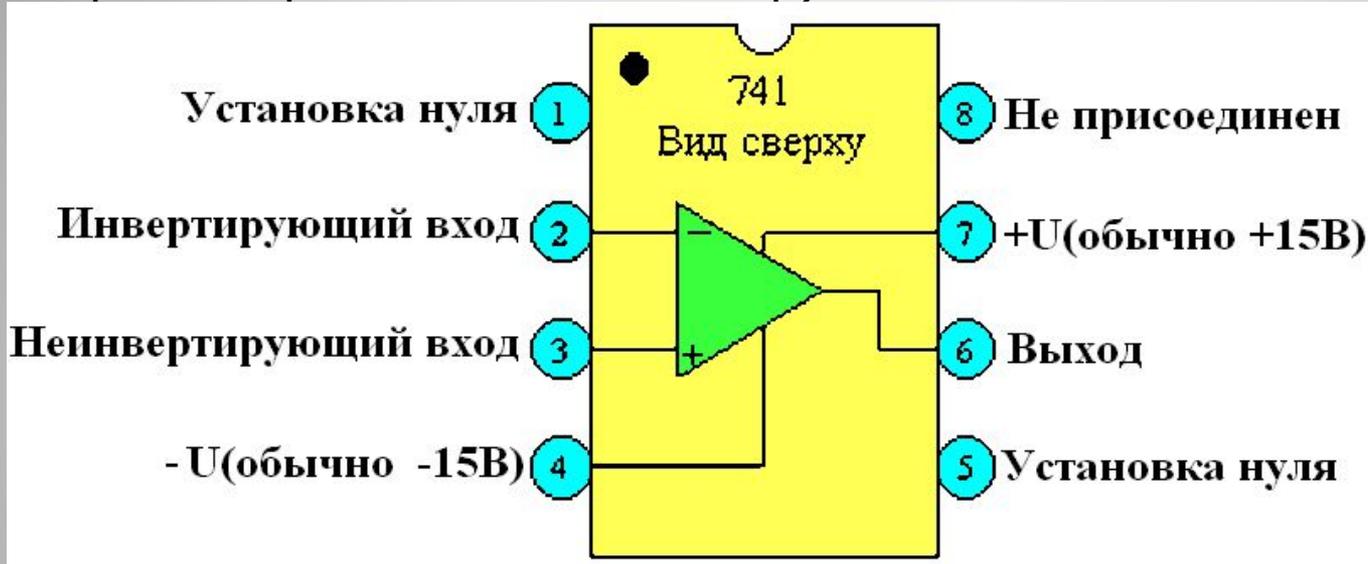
FC (Frequency Correction) - выводы, к которым подключаются элементы частотной коррекции





**Условное обозначение
операционного усилителя (ОУ)**

Схема ОУ типа 411 - это кристалл кремния, содержащий 24 транзистора (21 биполярный транзистор, 3 полевых транзистора, 11 резисторов и 1 конденсатор).



На рисунке показано соединение с выводами корпуса.

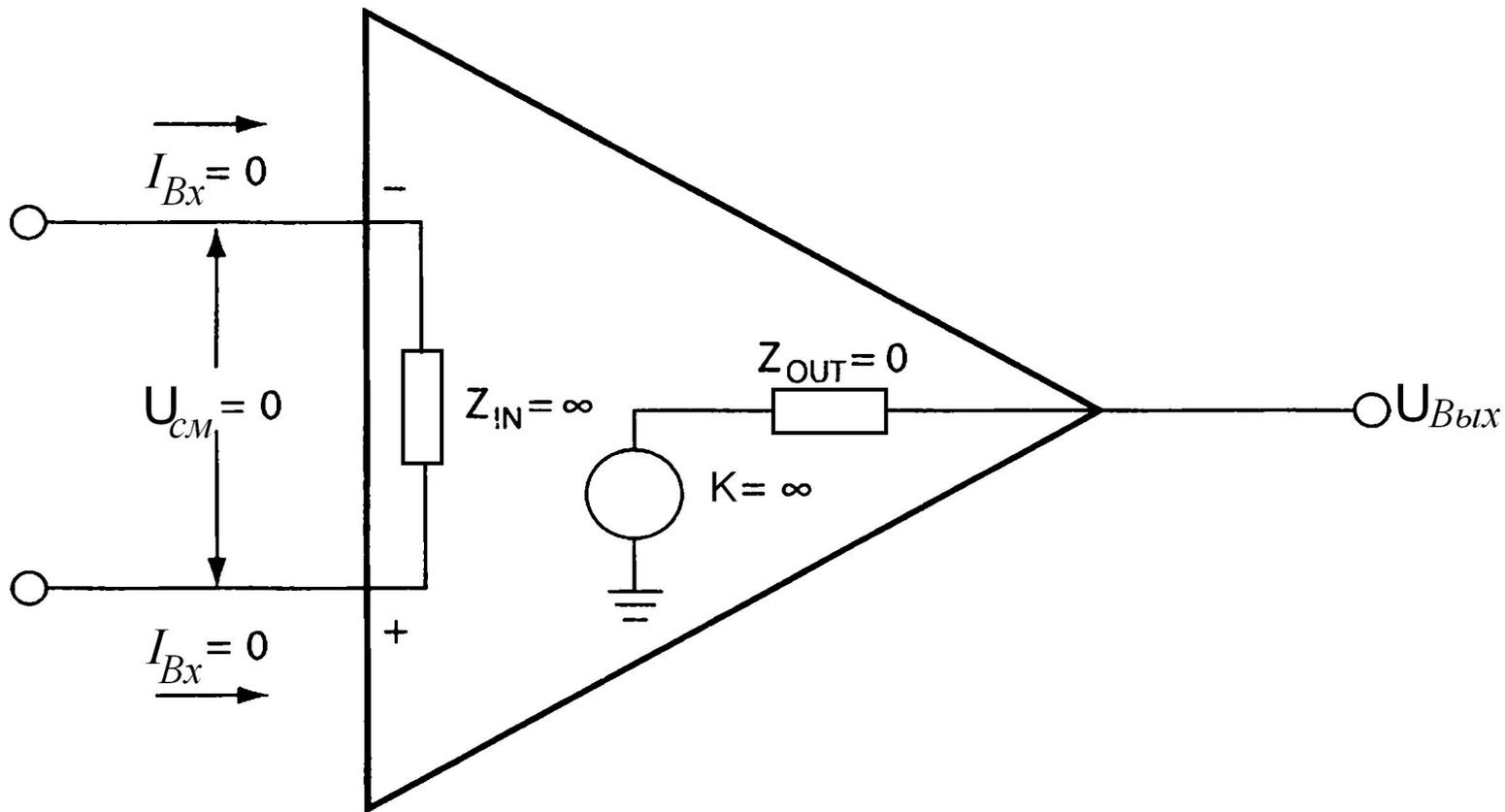
Точка на крышке корпуса и выемка на его торце служат для обозначения точки отсчета при нумерации выводов.

В большинстве корпусов электронных схем нумерация выводов осуществляется в направлении против часовой стрелки со стороны крышки корпуса.

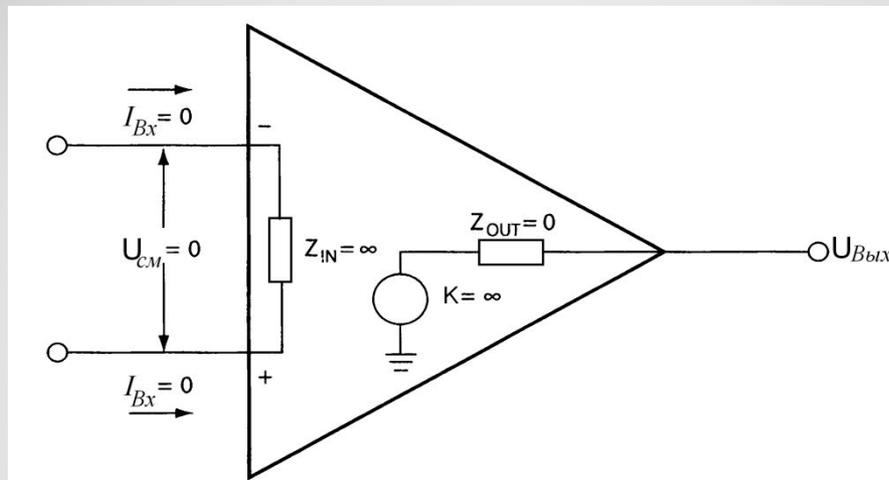
Выводы "установка нуля" (или "баланс", "регулировка") служат для устранения небольшой асимметрии, возможной в операционном усилителе.

Схема ОУ типа 411

Эквивалентная схема замещения операционных усилителей

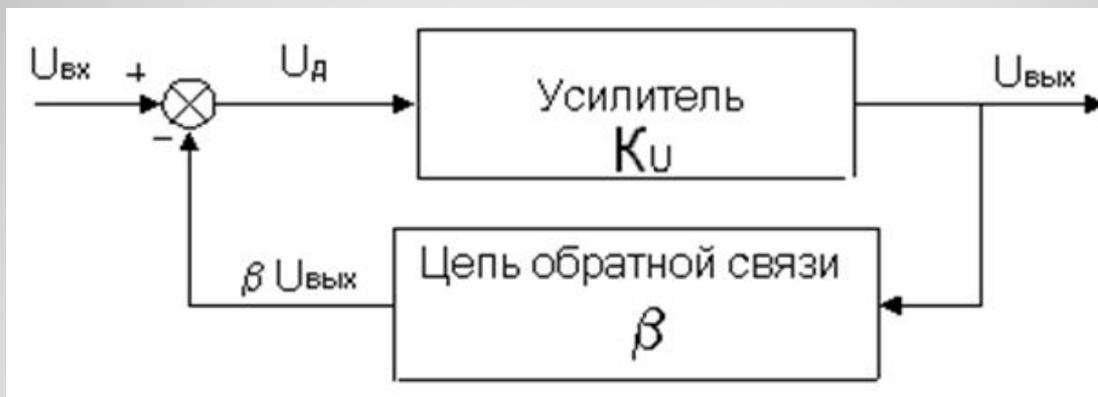


Допущения, принятые при рассмотрении работы идеального ОУ



Параметр	Символ параметра	Значение параметра
Входной ток	I_{Bx}	0
Напряжение смещения нуля	U_{CM}	0
Входное сопротивление	Z_{IN}	∞
Выходное сопротивление	Z_{OUT}	0
Коэффициент усиления	K	∞

Операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой отрицательной обратной связью



После достижения устойчивого состояния выходное напряжение ОУ

$$U_{\text{вых}} = K_U \cdot U_{\text{д}} = K_U (U_{\text{вх}} - \beta \cdot U_{\text{вых}})$$

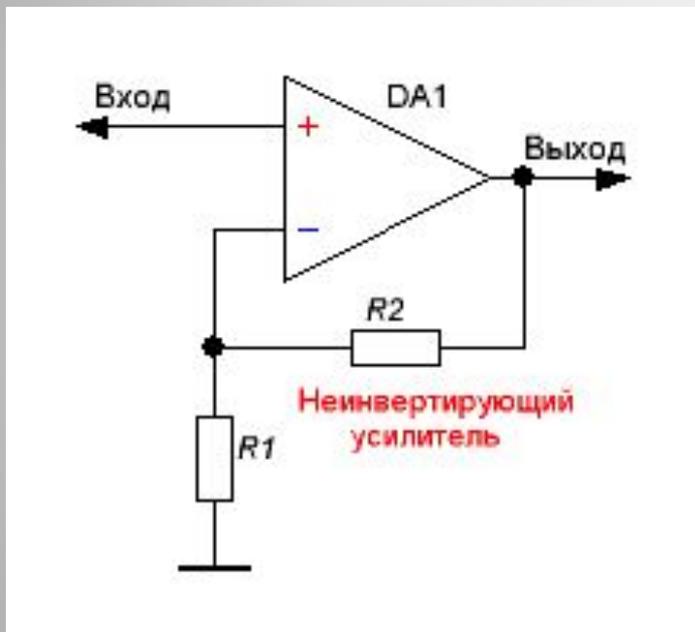
Решив это уравнение относительно $U_{\text{вых}}$, получим:

$$\hat{E} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K_U}{1 + \beta \cdot K_U}$$

Вывод: коэффициент усиления ОУ с обратной связью определяется почти исключительно только обратной связью и мало зависит от параметров самого усилителя

Обратная связь

При неинвертирующем включении входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход через делитель на резисторах R_1 и R_2 поступает сигнал с выхода усилителя



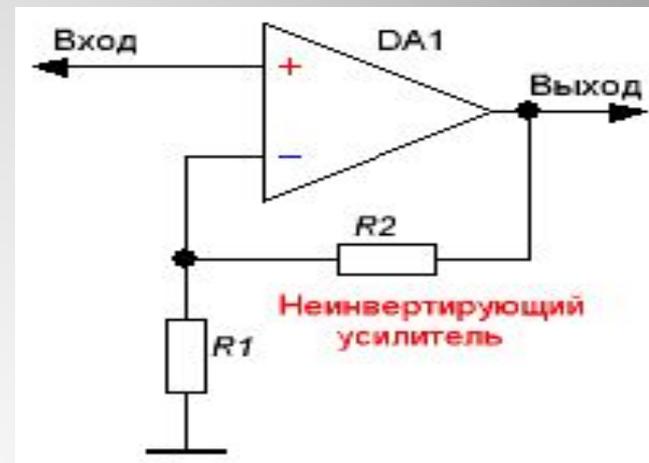
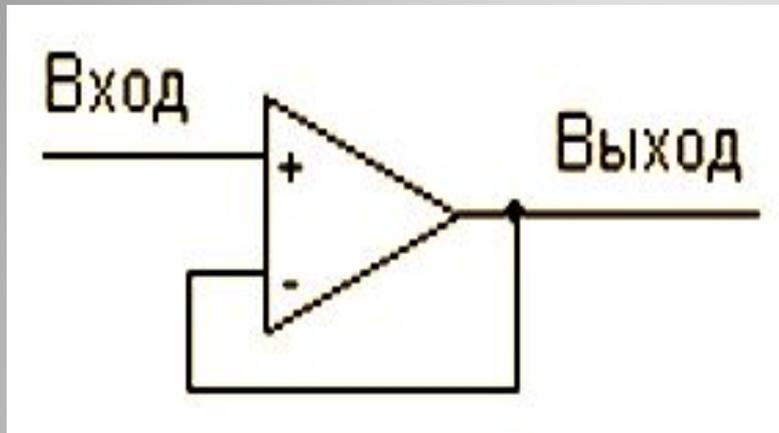
Фаза сигнала на входе и на выходе совпадает (выходной сигнал **синфазен** входному)

Коэффициент усиления определяется так:

$$K = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Неинвертирующий усилитель

Повторитель, на основе операционного усилителя.

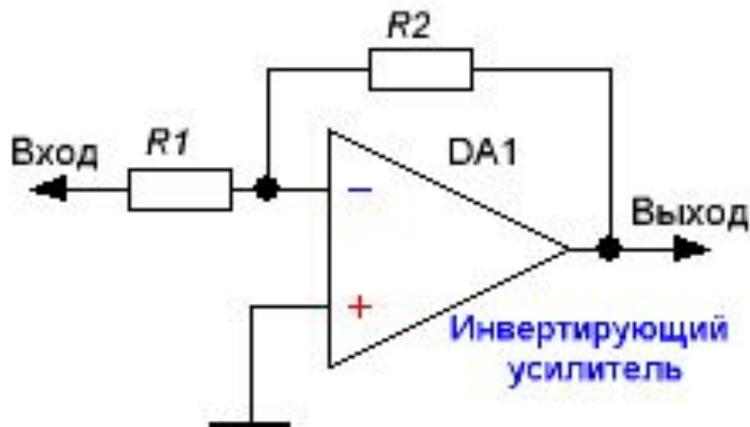


Представляет собой неинвертирующий усилитель, в котором сопротивление резистора $R_1 = \infty$ равно бесконечности, а сопротивление резистора $R_2 = 0$ - нулю (коэффициент усиления = 1).

$$\hat{E} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

Усилитель с единичным коэффициентом усиления **называют** иногда **буфером**, так как **он обладает изолирующими свойствами** (**большим входным импедансом** и **малым выходным**).

Неинвертирующий повторитель



Входной сигнал подается на инвертирующий вход, а неинвертирующий вход подключается к общему проводу.

Коэффициент усиления определяется соотношением резисторов R1 и R2 и считается по формуле:

$$K = -\frac{R2}{R1}$$

В инвертирующем усилителе фаза выходного сигнала "зеркальна" фазе входного.

Входное сопротивление определяется резистором R1. Если его сопротивление, например 100кОм, то и входное сопротивление усилителя будет 100кОм.

Инвертирующее включение ОУ

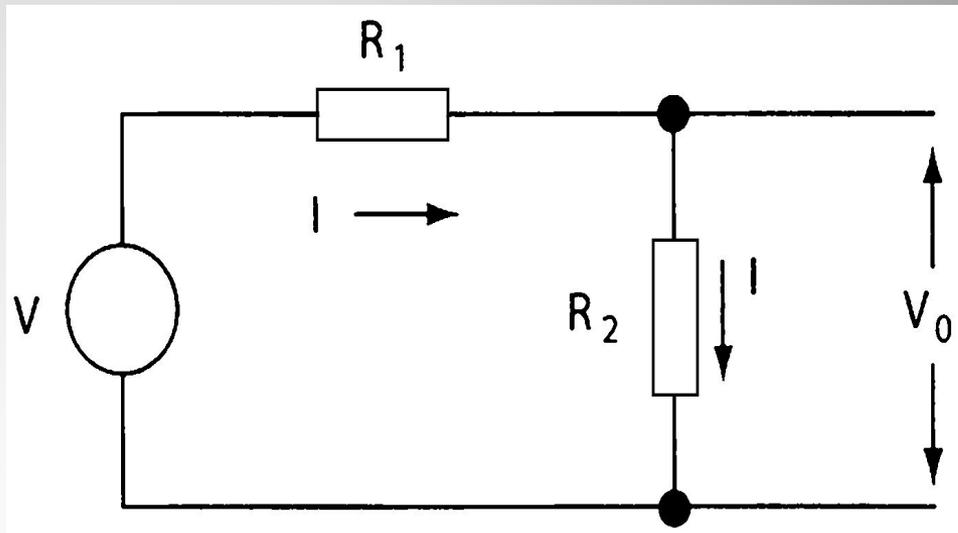
Через все элементы схемы, приведённой на рисунке, течёт один и тот же ток.

Уравнение записанное с использованием закона Ома

$$V = I(R_1 + R_2)$$

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2}$$

$$V_{\text{OUT}} = IR_2.$$

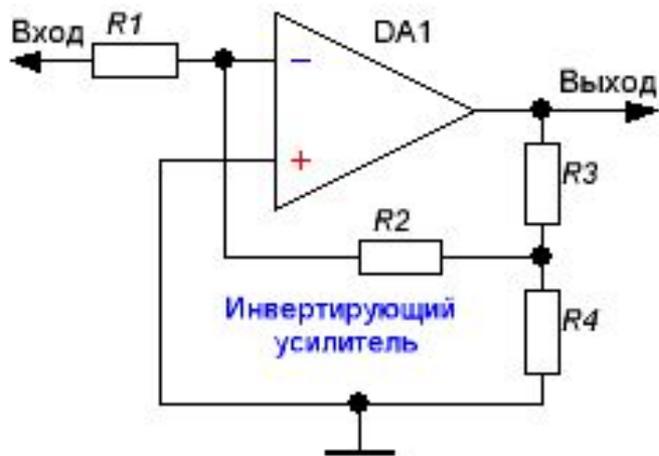


Окончательно получаем

$$V_{\text{OUT}} = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Расчёт делителя напряжения

Подключим инвертирующий усилитель через делитель сопротивления



В данном случае, коэффициент усиления считается по следующей формуле:

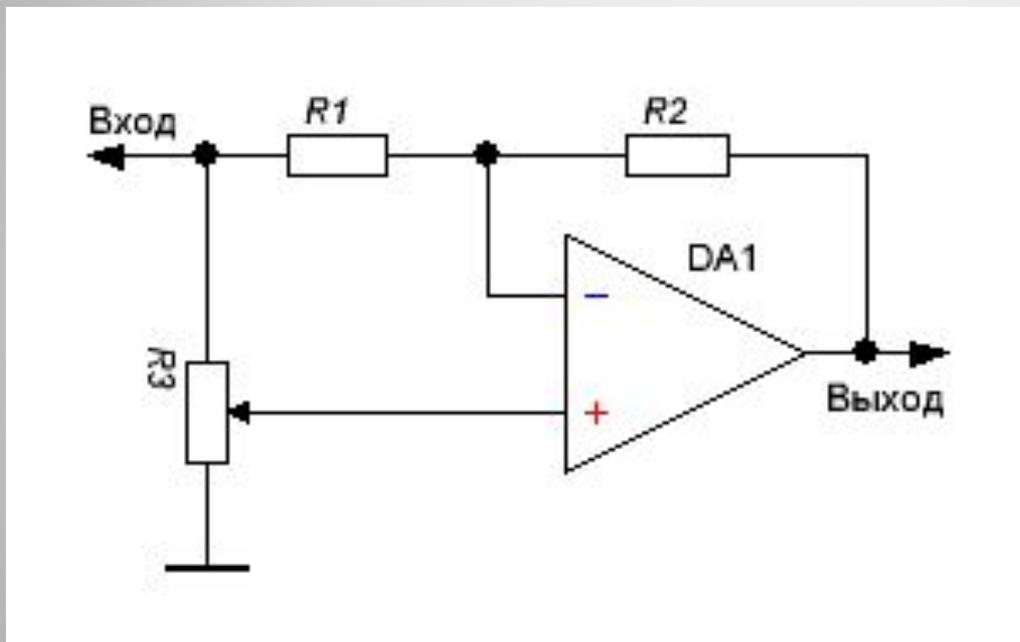
$$K = - \frac{R2(R3 + R4)}{R1 \cdot R4}$$

Это означает, что при том же коэффициенте усиления сопротивление R1 можно увеличить, а значит и повысить входное сопротивление усилителя.

Инвертирующий усилитель с повышенным входным сопротивлением

Примем $R_1=R_2=R_3=R$.

Введем некую переменную A , которая может принимать значения от 1 до 0 в зависимости от поворота движка переменного резистора R_3 .



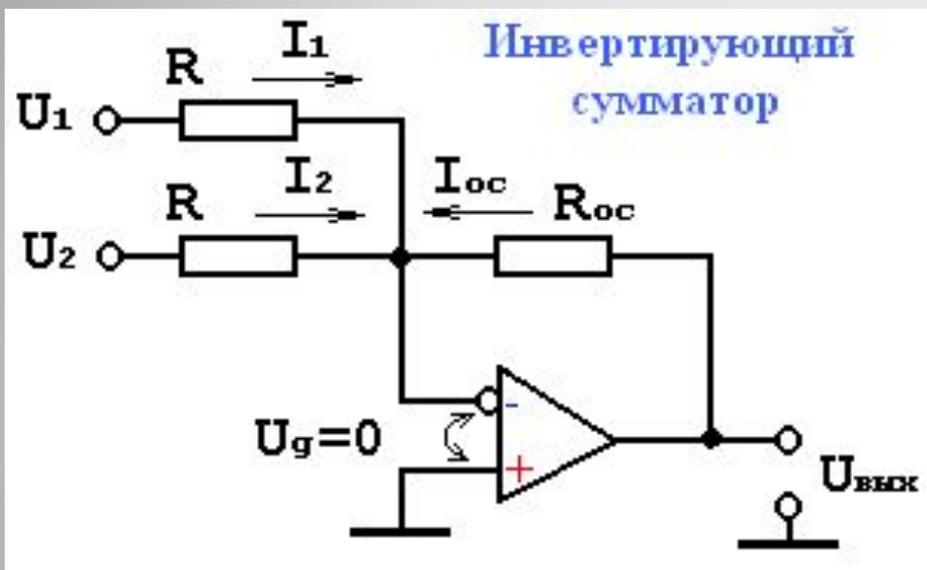
Тогда коэффициент усиления можно определить так:

$$K=2A-1$$

Входное сопротивление практически **не зависит от положения движка** переменного **резистора**.

ОУ с изменяемым коэффициентом усиления

Инвертирующий сумматор формирует алгебраическую сумму двух напряжений и меняет знак на обратный.



$$I_1 + I_2 = I_{oc}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}$$

$$I_{oc} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{oc}}$$

Тогда

$$\frac{U_1}{R} + \frac{U_2}{R} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_{oc}}$$

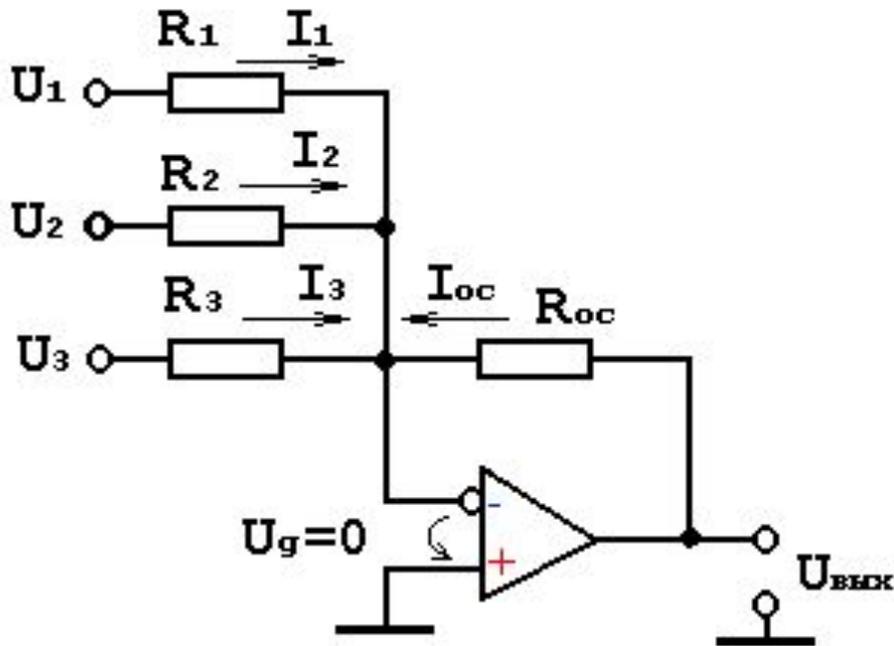
Если $R_1 = R_2 = R_{oc} = R$,

Для n- входов

$$U_{\text{вых}} = - (U_1 + U_2 + \dots + U_n),$$

где n- число входов.

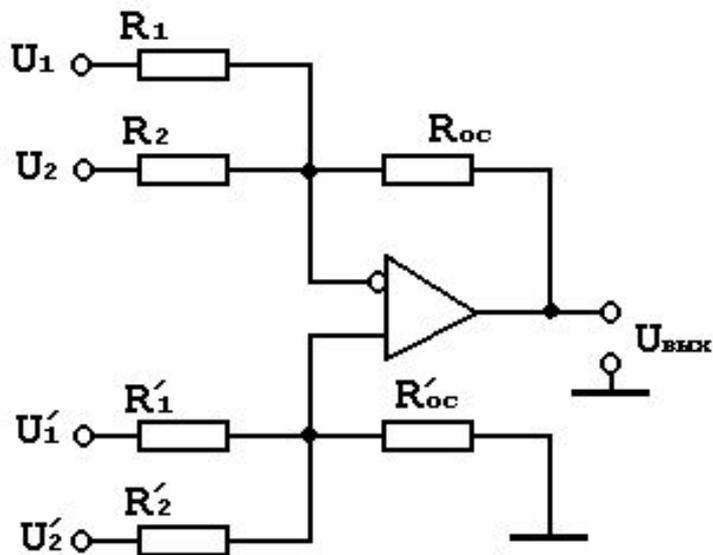
Инвертирующий сумматор



Если отдельным входным напряжениям надо принять различные веса, то используется схема суммирования с масштабными коэффициентами.

$$U_{\text{вых}} = - \left(\frac{U_1 \cdot R_{oc}}{R_1} + \frac{U_2 \cdot R_{oc}}{R_2} + \frac{U_3 \cdot R_{oc}}{R_3} \right)$$

Суммирующая схема с масштабными коэффициентами



Условия необходимые для правильной работы этой схемы:

сумма коэффициентов усиления инвертирующей части схемы была равна сумме коэффициентов усиления ее неинвертирующей части. То есть инвертирующий и неинвертирующий коэффициенты усиления должны быть сбалансированы.

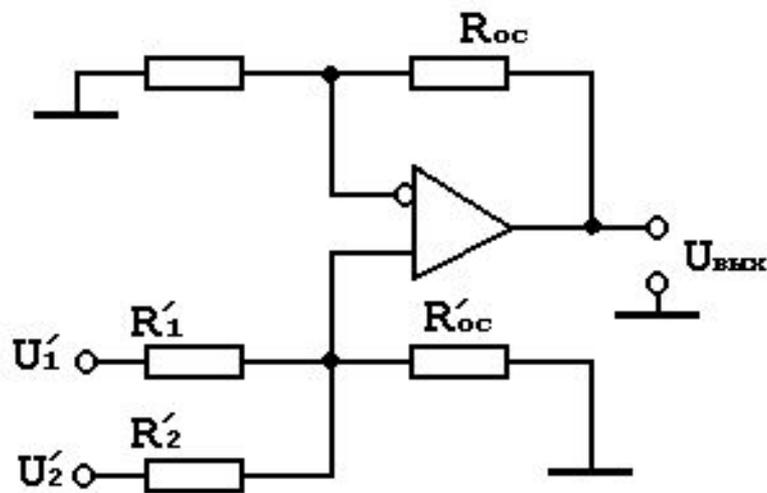
Символически это можно обозначить следующим образом:

$$\frac{R_{oc}}{R_1} + \frac{R_{oc}}{R_2} + \dots + \frac{R_{oc}}{R_m} = \frac{R'_{oc}}{R'_1} + \frac{R'_{oc}}{R'_2} + \dots + \frac{R'_{oc}}{R'_n}$$

где m - число инвертирующих входов, n - число неинвертирующих входов.

$$U_{\text{вых}} = - \left(\frac{U_1 \cdot R_{oc}}{R_1} + \frac{U_2 \cdot R_{oc}}{R_2} + \dots + \frac{U_m \cdot R_{oc}}{R_m} \right) + \left(\frac{U_{m+1} \cdot R'_{oc}}{R'_1} + \frac{U_{m+2} \cdot R'_{oc}}{R'_2} + \dots + \frac{U_{m+n} \cdot R'_{oc}}{R'_n} \right)$$

Схема сложения-вычитания



В данной схеме

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_1 + U_2$$

если

$$U_{\text{вх}} = \frac{R_{oc}}{R_1} \quad U_1 = \frac{R'_{oc}}{R'_1} \quad U_2 = \frac{R'_{oc}}{R'_2}$$

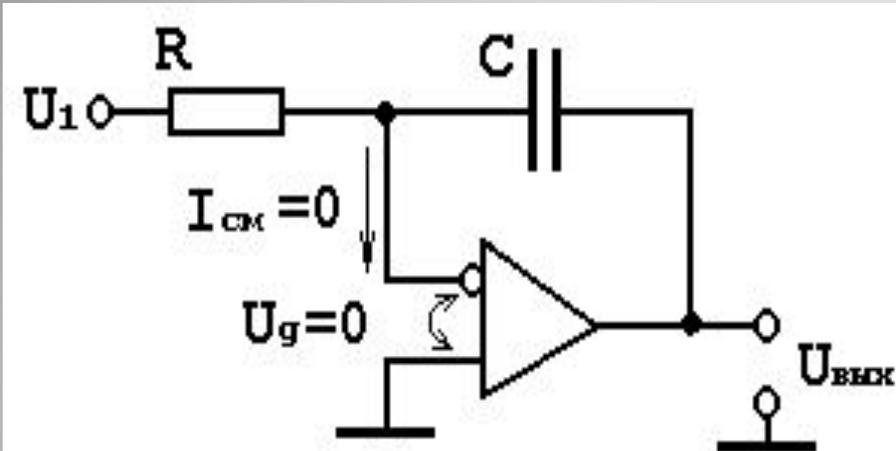
$$R_{oc}' = R_1' = R_2'$$

Можно также осуществить суммирование с весами, при этом обязательно соблюдение условия

$$\frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{R'_{oc}}{R'_1} + \frac{R'_{oc}}{R'_2} + \dots + \frac{R'_{oc}}{R'_n}$$

где n - число входов

Неинвертирующий сумматор



Ёмкость конденсатора равна

$$C = \frac{Q}{U}$$

где Q - электрический заряд,
 U - напряжение, т.е.

$$Q = CU$$

Ток через конденсатор равен

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdU}{dt}$$

$$dU_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC}U_1 dt$$

Так как $U_{\text{д}} = 0$, и $U_c = -U_{\text{вых}}$, можно написать

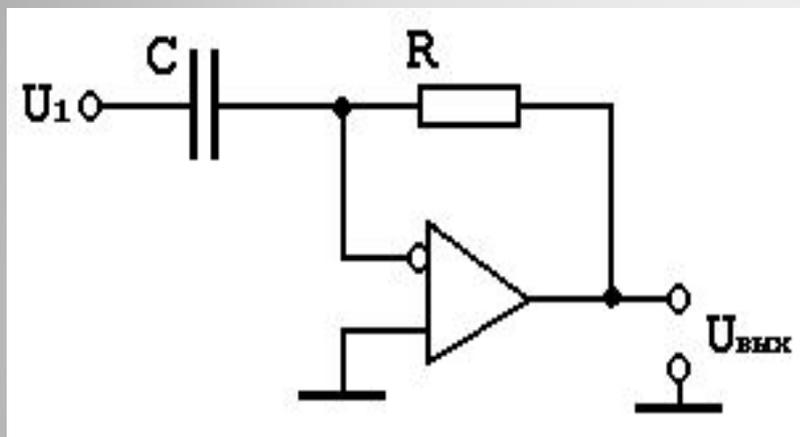
интегрируя его получим

$$I_c = -\frac{CdU_{\text{вых}}}{dt} = \frac{U_1}{R} = I_r$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt$$

Простейший интегратор на ОУ

Поменяв местами резистор и конденсатор в схеме интегратора, получим дифференциатор

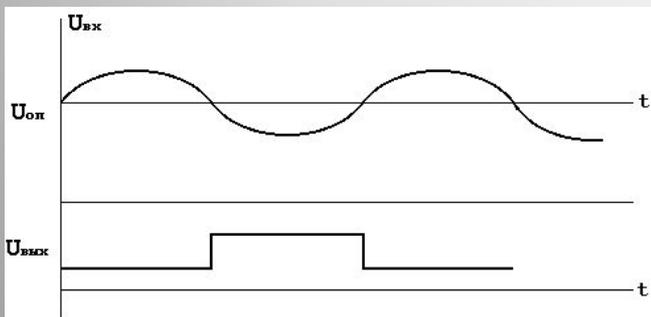
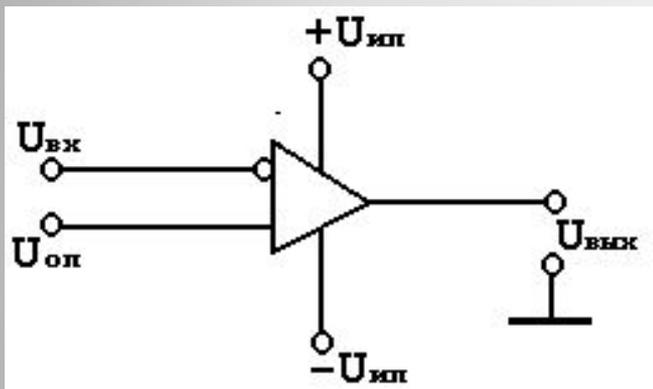


Дифференциатор создает на выходе напряжение, пропорциональное скорости изменения входного

$$U_{\text{вых}} = -RC \cdot \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$$

Дифференциатор на ОУ

Компараторы представляют собой ОУ специального назначения предназначенные для сравнения по уровню двух входных напряжений и скачкообразного изменения входного напряжения в случае, когда одно из сравниваемых напряжений больше другого.



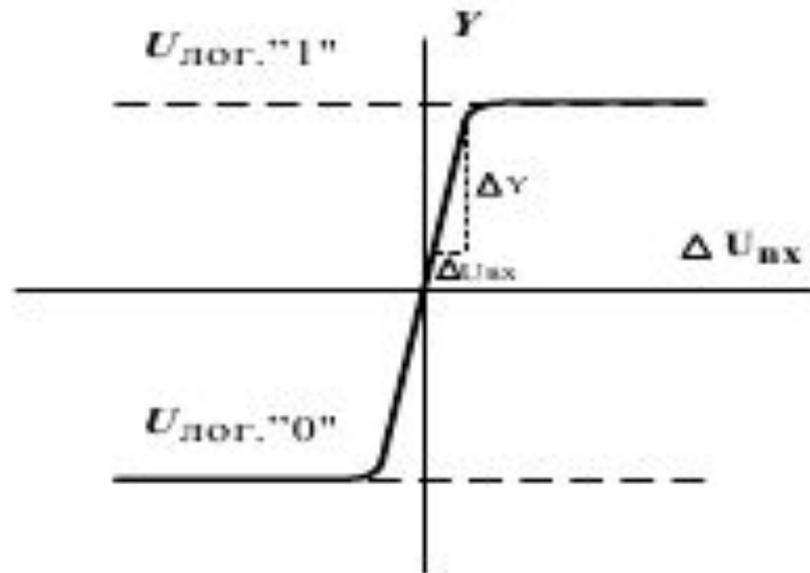
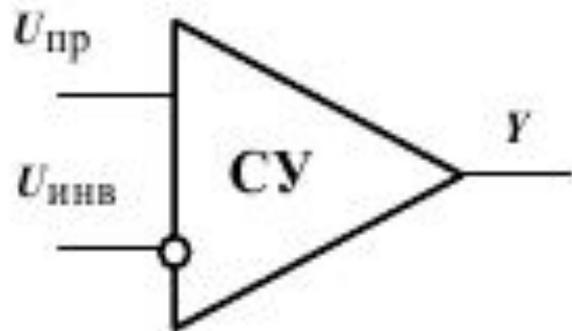
Один вход компаратора соединен с источником опорного напряжения, а на другой подается входной сигнал.

Так как $U_{вх}$ подается на инвертирующий вход, то

выходное напряжение будет мало, когда $U_{вх} > U_{оп}$, и
выходное напряжение будет велико, когда $U_{вх} < U_{оп}$.

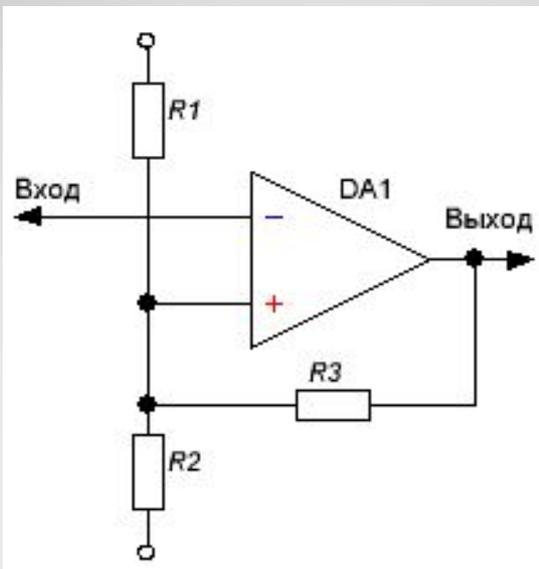
Если желательно, чтобы $U_{вых}$ было велико, когда $U_{вх} > U_{оп}$, то следует поменять порядок присоединения входного напряжения к инвертирующему и неинвертирующему входам компаратора.

Компаратор



$$Y = \begin{cases} U_{\text{лог. "0"}} & \text{при } U_{\text{пр}} < U_{\text{инв}} \\ U_{\text{лог. "1"}} & \text{при } U_{\text{пр}} > U_{\text{инв}} \end{cases}$$

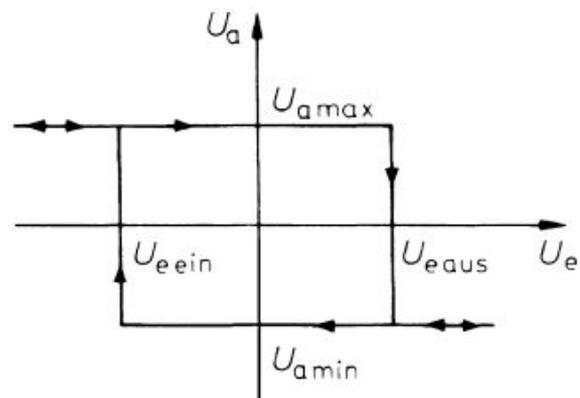
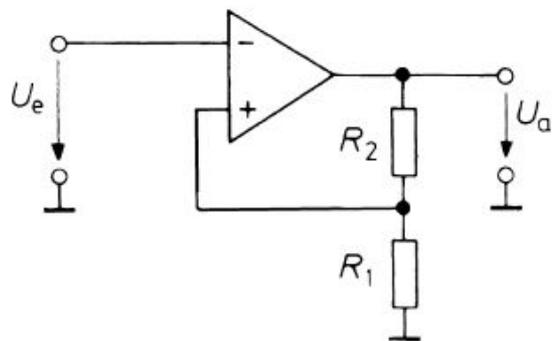
Компаратор



Триггер Шмидта представляет собой практически полный аналог обычного компаратора за исключением одного - положительной обратной связи через резистор $R3$. Эта связь формирует так называемый *гистерезис* - задержку включения и выключения компаратора.

Вернее немного повышает порог включения и немного уменьшает порог выключения. Таким образом, мы можем обеспечить более высокую помехоустойчивость схемы.

Триггер Шмидта



порог включения $U_{e \text{ вкл}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{a \text{ min}};$

порог выключения $U_{e \text{ выкл}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{a \text{ max}};$

гистерезис срабатывания $\Delta U_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{a \text{ max}} - U_{a \text{ min}})$

Инвертирующий триггер Шмитта

Схема бистабильна, только если петлевое усиление

$$g = \frac{A_D R_1}{R_1 + R_2} > 1.$$

Реакция триггера Шмитта на синусоидальное входное напряжение показана на рис. 6.40.

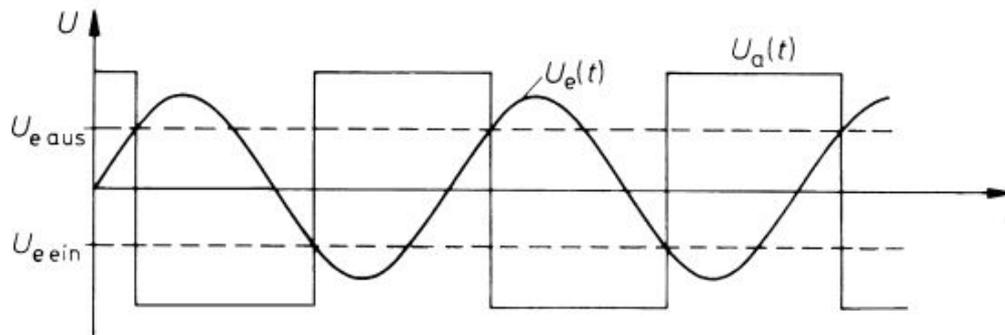
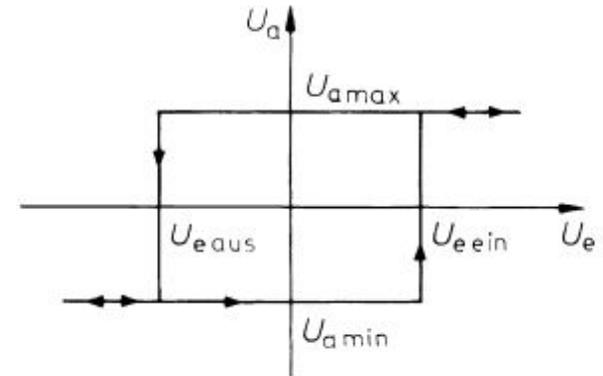
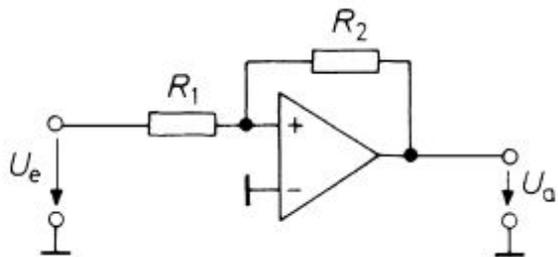


Рис. 6.40. Диаграмма напряжений в инвертирующем триггере Шмитта

Инвертирующий триггер Шмитта



порог включения $U_{e \text{ вкл}} = \frac{R_1}{R_2} U_{a \text{ min}}$;

порог выключения $U_{e \text{ выкл}} = -\frac{R_1}{R_2} U_{a \text{ max}}$;

гистерезис срабатывания $\Delta U_e = \frac{R_1}{R_2} (U_{a \text{ max}} - U_{a \text{ min}})$

Неинвертирующий триггер Шмитта

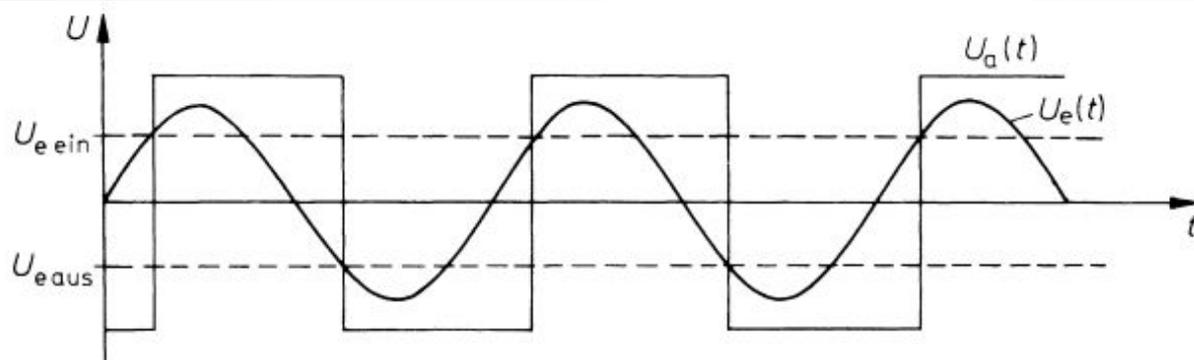
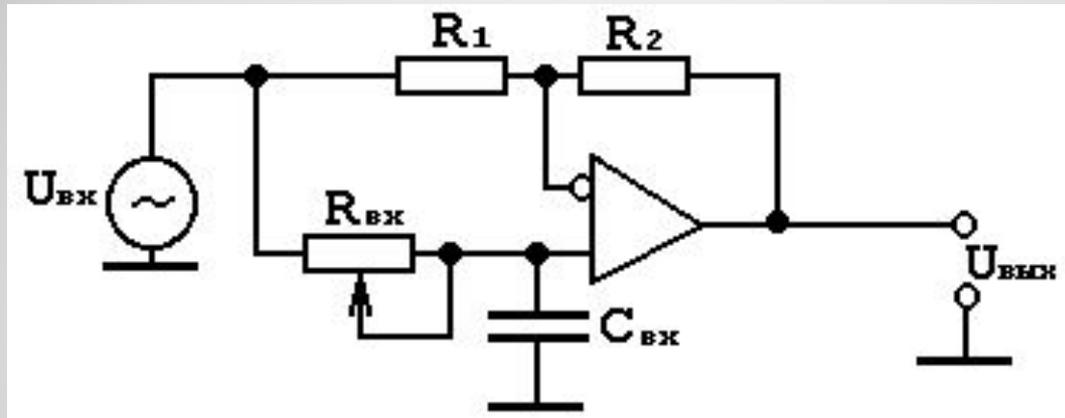


Рис. 6.43. Временная диаграмма напряжений в неинвертирующем триггере Шмитта

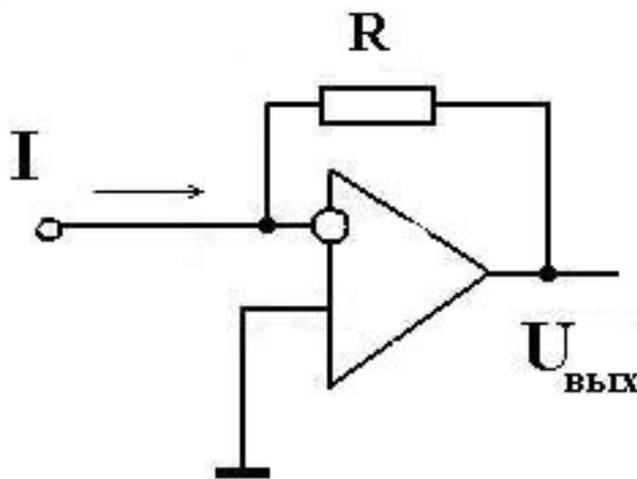
Схема, обеспечивающая идеальный фазовый сдвиг, должна передавать сигнал, не изменяя его амплитуду, но сдвигая его фазу на определенный заданный угол.



На вход фазовращателя подан синусоидальный сигнал $U_{вх}$ частотой 1 кГц и амплитудой 1 В.

Сигнал на выходе $U_{вых}$ имеет ту же частоту и амплитуду, что и входной сигнал, но запаздывает относительно $U_{вх}$ на 90° .

Фазовращатель



Входное напряжение в этой схеме

$$U_{ВХ} = - \frac{U_{ВЫХ}}{K_{УС}} = -I \cdot \frac{R}{K_{УС}}$$

Выходное напряжение

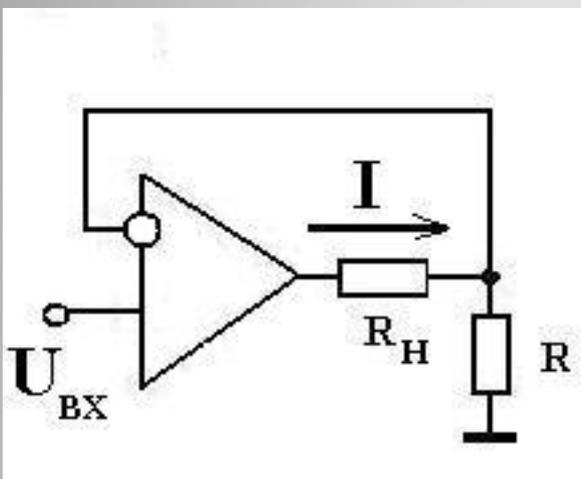
$$U_{ВЫХ} = -I \cdot R$$

- пропорционально **входному току**

Входное сопротивление $R_{ВХ} = \frac{R}{K_{УС}}$ - очень мало и не влияет на схему, в которой проводится измерение тока.

Напряжение на выходе практически не зависит от нагрузки.

Преобразователь ток-напряжение



Ток I , протекающий через резистор нагрузки, не зависит от сопротивления нагрузки R_H , но прямо пропорционален входному напряжению.

Таким образом схема является источником тока (гальваностатом), управляемым напряжением.

Недостатком данной схемы является невозможность заземлить R_H .

Преобразователь напряжение-ток

Генератор - устройство, преобразующее энергию источника постоянного напряжения в энергию колебаний. Генератор, или автогенератор – это самовозбуждающаяся система, в которой энергия источника питания постоянного тока преобразуется в энергию переменного сигнала нужной формы и частоты.

Существуют:

- **генераторы с внешним возбуждением**, в которых незатухающие колебания получают от внешнего источника,
- **генераторы с самовозбуждением (автогенераторы)**, для которых внешний источник не нужен.

По форме колебаний генераторы делятся на

- **гармонические** (синусоидальные) и
- **негармонические** (импульсные).
- **релаксационные** (несинусоидальные).

Генератор

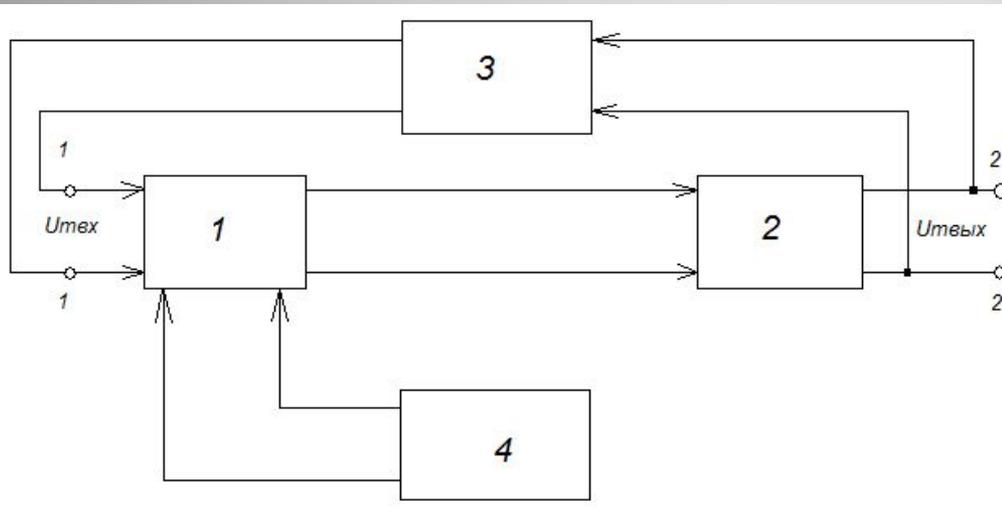


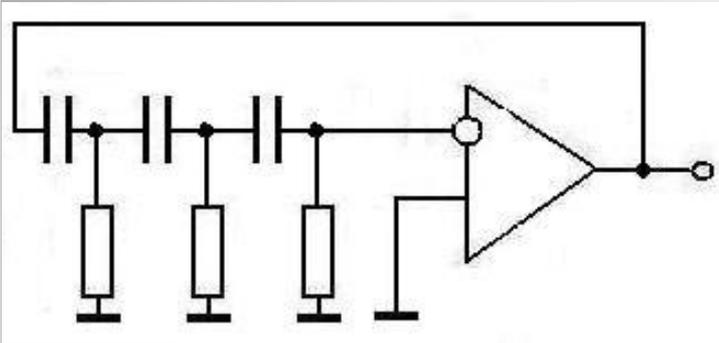
Схема содержит усилительный элемент 1 (электронную лампу или транзистор), нагрузкой которого является колебательная система 2, например, колебательный контур с сосредоточенными параметрами.

Часть напряжения с контура через цепь обратной связи 3 поступает на вход усилительного элемента. Устройство получает питание от источника напряжения 4.

Напряжение свободных колебаний, поступающих через элемент 3 на вход элемента 1, усиливается им и вновь подается на колебательную систему. Это напряжение должно быть после усиления достаточным для компенсации потерь в контуре. Кроме этого, цепь обратной связи должна вызывать такой сдвиг фазы колебаний, поступающих на вход элемента 1, при котором контур будет своевременно, т.е. в такт со свободными колебаниями в нем, получать энергию. При одновременном выполнении указанных условий данное устройство создает (генерирует) незатухающие колебания, т.е. представляет собой автогенератор.

Структурная схема LC-автогенератора

Схема генератора синусоидальных колебаний основана на ОУ, в цепь обратной связи которого включены три фазовращающие RC-цепочки

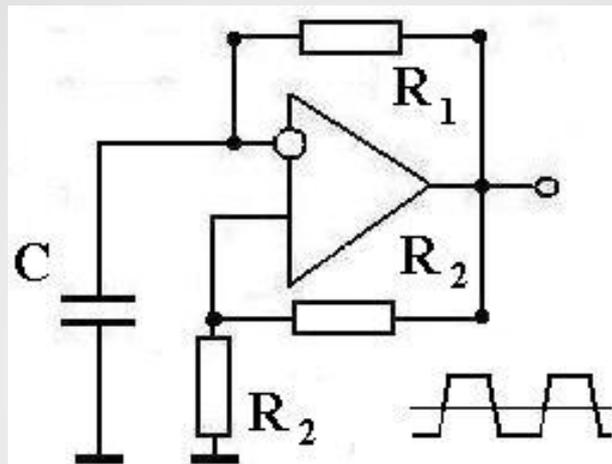


Таким образом получается положительная обратная связь, а частота генерации зависит от номиналов R и C и соответствует сдвигу фаз на π .

Схема будет более стабильной, если в цепи обратной связи будут так называемые T-образные мосты из резисторов и конденсаторов.

RC-генератор синусоидальных колебаний

Генератор прямоугольных импульсов (меандра) можно сделать на базе одного ОУ.

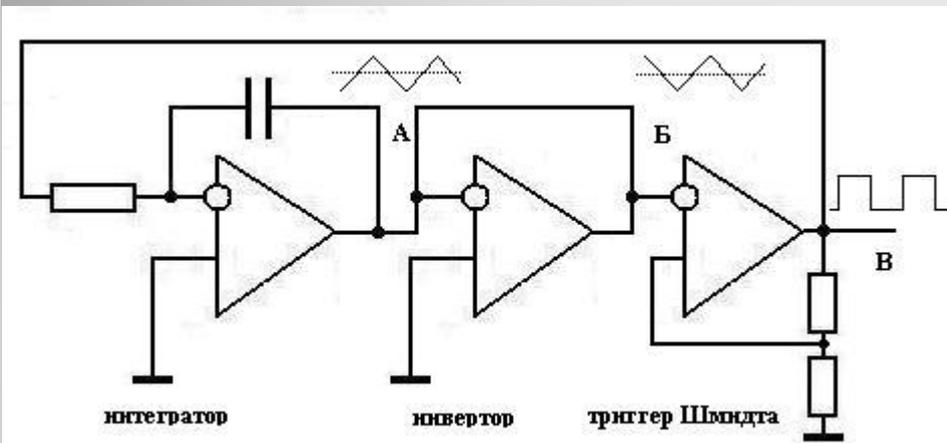


Напряжение на инвертирующем входе растет по мере зарядки конденсатора через резистор R_1 .

Частота генерации рассчитывается как

$$f = \frac{\ln 3}{2 \cdot R_1 \cdot C}$$

Генератор меандра



Схема, представленная на рисунке, состоит из интегратора, инвертора и триггера Шмидта.

Триггер Шмидта, как любой триггер, может находиться в двух устойчивых состояниях с постоянным положительным или отрицательным напряжением на выходе.

Постоянное напряжение с триггера Шмидта поступает на вход интегратора, на выходе которого мы получим линейно нарастающее напряжение. Чтобы переключить триггер Шмидта, полярность управляющего сигнала нужно поменять на противоположную. Для этого служит повторитель, который является инвертирующим усилителем с единичным коэффициентом усиления.

После перехода триггера в противоположное состояние напряжение на интеграторе будет линейно убывать до тех пор, пока опять не сработает триггер. Таким образом, данную схему можно использовать и как генератор треугольных импульсов, так и как генератор прямоугольных импульсов, в зависимости с выхода интегратора, или триггера берется сигнал.

Генератор треугольных импульсов

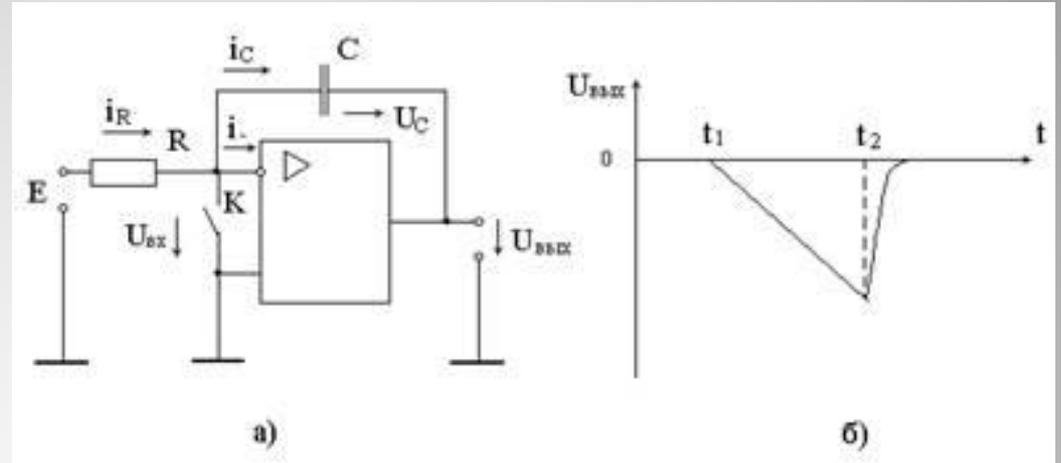
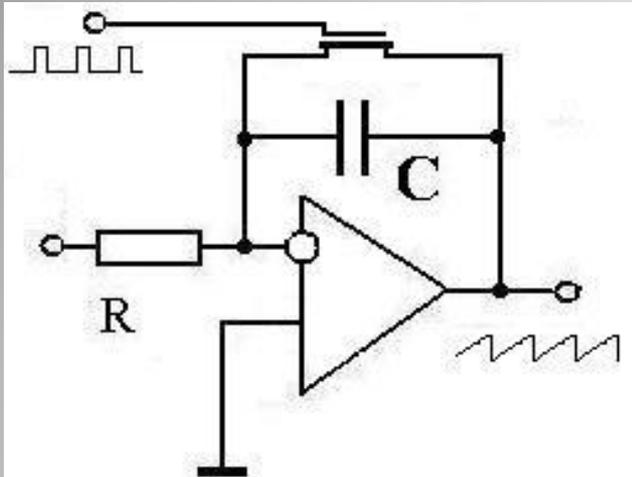


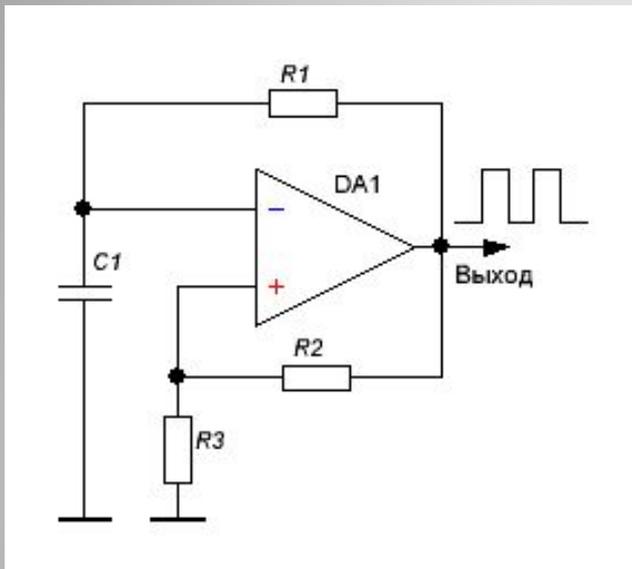
Схема генератора пилообразного напряжения создана на базе интегратора.

Постоянное напряжение на входе преобразуется в линейно нарастающее напряжение на выходе.

При замыкании электронного ключа, выполненного на основе МОП транзистора и управляемого короткими импульсами, происходит сброс выходного напряжения в нуль.

Скорость нарастания и линейность зависит от величин R и C .

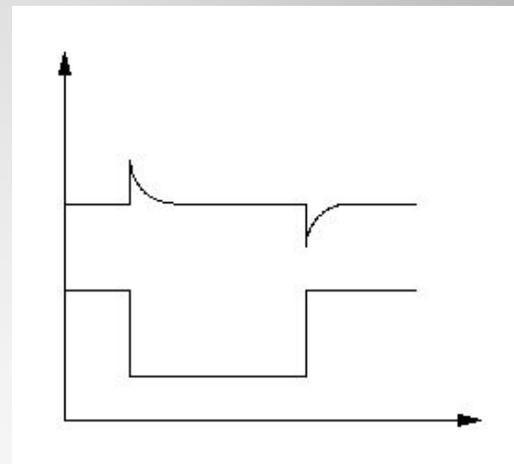
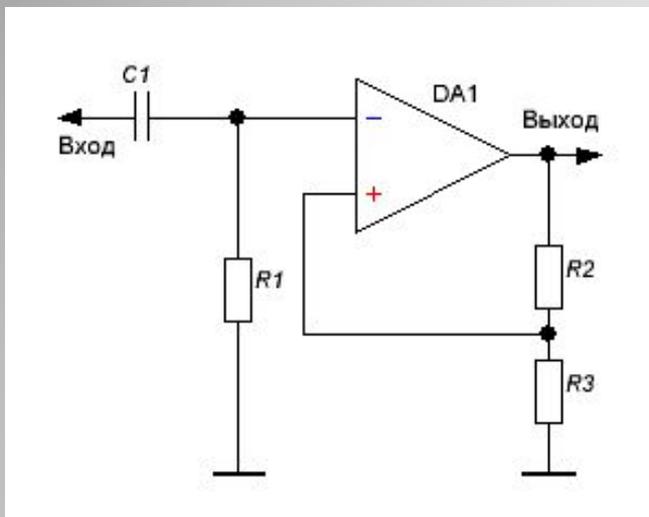
Генератор пилообразного напряжения



Мультивибратор генерирует прямоугольные импульсы с частотой, который можно посчитать по формуле (вернее, посчитаем период, а частота, как известно обратна периоду):

$$T = 2C1R1 \text{Loge} \left(1 + 2 \frac{R2}{R3} \right)$$

Мультивибратор



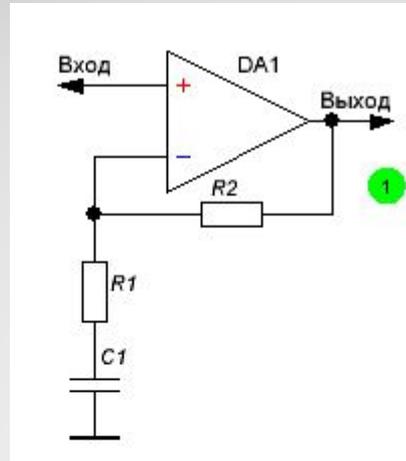
Бистабильный мультивибратор имеет два стабильных состояния, которые характеризуются разным напряжением на его выходе. Переключаются эти самые состояния входными импульсами разной полярности, примерно, как показано на рисунке.

Величина импульса, необходимая для переключения мультивибратора может быть оценена по формуле: и.

$$V = V_0 \frac{R3}{R2 + R3}$$

Где V_0 - напряжение питания.

Бистабильный мультивибратор



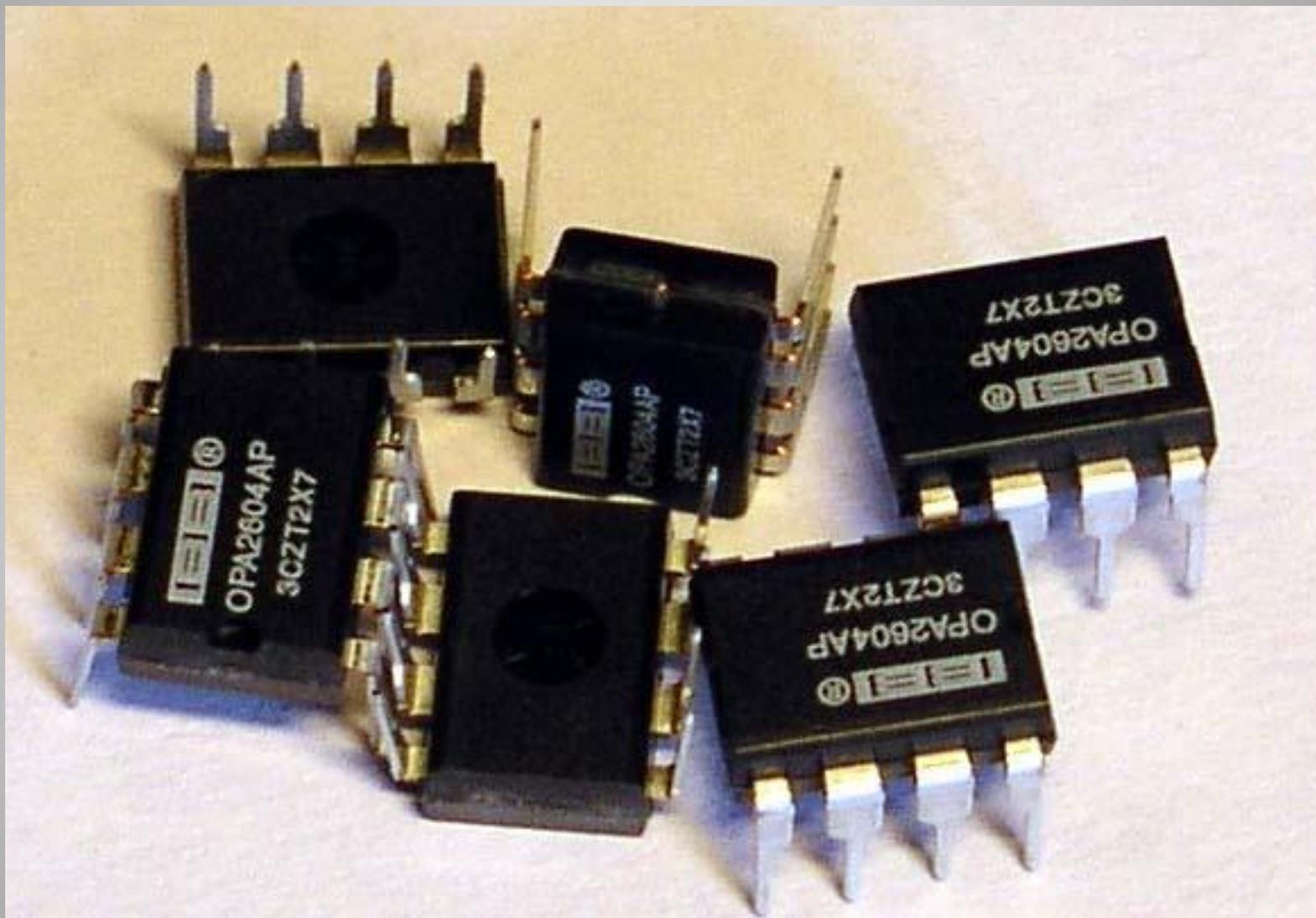
Это фильтр первого порядка с ослаблением ненужного сигнала - крутизной - 6дБ на октаву. Определить частоту среза можно, рассчитывая реактивное сопротивление конденсатора, когда оно станет равным сопротивлению резистора, включенного последовательно с конденсатором.

Формула следующая:

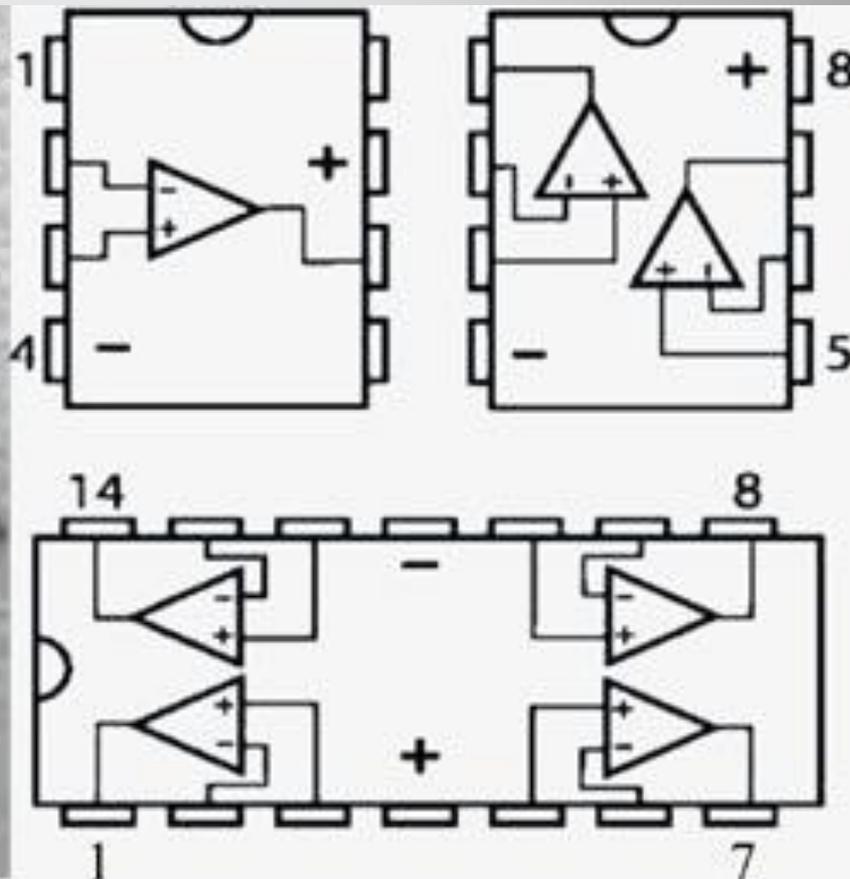
$$E_c = 2\pi fC$$

Где F - частота в Герцах, C - емкость в Фарадах, E_c - сопротивление в Омах.

**Фильтр высоких частот с
неинвертирующим включением ОУ**



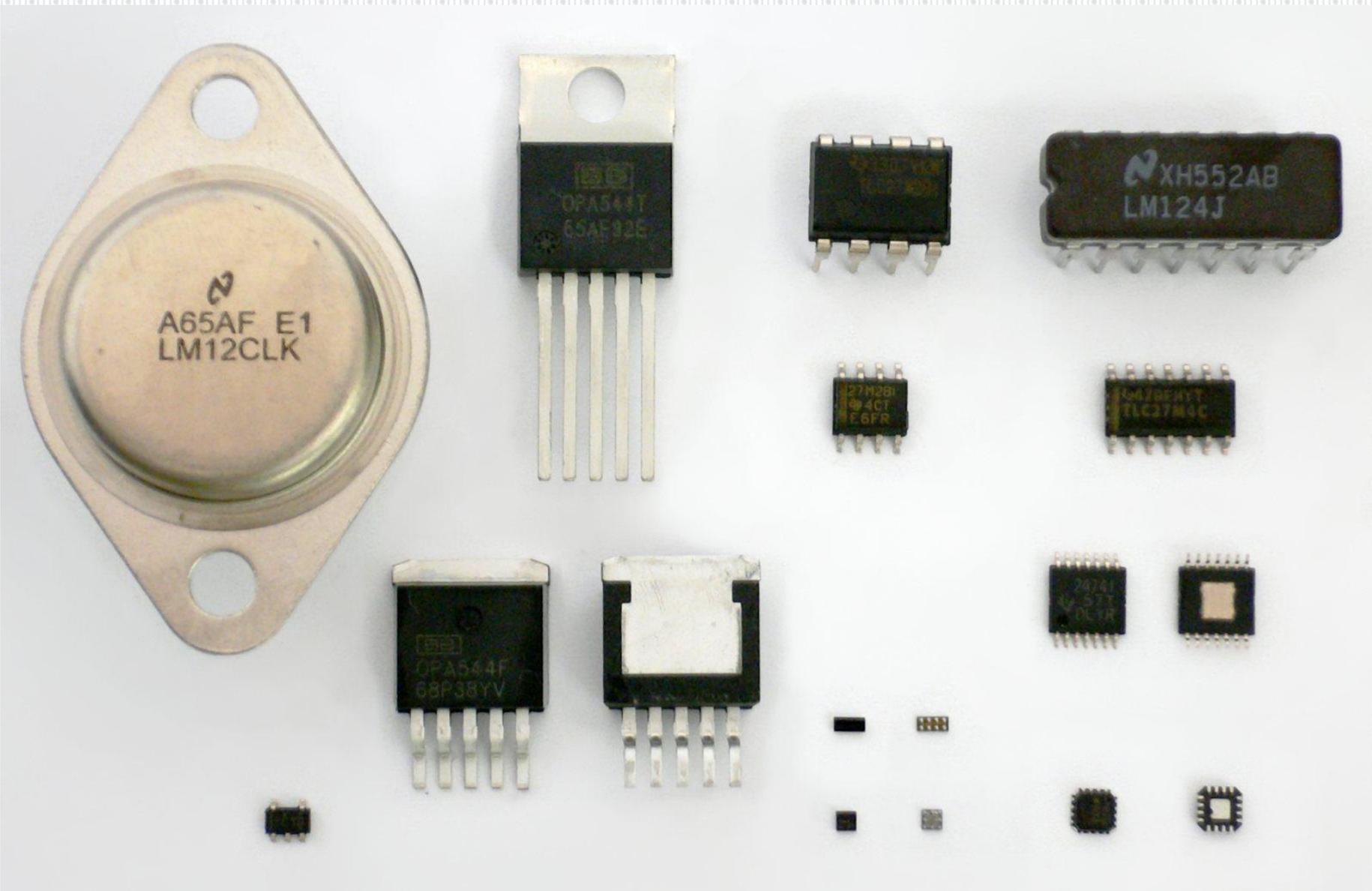
Операционные усилители



Операционные усилители в стандартных корпусах с 14 и 8 выводами



Операционные усилители серии 140



Разные **операционные усилители** в различных корпусах, в том числе несколько в одном корпусе

1. **Операционный усилитель**
2. **Условное обозначение операционного усилителя**
3. **Интегральная микросхема ОУ типа 411.**
4. **Корпус, нумерация выводов.**
5. **Эквивалентная схема замещения операционных усилителей.**
6. **Допущения, принятые при рассмотрении работы идеального ОУ.**
7. **Обратная связь.**
8. **Операционный усилитель с глубокой отрицательной обратной связью.**
9. **Неинвертирующий усилитель.**
10. **Неинвертирующий повторитель.**
11. **Инвертирующее включение ОУ.**
12. **Расчёт делителя напряжения.**
13. **Инвертирующий усилитель с повышенным входным сопротивлением.**
14. **ОУ с изменяемым коэффициентом усиления.**
15. **Инвертирующий сумматор.**
16. **Суммирующая схема с масштабными коэффициентами.**
17. **Схема сложения-вычитания.**
18. **Неинвертирующий сумматор.**
19. **Простейший интегратор на ОУ.**
20. **Дифференциатор на ОУ.**
21. **Компаратор.**
22. **Фазовращатель.**
23. **Преобразователь ток-напряжение.**
24. **Преобразователь напряжение-ток.**
25. **Генератор на ОУ.**
26. **Структурная схема LC-автогенератора.**
27. **RC-генератор синусоидальных колебаний.**
28. **Генератор меандра.**
29. **Генератор треугольных импульсов.**
30. **Генератор пилообразного напряжения.**
31. **Мультивибратор.**
32. **Бистабильный мультивибратор.**
33. **Триггер Шмидта.**
34. **Фильтр высоких частот с неинвертирующим включением ОУ.**
35. **Операционные усилители в стандартных корпусах с 14 и 8 выводами.**
36. **Разные операционные усилители в различных корпусах, в том числе несколько в одном**