

# Применение ОУ в технике автоматического регулирования

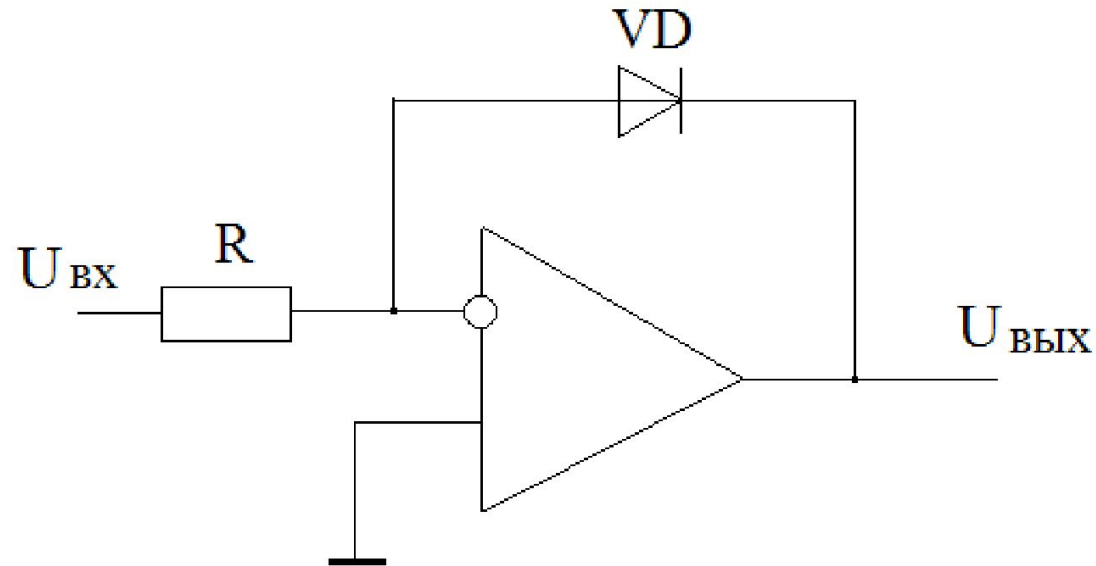
Лекция 8

# Функциональные преобразователи

- $$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$$

## 1. Логарифмический преобразователь

Предназначен для формирования выходного напряжения пропорционального логарифму от входного напряжения.



• При реализации используется формула Эберса-Молла:

$$I = I_{S0} \left( e^{\frac{U_{AK}}{m\varphi_T}} - 1 \right) \quad \text{где } \varphi_T = \frac{q}{kT}$$

$$I = I_{S0} e^{\frac{U_{AK}}{m\varphi_T}}$$

$$I = \frac{U_{ВХ}}{R}; \quad U_{ВЫХ} = U_{AK};$$

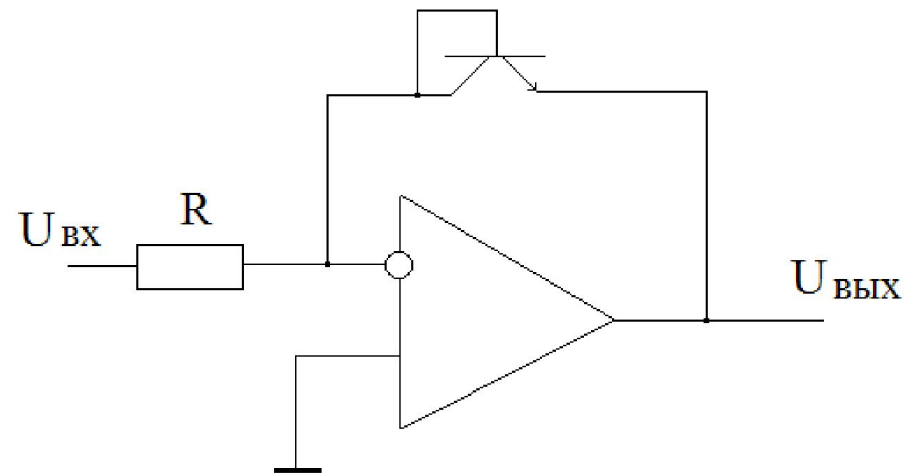
$$I_{S0} e^{\frac{U_{ВЫХ}}{m\varphi_T}} = \frac{U_{ВХ}}{R};$$

логарифмируем обе части уравнения;

$$U_{ВЫХ} = -m\varphi_T \ln \frac{U_{ВХ}}{I_{S0} R} = -K \ln U_{ВХ}$$

- Главный недостаток заключается в использовании диода в цепи обратной связи, так как в формуле Эберса-Молла присутствует множитель  $m$ , который изменяет свое значение от 1 до 2 при изменении величины протекающего тока.

Для повышения точности логарифмической характеристики вместо диода целесообразно использовать транзистор в диодном включении, у которого величина  $m = 1 = const$  при любых значениях тока.



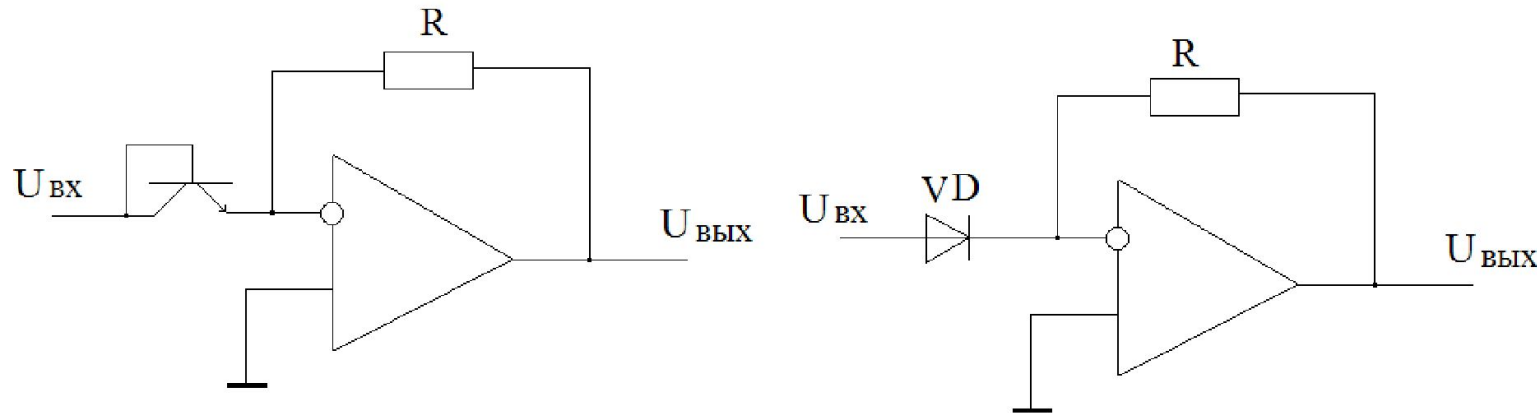
- Зависимость примет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\varphi_T \ln \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{S0} R}$$

Необходимо заметить, что при  $U_{\text{ВХ}} > 0$  выходное напряжение изменяется от 0 до отрицательного напряжения на полностью открытом р-п переходе транзистора или диода ( -0,6 В)

# Антилогарифмический усилитель

- Если переставить местами транзистор (или диод) с резистором, получим антилогарифмический усилитель



Для схемы, в которой во входной цепи использован транзистор, ток во входной цепи определяется по формуле Эберса – Молла:

$$I = I_{S0} e^{\frac{U_{ВХ}}{\varphi T}}$$

весь этот ток проходит через R, создавая при этом напряжение на выходе схемы

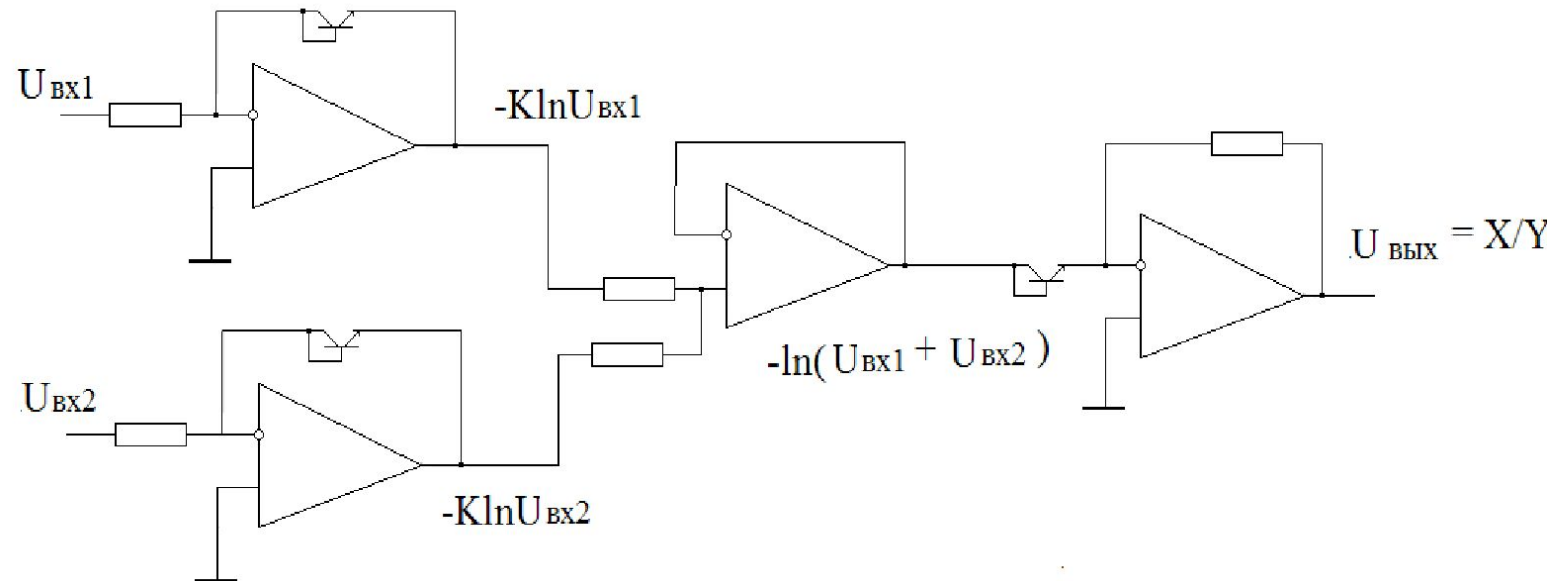
Т.е.

$$U_{\text{ВЫХ}} = R * I_{S0} e^{\frac{U_{\text{ВХ}}}{\varphi T}}$$

Используя логарифмические и антилогарифмические преобразователи можно реализовать умножители и делители аналоговых сигналов

При этом используются известные тождества:

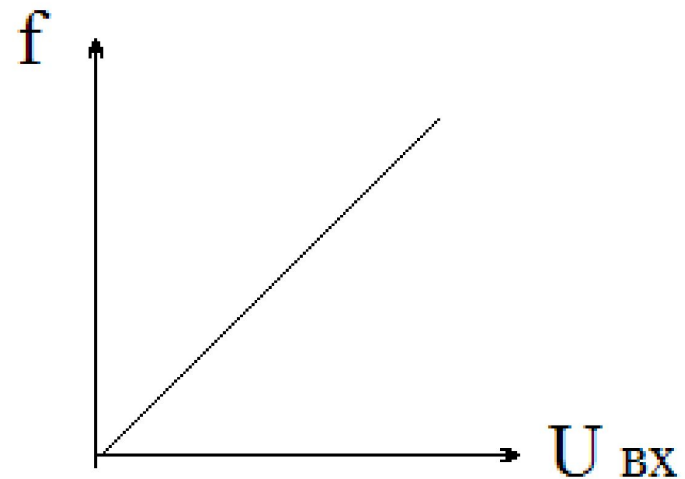
$$e^{\ln X + \ln Y} = X * Y, \quad e^{\ln X - \ln Y} = \frac{X}{Y}$$



Если в схеме заменить сумматор на вычитающее устройство получим делитель входных сигналов.

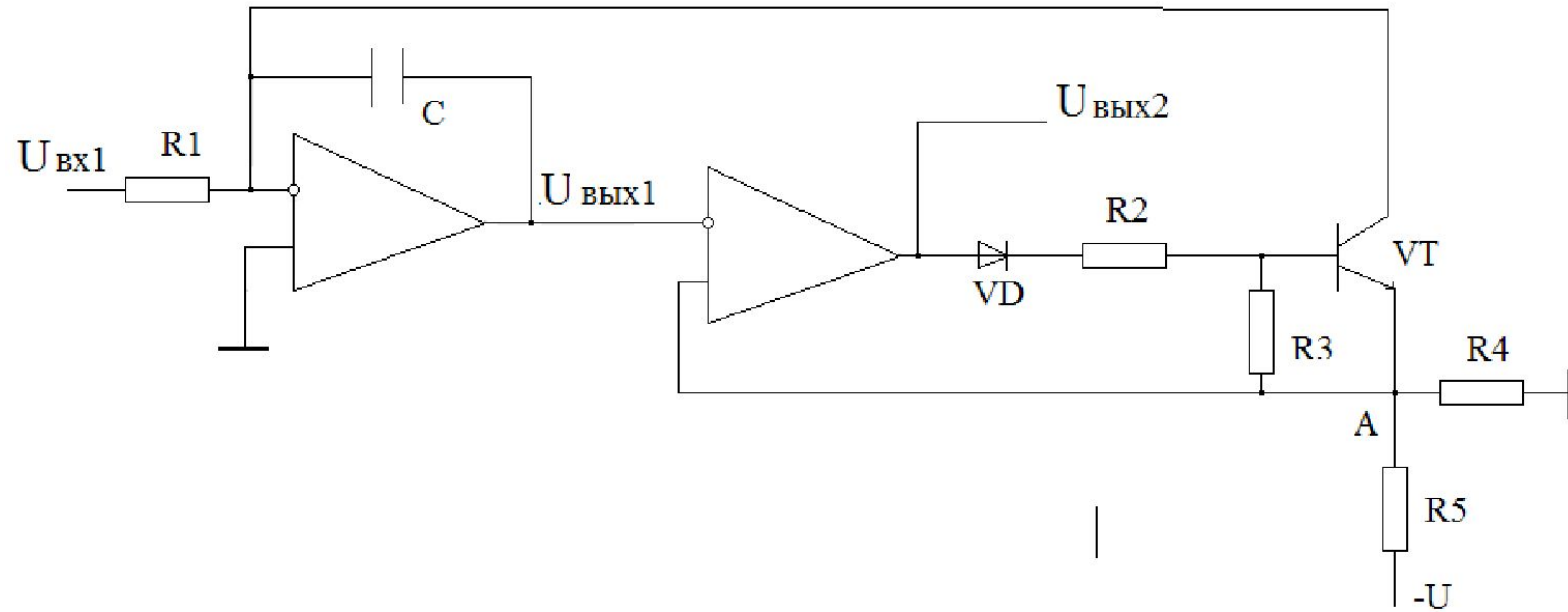
# Преобразователь напряжения в частоту

Важным параметром такого преобразователя является линейная зависимость частоты выходного сигнала от величины входного напряжения





- Схема состоит из интегратора и компаратора.



$$U_A = \frac{-U * R_4}{R_5 + R_4};$$

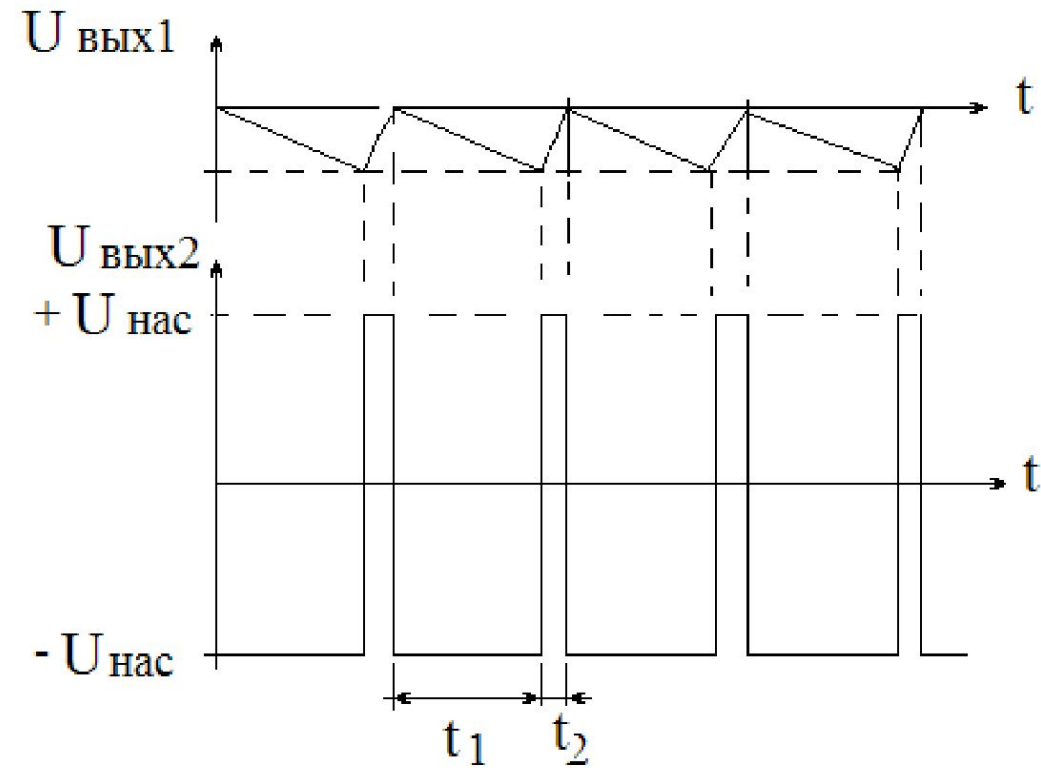
поэтому в момент включения, когда конденсатор разряжен  $U_{\text{вых2}} = -U_{\text{нас}}$ .

- Диод VD закрыт и, соответственно, транзистор VT находится в состоянии отсечки. При подаче на вход схемы постоянного напряжения  $U_{\text{ВХ}} > 0$  выходное напряжение интегратора  $U_{\text{ВЫХ1}}$  стремится к  $-U_{\text{нас}}$ , но как только  $|U_{\text{ВЫХ1}}| > |U_A|$  компаратор изменит свое состояние на противоположное  $+U_{\text{нас}}$ .

Диод и транзистор перейдут в открытое состояние, и конденсатор интегратора будет разряжаться через открытый транзистор.

Поскольку транзистор будет находиться в состоянии отсечки на нем будет присутствовать падение напряжения -0,2 В. И поскольку  $R_1 > R_5$  разряд конденсатора будет проходить быстрее заряда.

Процессы происходящие в схеме поясняются осциллограммой.



- $$U_{\text{ВЫХ1}} = \frac{1}{R_1 C} \int_0^{t_1} U_{\text{ВХ}} dt = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 C} * t_1;$$

Очевидно, что  $U_{\text{ВЫХ1}}$  возрастает до значения  $U_A$

Поэтому

$$t_1 = \frac{U_A}{U_{\text{ВХ}}} * R_1 C$$

С учетом того что  $t_1 \gg t_2$   $T \cong t_1;$

Отсюда:  $f = \frac{1}{T} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_A R_1 C}$

# Пиковый детектор

Предназначен для регистрации максимального, за некоторый отрезок времени входного сигнала.

Пиковые детекторы могут работать в двух режимах:

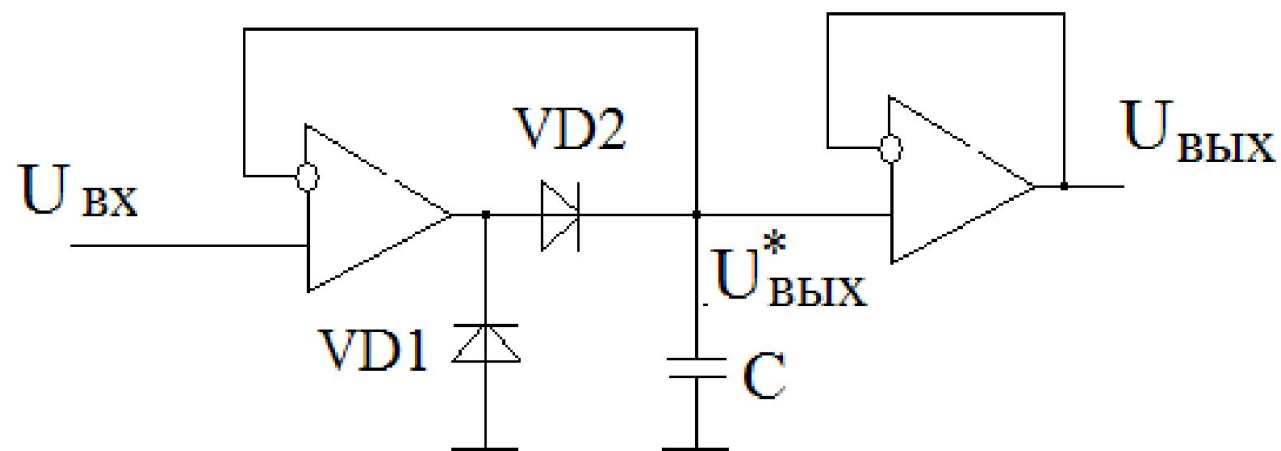
Режиме слежения

Режиме хранения.

В режиме слежения выходное напряжение детектора следует за входным напряжением до тех пор, пока оно не начнет снижаться. В этот момент детектор переходит в режим хранения.

Практически идеальный пиковый детектор удастся реализовать с помощью ОУ.

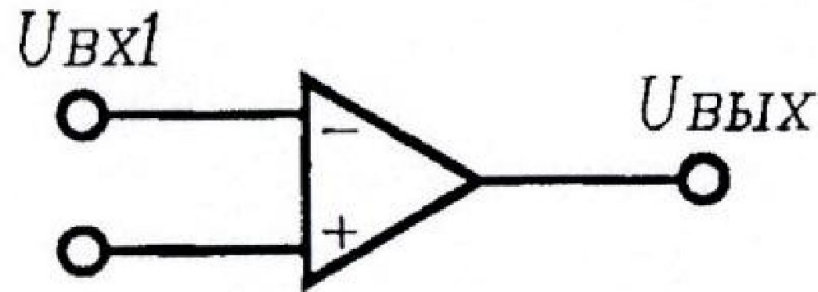
Схема пикового детектора состоит из диода на ОУ и повторителя напряжения.



По мере роста входного напряжения пиковый детектор находится в режиме слежения, но как только входное напряжение начнет снижаться, диод VD2 закроется, конденсатор C сохранит максимальное значение напряжения.

# Измерительные усилители

Измерительный, или инструментальный, усилитель — это устройство с дифференциальным входом. Усилитель строится так, что он усиливает только разность напряжений, поданных на его входы ( ) и не реагирует на синфазное входное напряжение . Для большинства микросхем измерительных усилителей коэффициент усиления (передачи) по напряжению находится между 1 и 1000.



$$U_{ВЫХ} = K_u(U_{ВХ1} - U_{ВХ2})$$

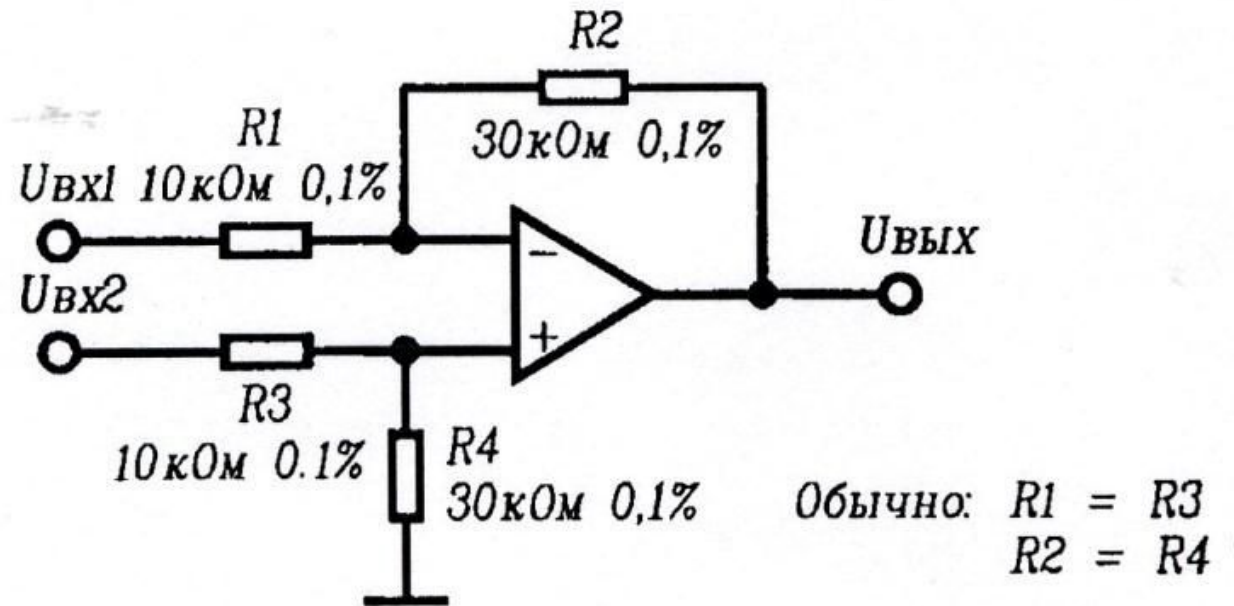
Идеальный измерительный усилитель обладает следующими характеристиками:

- постоянный коэффициент усиления, не зависящий от времени, частоты и амплитуды входного сигнала, сопротивления нагрузки, температуры и влажности;
- бесконечный коэффициент подавления синфазного напряжения и изменений напряжения питания;
- нулевые входное и выходное напряжения смещения и дрейфы этих смещений;
- нулевой выходной импеданс при любых амплитудах сигнала, от-даваемого усилителем в нагрузку.

Обычно инструментальный усилитель служит первым каскадом измерительной или преобразовательной схемы, где основным требованием является точность



# Измерительный усилитель на одном операционном усилителе



Недостатки этой схемы:

Этот усилитель должен иметь не большой коэффициент усиления, при котором он хорошо ослабляет синфазную помеху.

Схема обладает малым входным сопротивлением  $R1+R3=20$  КОм

Резисторы R3 и R4 действуют как делитель напряжения для неинвертирующего входа операционного усилителя (ОУ).

Благодаря обратной связи через резисторы R1 и R2 и очень большому внутреннему коэффициенту усиления ОУ напряжение на инвертирующем входе усилителя поддерживается равным напряжению на неинвертирующем входе.

Отношение  $R2/R1$  определяет коэффициент передачи усилителя. Когда

$$R1/R2 = R3/R4$$

усиление дифференциального сигнала намного больше усиления синфазного сигнала, и коэффициент ослабления синфазного напряжения (КОСС) будет максимальным.

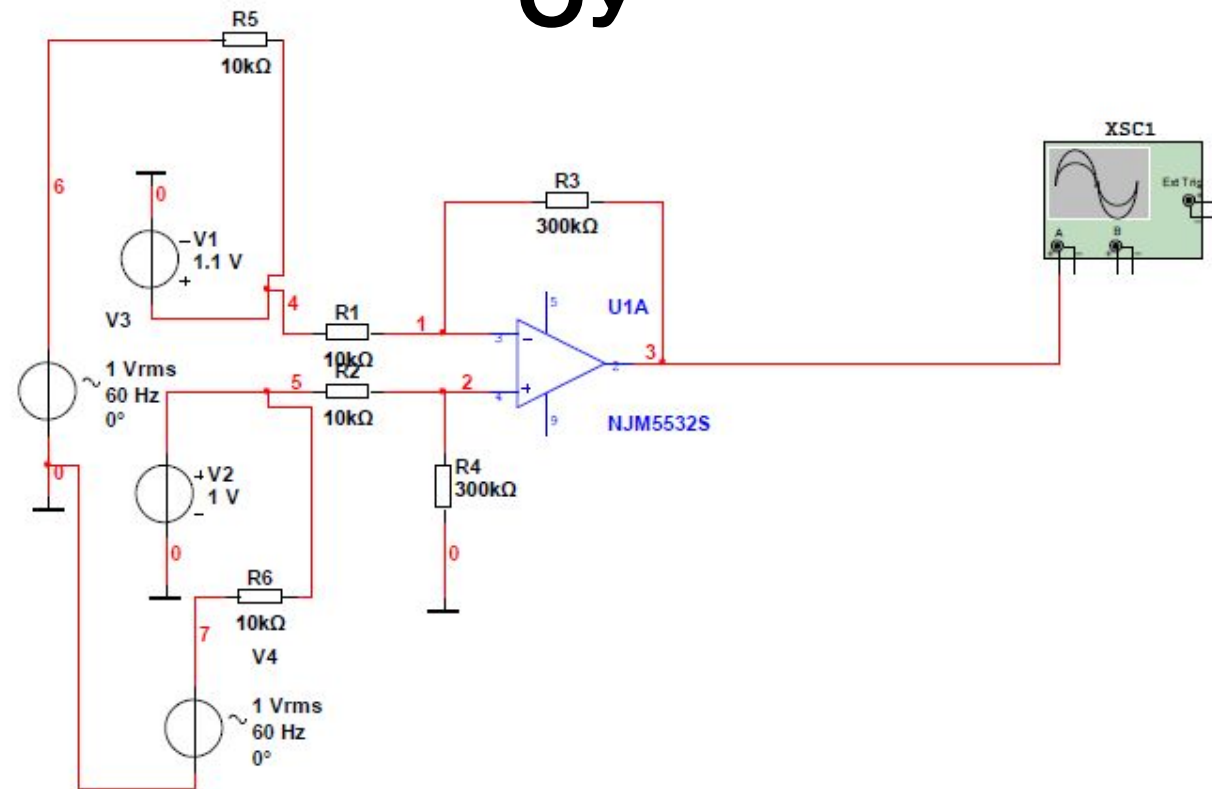
Для указанных значений резисторов дифференциальный коэффициент усиления равен 3, а КОСС равен 1000, т.е. 60 дБ.

Представленная схема имеет низкое входное сопротивление (в данном случае около 20 кОм) и предназначена для подключения низкоомных источников сигналов. Подача сигнала от высокоомного источника приведет к потерям из-за шунтирования входного сигнала и ухудшению подавления синфазного напряжения.

Увеличение значений входных резисторов повышает входное сопротивление, но при этом увеличивается дрейф смещения из-за нестабильности входных токов смещения, сужается ширина полосы пропускания из-за влияния паразитных емкостей, и повышается уровень шумов.

Сопротивления резисторов R1 и R2 приходится выбирать, идя на компромисс между входным сопротивлением, влиянием входных и шумовых токов и шириной полосы пропускания.

# Схема моделирования измерительного усилителя на 1 ОУ



$$K_u = U_{\text{ex2}} / (U_{\text{ex2}} - U_{\text{ex1}}) = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{A_v}\right)} = \frac{300}{10} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{300}{10} \cdot 0\right)} = 30$$

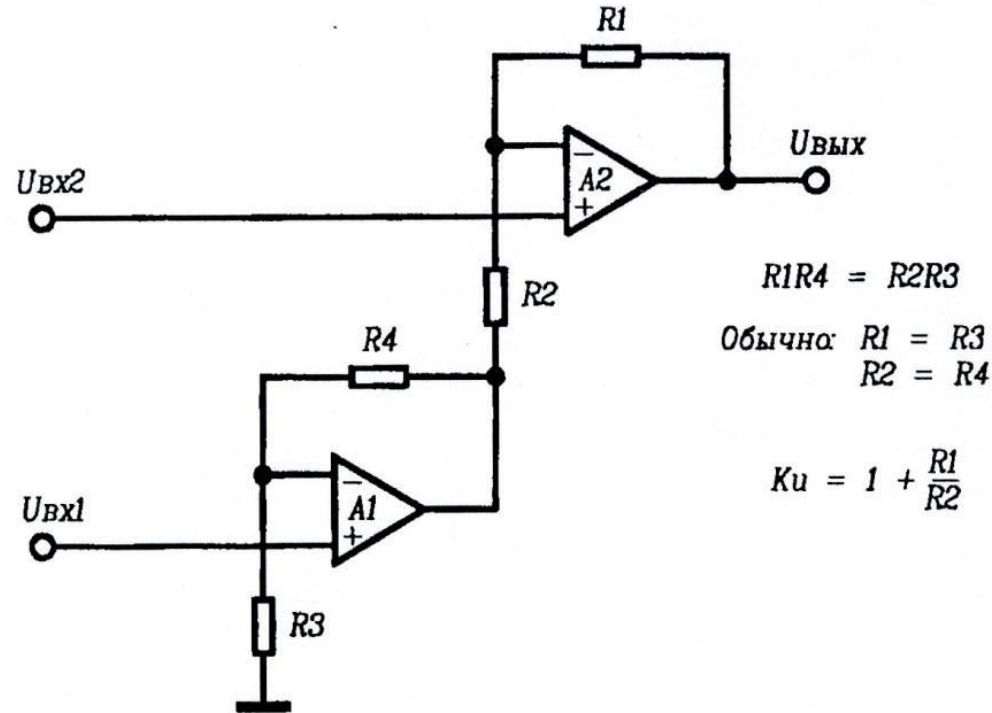
$$K_{c\phi 1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} = \frac{10 \cdot 300 - 300 \cdot 10}{10 \cdot (310)} = 0$$

$$K_{c\phi 2} = \frac{300}{10 \cdot 1000} = 0.03$$

$$KOCC = \frac{K_u}{K_{c\phi 1} + K_{c\phi 2}} = \frac{30}{0.3} = 10$$

$$R_{\text{ex}\partial u\phi} = R_1 + R_3 = 20 \text{кОм}$$

# Измерительные усилители на двух операционных усилителях



Оба ОУ включены как неинвертирующие усилители, причем первый из них изменяет уровень опорного напряжения второго усилителя А2.

Выходной сигнал усилителя А1 подается на инвертирующий вход А2, поэтому усилитель А2 усиливает дифференциальный входной сигнал ( $U_{вх2}-U_{вх1}$ ). Такая схема обеспечивает намного больший входной импеданс, чем схема с одним ОУ.

Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_u = 1 + R_1/R_2$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

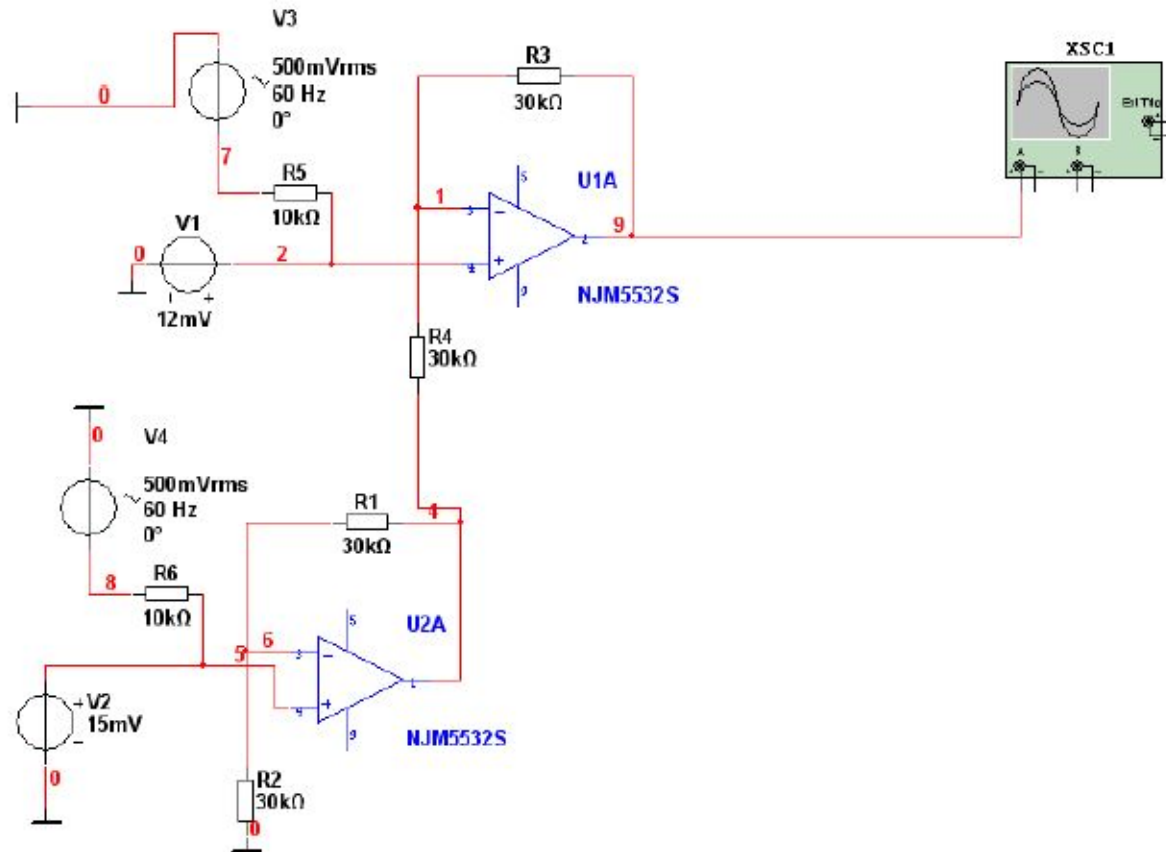
$$K_{сф} = (R_1 R_4 - R_2 R_3) / R_3 R_2 = 1 - \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

Следовательно, при  $R_1/R_2 = R_3/R_4$

$$K_{сф} = 0$$

Отметим, что эта схема имеет низкое входное сопротивление (примерно равное сопротивлению  $R_1$ ); коэффициент передачи изменяется пропорционально сопротивлению резистора  $R_3$ .

# Схема моделирования измерительного усилителя на 2 ОУ

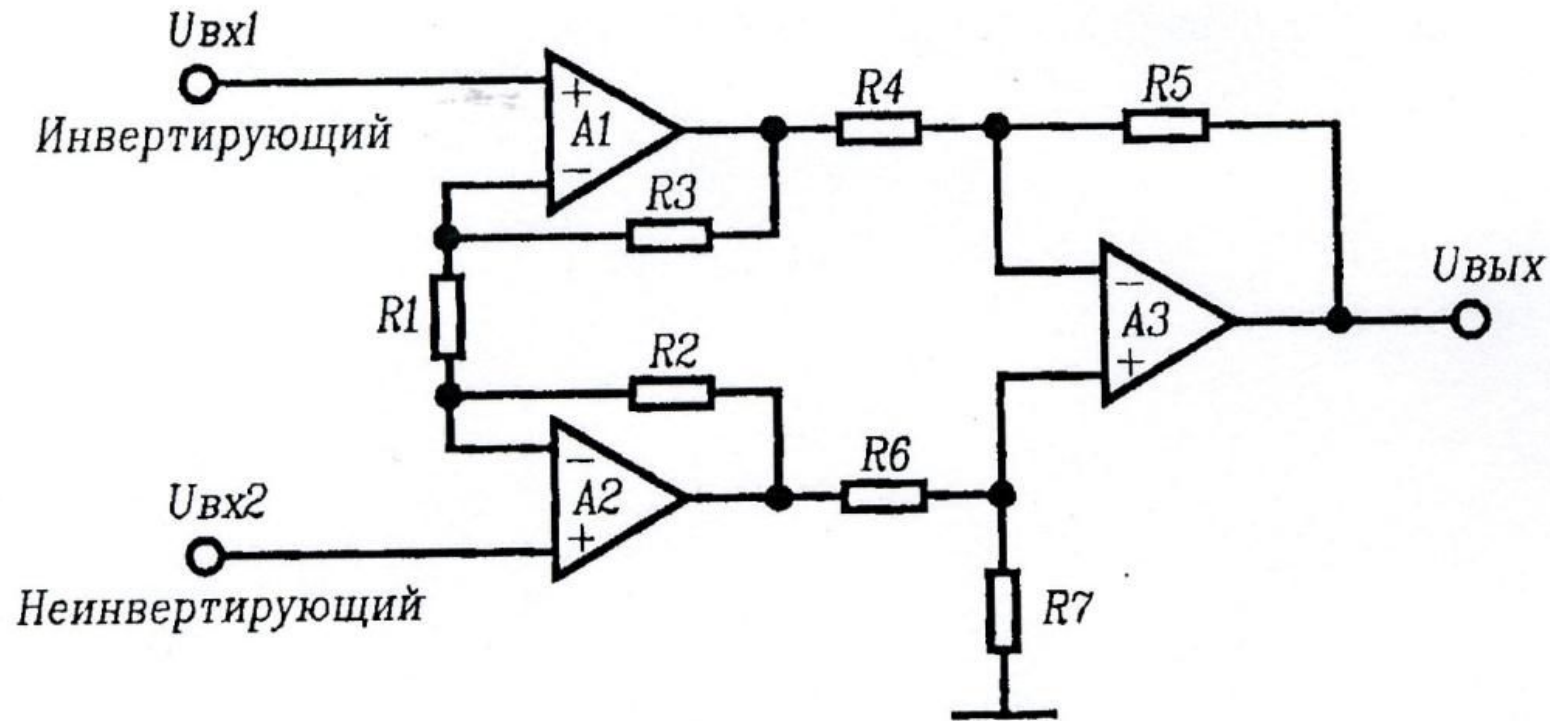


$$K_u = 1 + R_1/R_3 = 2$$

$$R_1/R_2 = R_3/R_4 \text{ следовательно } K_{сф} = 0$$



# Измерительные усилители на трех операционных усилителях



Первый каскад, состоящий из усилителей А1 и А2, усиливает дифференциальный сигнал в  $(R_1+R_2+R_3)/R_1$  раз, и коэффициент передачи для синфазного напряжения равен 1.

Следовательно, дифференциальный сигнал увеличивается на выходах А1 и А2 без увеличения синфазного сигнала.

Второй каскад, выполненный на ОУ А3, в дифференциальном включении усиливает дифференциальный сигнал в  $R_5/R_4$  раз.

Такая схема имеет более высокий входной импеданс и обеспечивает большее усиление и лучший КОСС по сравнению со схемами на одном ОУ. Кроме того, величина КОСС менее чувствительна к точности подбора резисторов.

Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_u = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4}$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала (из-за разбаланса резисторов):

$$K_{сф1} = (R_7R_4 - R_5R_6) / R_4(R_6 + R_7)$$

Для получения максимального КОСС:

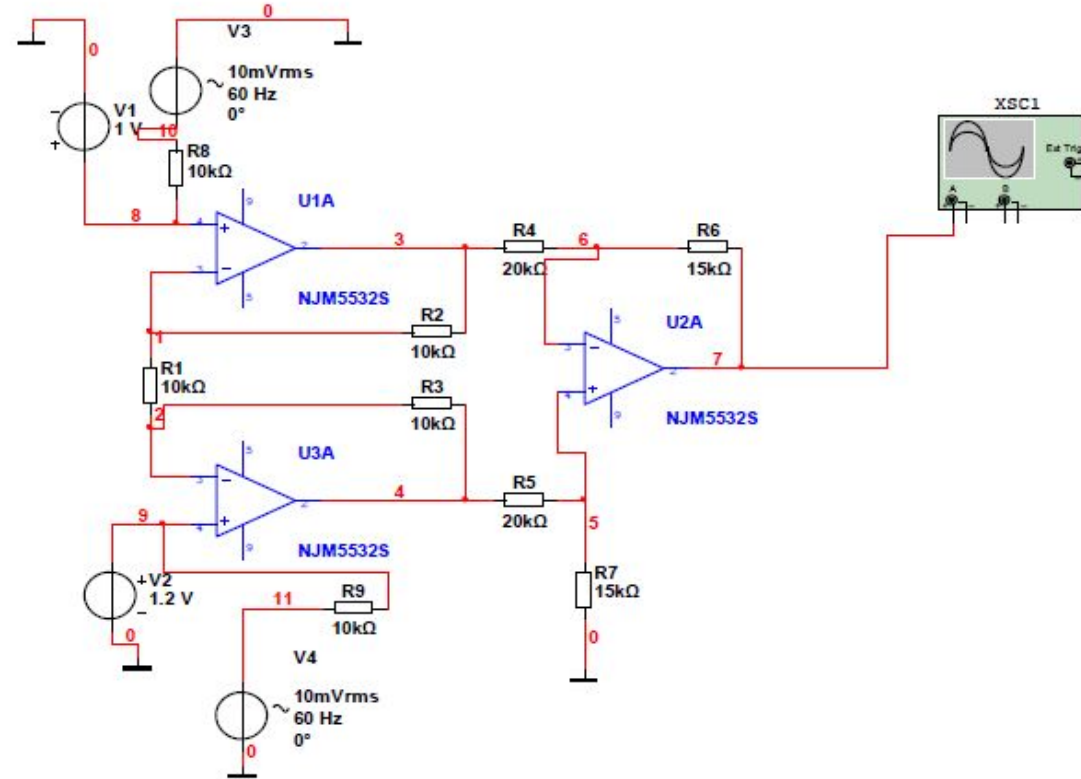
$$R_4 \cdot R_7 = R_5 \cdot R_6$$

$$\text{Обычно: } R_2 = R_3$$

$$R_4 = R_6$$

$$R_5 = R_7$$

# Схема моделирования измерительного усилителя на 3 ОУ



$$K_u = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4} = \frac{10 + 10 + 10}{10} \cdot \frac{20}{15} = 1,3$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{сф} = (R_7R_4 - R_5R_6) / R_4(R_6 + R_7) = (15 \cdot 20 - 15 \cdot 20) / 20(15 + 20) = 0$$

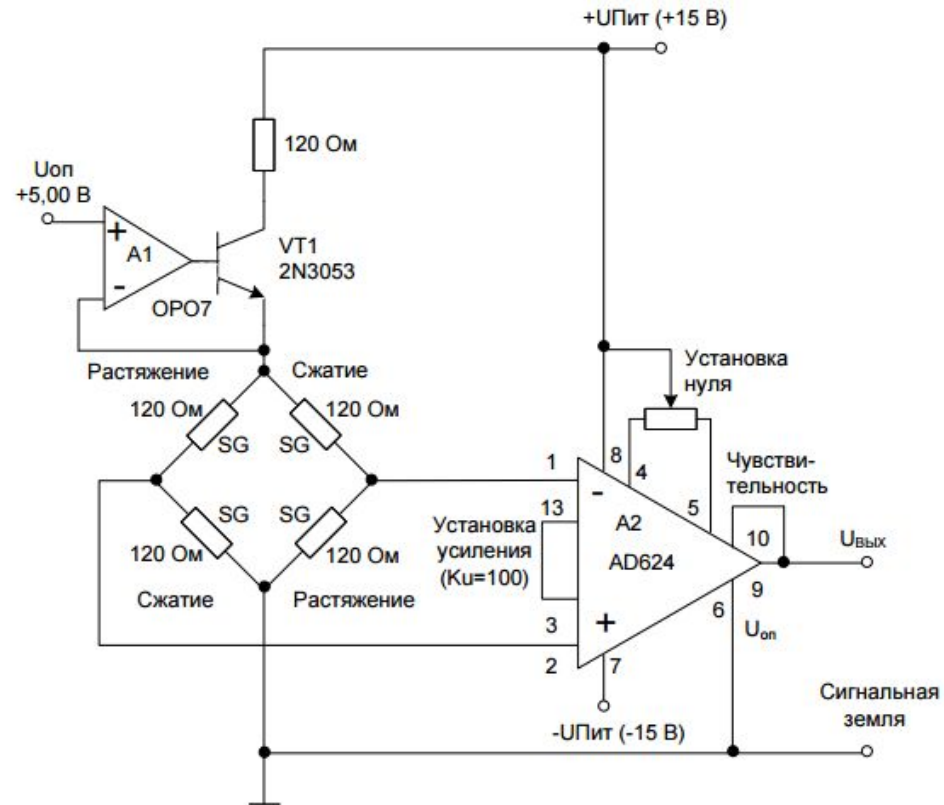
Первый каскад желательно сделать с большим коэффициентом усиления. А второй каскад в большой степени ослабит синфазный сигнал.

Требования к точности согласования резисторов остаются прежними. При реализации этой схемы необходимо выбирать с полевыми входами ОУ у которых токи смещения и сдвига малы.

Такая схема имеет более высокий входной импеданс и обеспечивает большее усиление и лучший КОСС по сравнению со схемами на одном ОУ. Кроме того, величина КОСС менее чувствительна к точности подбора резисторов.

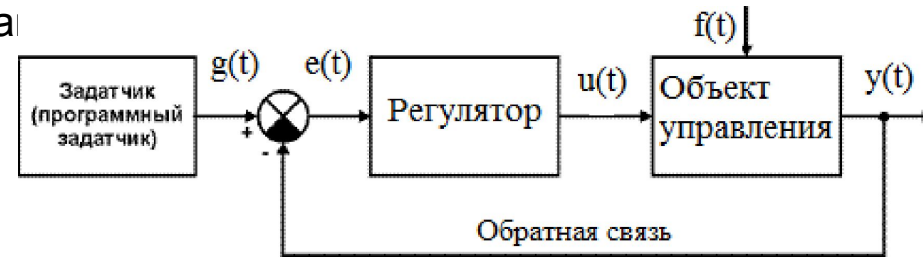
# Использование измерительных усилителей совместно с датчиками

Применение промышленного измерительного усилителя  
AI624C совместно с мостовым тензодатчиком.



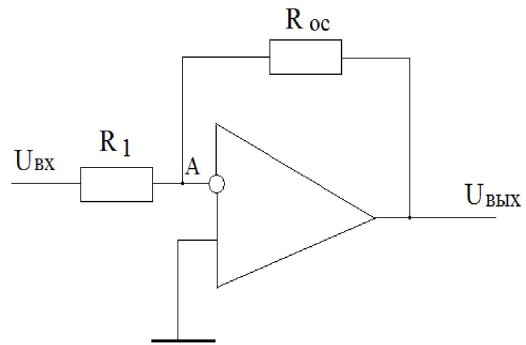
# ОУ в технике автоматического регулирования

Любую линейную систему автоматического регулирования можно представить



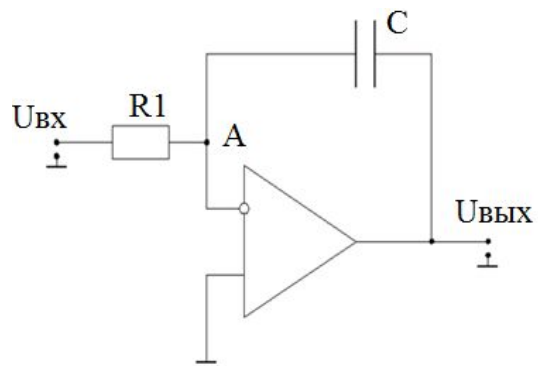
Состоящей из неизменяемой части системы и регулятора. На основе операционного усилителя можно реализовать все типовые линейные законы регулирования, к которым относятся:

- Пропорциональный (П)
- Интегральный (И)
- Дифференциальный (Д)
- Пропорционально-интегральный (ПИ)
- Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)



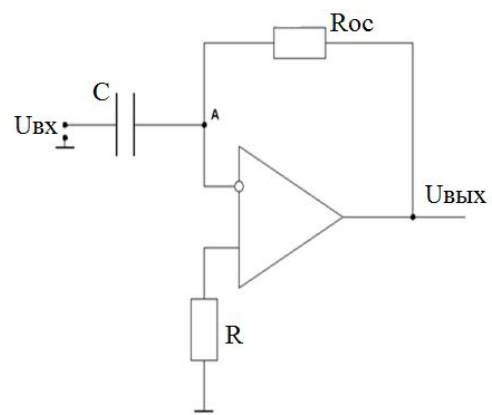
$$W(p) = K$$

$$K = -R_{oc}/R_1$$



$$W(p) = \frac{1}{T_{и} p}$$

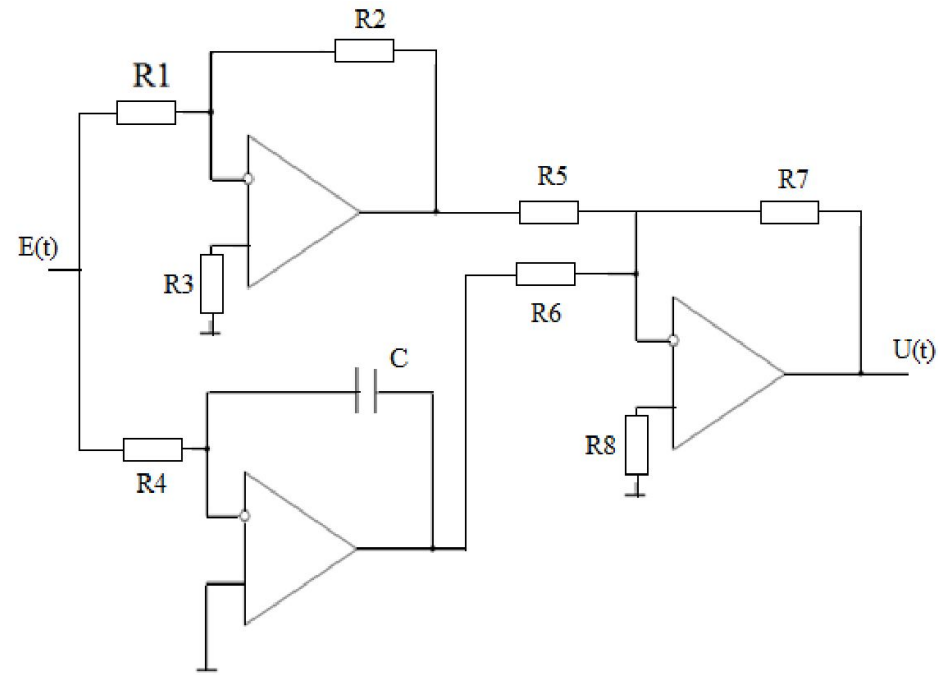
$$T_{и} = RC$$



$$W(p) = T_{д}^* p$$

$$T_{д} = RC$$

# Схема ПИ-регулятора

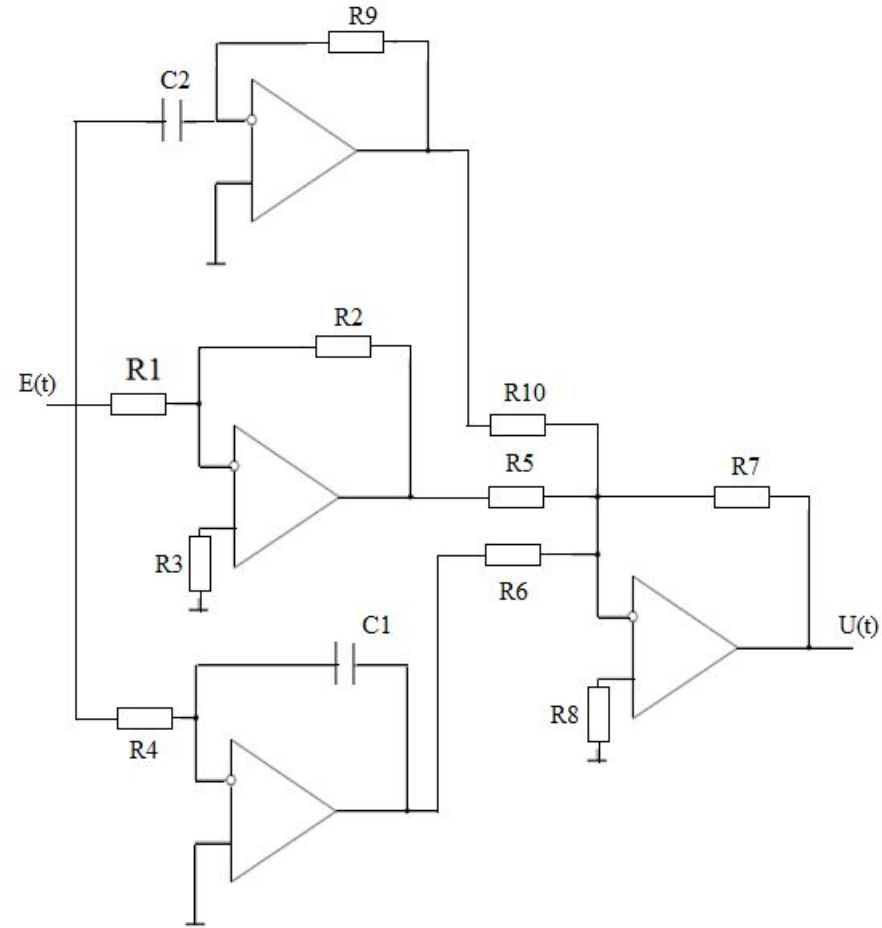


$$W(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K + \frac{1}{T_{\text{ин}} p}$$

$$K = -\frac{R_2}{R_1} \quad T_{\text{ин}} = R_4 C$$



# Схема ПИД-регулятора



Для настройки параметров регулятора  $R9$ ,  $R2$ ,  $R4$  необходимо выбрать переменными

# Наблюдатель состояния на ОУ

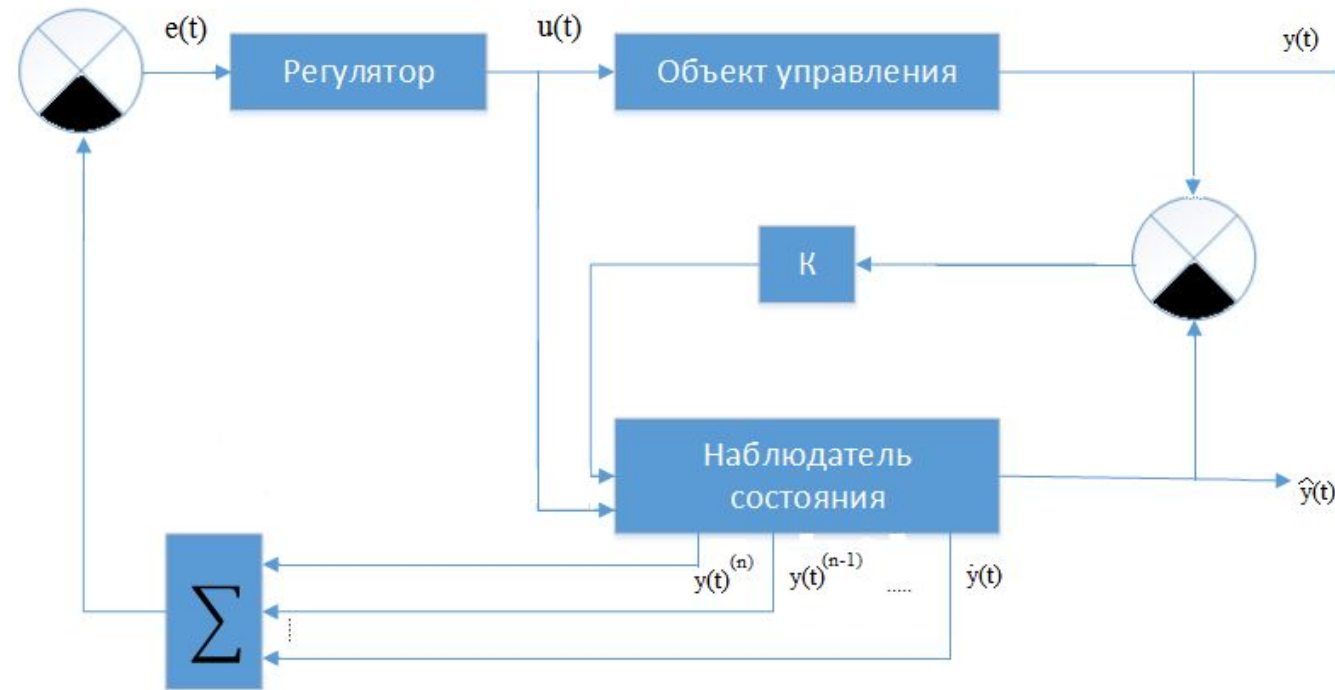
Для более эффективного управления технологическими процессами широко используются наблюдатели состояния, представляющие собой электронный аналог объекта управления и позволяющий определить динамические свойства объекта управления и использовать их для целей управления.

Линейный объект управления в самом общем виде описывается дифференциальным уравнением

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y}(t) + a_n y(t) = u(t)$$

Поскольку дифференциальные уравнения при синтезе системы обычно являются известными, можно реализовать электронное устройство, которое решает данное уравнение и позволяет в каждый текущий момент времени оценить все его производные.

# Система с наблюдателем состояния



$\hat{y}(t)$  - восстановленное значение регулируемой координаты  
 $\hat{y}(t)$  и  $y(t)$  поступают на элемент сравнения, сигнал ошибки усиливается и подается на вход наблюдателя, чтобы изменить его параметры – «подтянуть» к изменяющимся параметрам реального объекта

# Процедура синтеза наблюдателя

Задан линейный объект, динамика которого описывается дифференциальным уравнением третьего порядка

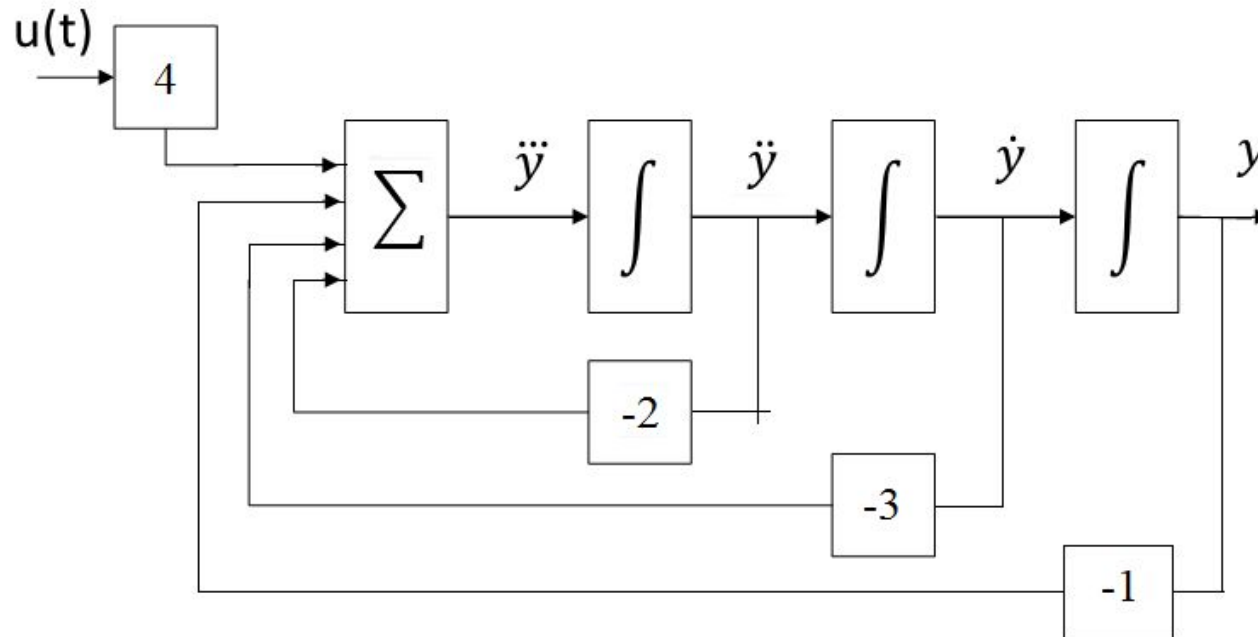
$$2\ddot{y}(t)+4\dot{y}(t)+6y(t)=8u(t)$$

Необходимо синтезировать наблюдатель

1. Переписать исходное уравнение относительно старшей производной

$$\ddot{y}(t)=4u(t)-2\dot{y}(t)-3y(t)$$

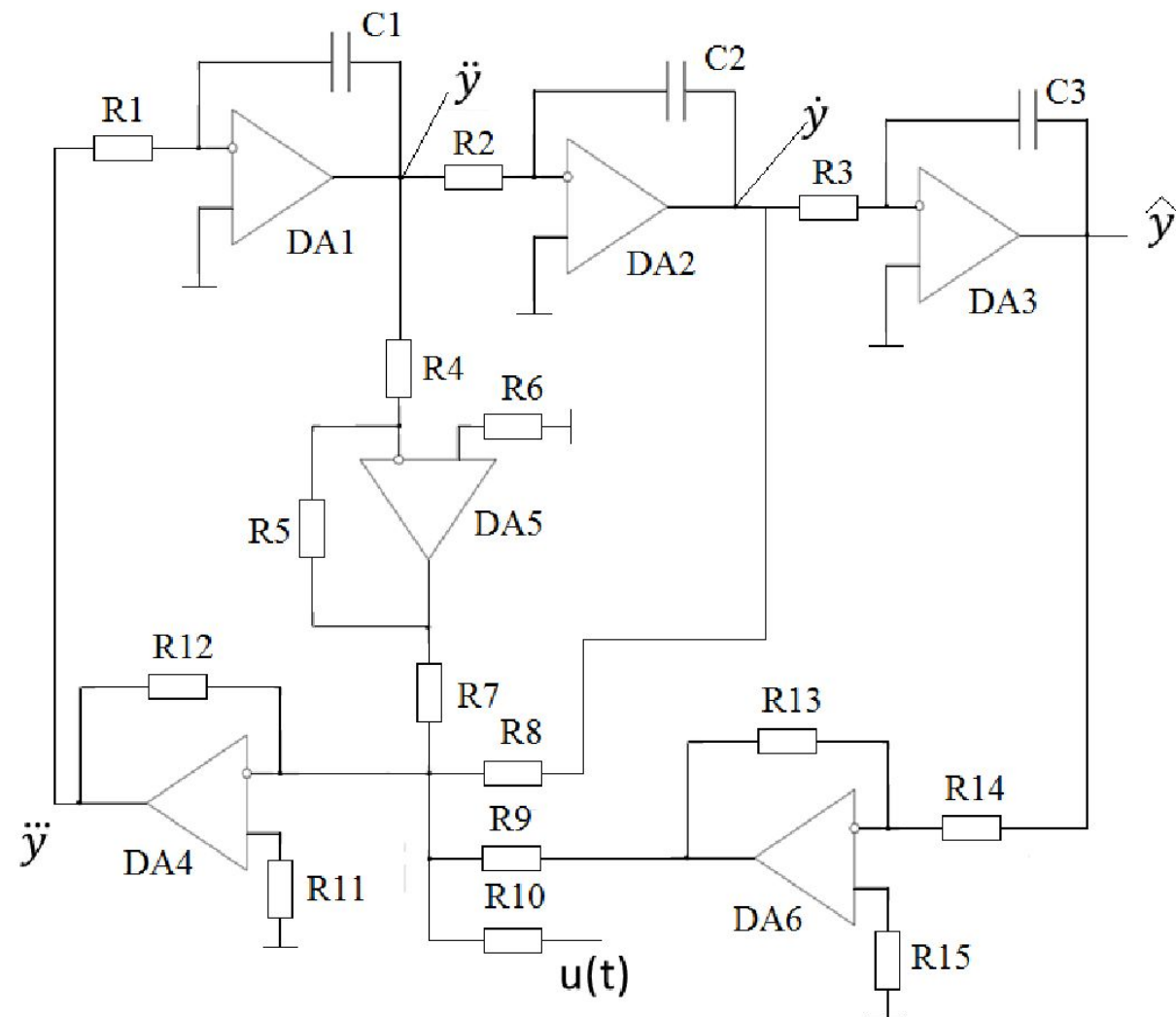
2. Составить функциональную схему наблюдателя



3. На основе функциональной схемы составить принципиально-электрическую схему наблюдателя состояния.

Принципиально-электрическая схема наблюдателя представляет набор контуров с обратными связями. Необходимо, чтобы в каждом контуре число операционных усилителей было нечетным.

В противном случае контур будет охвачен положительной обратной связью – схема будет неустойчива.



# Расчет наблюдателя

Постоянные времени интеграторов

$$T_1=R_1C_1 ; T_2=R_2C_2 ; T_3=R_3C_3$$

необходимо выбрать одинаковыми и равными 1с

$$R_1=R_2=R_3=1\text{МОм}$$

$$C_1=C_2=C_3=1\text{мкФ}$$

DA5:

$$R_4=R_5=10\text{ КОм}$$

$$\frac{R_{12}}{R_7} = 2$$

Можно выбрать  $R_{12}=12\text{ КОм}$ ,  $R_7=5,6\text{ Ком}$

DA4:

$$\frac{R_{12}}{R_{10}} = 4$$

$$\frac{R_{12}}{R_8} = 3$$

$$\frac{R_{12}}{R_9} = 1$$

Выберем  $R_8=3,9\text{ КОм}$ ,  $R_{10}=3\text{ КОм}$ ,  $R_9=12\text{КОм}$

DA6:

$R_{13}=R_{14}=10\text{ КОм}$  (коэффициент усиления каскада равен 1)

$R_6, R_{11}, R_{15}$  рассчитываются как параллельное соединение резисторов с суммирующей точкой.