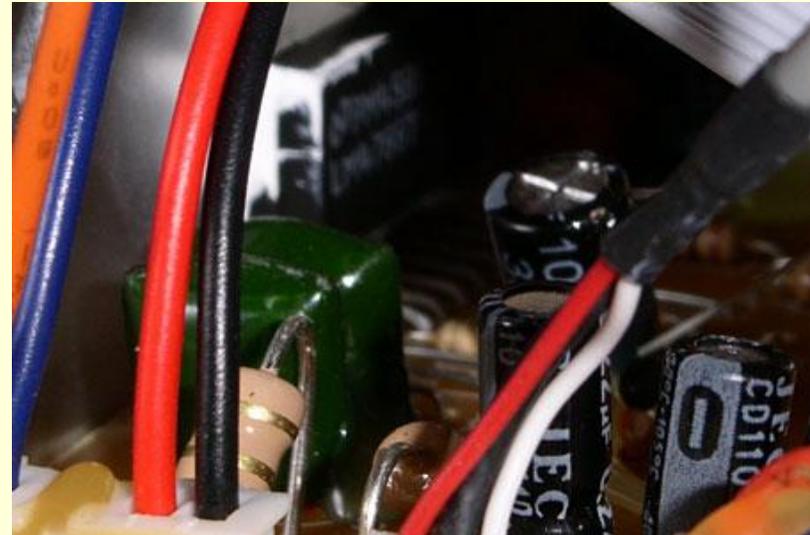
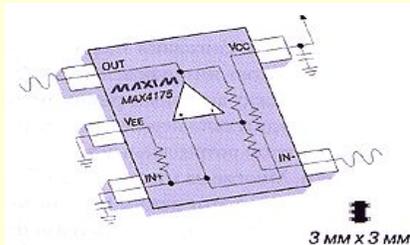


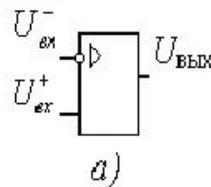
ГЛАВА 9. Операционные усилители

Операционные усилители - это УПТ с дифференциальным входом и общим несимметричным выходом, которые имеют большой коэффициент усиления $K_{OY} = 10^4 \div 10^8$ и обычно используются с различными обратными связями. Название этих усилителей связано с тем, что первоначально предполагалось их применять для выполнения различных математических операций над аналоговыми сигналами таких как

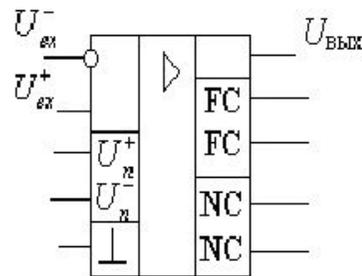
После того, как такие усилители были изготовлены в виде интегральных схем они оказались чрезвычайно дешевыми и применяются для выполнения любых операций, где требуется усиление электрического сигнала. Это наиболее распространенная аналоговая интегральная схема.



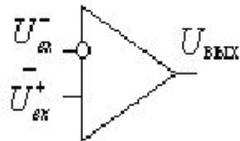
Операционные усилители



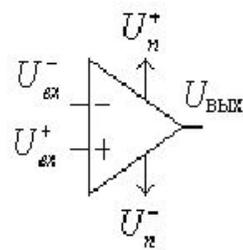
а)



б)



в)



г)

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления и высокое входное сопротивление. В настоящее время операционные усилители выпускают в виде интегральных микросхем. Типичные параметры интегрального ОУ следующие: входное сопротивление 10^6-10^{10} , коэффициент усиления напряжения $K_U = 10^4-10^6$.

1. неинвертирующий, вход, его обозначают знаком плюс (+), а напряжение на неинвертирующем вход – $U^+_{вх}$, его обозначают кружком, или знаком минус (-), а напряжение на нем – $U^-_{вх}$.

2. Выход ОУ $U_{вых} = K_{оу} (U^+_{вх} - U^-_{вх}) = K_{оу} U_{вх}$, $U_{вх} = (U^+_{вх} - U^-_{вх})$

3. На дополнительных полях указывают назначение дополнительных выводов ОУ: питание ($U^+_{п}$ и $U^-_{п}$); частотной коррекции (FC); балансировка нуля (NC); корпус микросхемы (\perp).

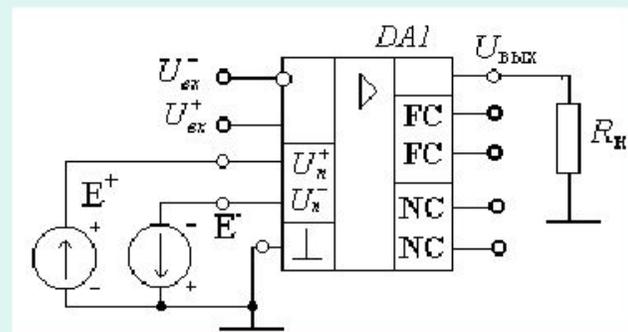
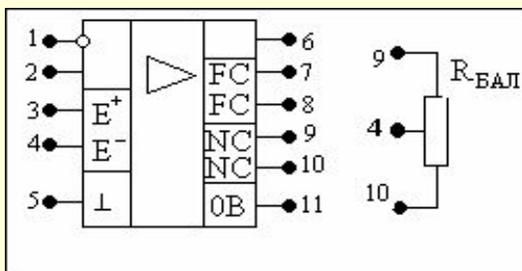
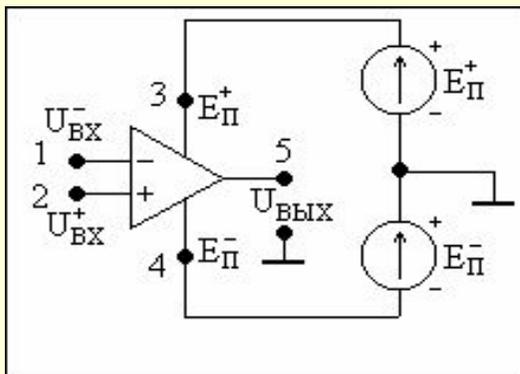


Рис.1.2. Схема включения ОУ по постоянному току

9.1. Условное обозначение и схема включения ОУ по постоянному току



В учебной и научной литературе ОУ обозначают треугольником с пятью, как минимум, выводами.

Выводы ОУ имеют следующие названия:

1 – инвертирующий вход (обозначен знаком «-» или «o»), $U^-_{вх}$ – напряжение на инвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в противофазе.

2 – неинвертирующий вход (обозначен знаком «+»), $U^+_{вх}$ – напряжение на неинвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в одной фазе.

Выводы 3, 4, обозначенные E^+, E^- предназначены для подключения питающего напряжения. Обычно ОУ требует двухполярного напряжения питания.

5 – выход, к нему подключается сопротивление нагрузки.

Основное уравнение ОУ, которое показывает связь между входными и выходными напряжениями записывается так $U_{вых} = K_{оу}(U^+_{вх} - U^-_{вх})$, где $K_{оу}$ – коэффициент усиления ОУ.

В технической литературе ОУ обозначается в виде прямоугольника. При этом назначение выводов следующее:

1, 2 – входы ОУ.

3, 4 – для подключения питающего напряжения.

5 – вывод соединен с корпусом ОУ, его обозначается как заземление.

6 – выход ОУ.

7, 8 – выводы для подключения элементов частотной коррекции. Обычно ОУ имеет большой коэффициент усиления и работает в схемах с отрицательной обратной связью, а поэтому возможно его самовозбуждение. Для устранения самовозбуждения между выводами 7, 8 подключают корректирующий конденсатор S_k , который так корректирует ЧХ коэффициента усиления, что при введении отрицательной обратной связи схема на ОУ не возбуждается, т.е. не превратится в генератор. Конкретные значения емкости S_k указывают в справочниках для ОУ. Многие ОУ не имеют внешнего конденсатора, он встроен в схему ОУ, такие ОУ называют с внутренней коррекцией.

9, 10 – предназначены для подключения элементов балансировки ОУ. ОУ считается сбалансированным, если $U_{вых} = 0$, когда $U^+_{вх} = U^-_{вх} = 0$, однако это не всегда выполняется из-за технологического разброса параметров элементов схемы ОУ. Для устранения разбаланса, между выводами 9, 10, 4, включают переменный резистор $R_{бал}$ с помощью которого и достигается условие балансировки. 11 – общая точка схемы ОУ.

9.2. Структурная схема ОУ

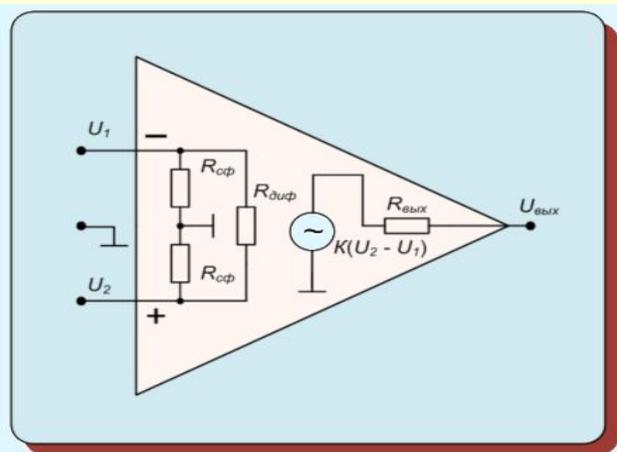
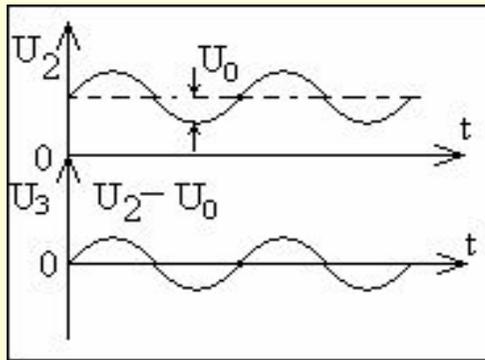
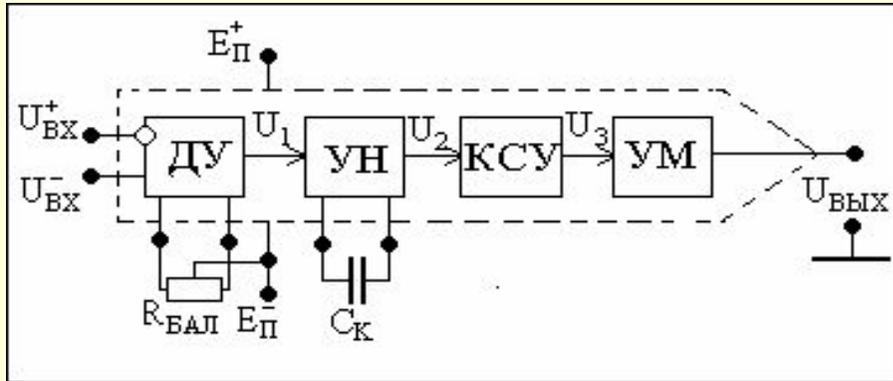


Рис.8.4. Эквивалентная схема ОУ.

ОУ представляет собой многокаскадное устройство и состоит из следующих блоков:

ДУ – дифференциальный усилитель, предназначен для усиления дифференциальной и подавления синфазной составляющих входных сигналов.

УН – усилитель напряжения, обеспечивает основное усиление сигнала по напряжению.

КСУ – каскад сдвига уровня. Обеспечивает сдвиг усиленного входного сигнала по постоянной составляющей, что необходимо для нормальной работы усилителя мощности. На рис. показан сдвиг сигнала U_2 по постоянной составляющей на величину U_0 .

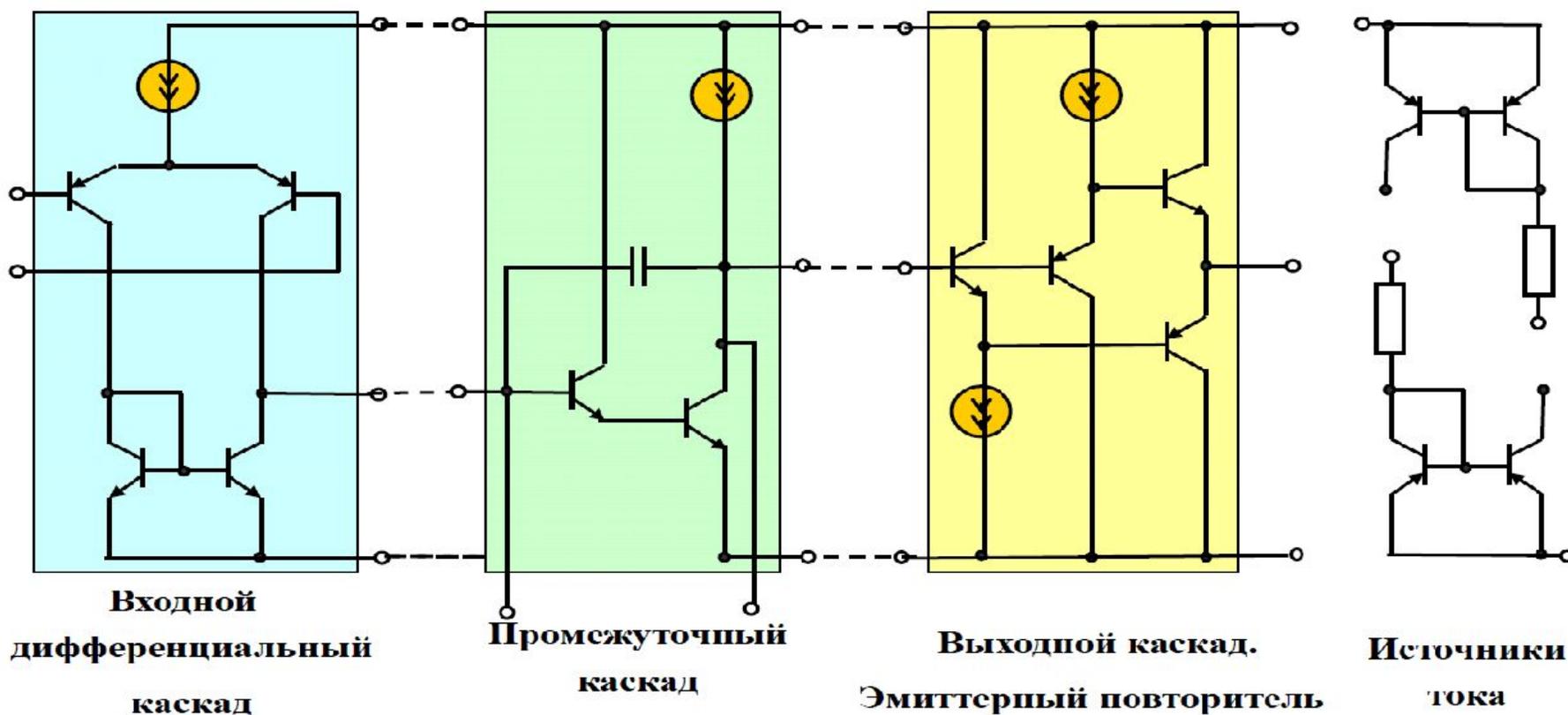
УМ – усилитель мощности, он служит для увеличения нагрузочной способности ОУ, создавая на нагрузке сигнал необходимой мощности. Обычно он выполнен по двухтактной схеме с защитой от короткого замыкания.

На рис приведена схема замещения ОУ.

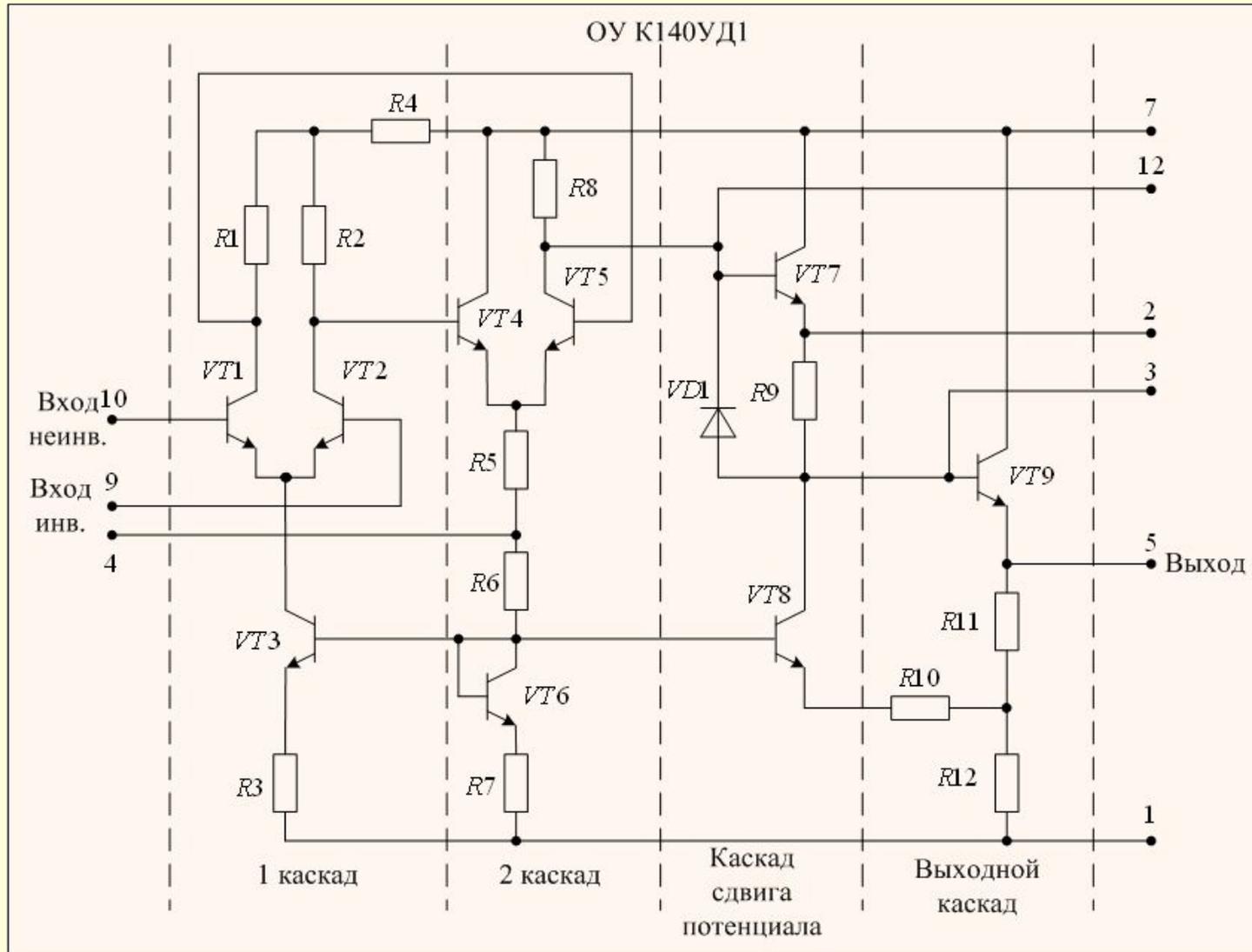
Схемы основных узлов ОУ

Операционный усилитель.

Основные каскады



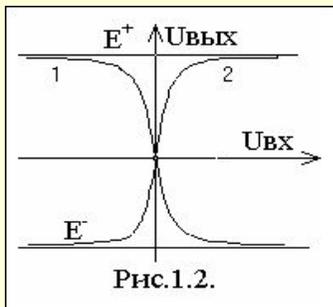
Электрическая принципиальная схема операционного усилителя К140УД1



9.3. Основные параметры и характеристики ОУ

ОУ имеет большое число параметров, которые можно разделить на следующие группы:

- | | |
|------------------|------------------|
| 1) передаточные; | 4) частотные; |
| 2) входные; | 5) динамические; |
| 3) выходные; | 6) дрейфовые; |



$U_{ВХ}$

1. Передаточные параметры.

Основными среди этих характеристик являются следующие:

1). *Передаточная или амплитудная характеристика (АХ)* - это зависимость $U_{ВЫХ} = F(U^+_{ВХ}, U^-_{ВХ})$. Эту функцию двух переменных обычно упрощают и рассматривают так как показано на рис. где,

1. $U_{ВЫХ} = F(U^+_{ВХ})$, при $U^-_{ВХ} = 0$, 2. $U_{ВЫХ} = F(U^-_{ВХ})$, при $U^+_{ВХ} = 0$.

Различают два режима работы ОУ.

1. При малых входных сигналах наблюдается линейная зависимость между выходным и входными сигналами $U_{ВЫХ} = K_{ОУ}(U^+_{ВХ} - U^-_{ВХ})$,

2. При больших входных сигналах ОУ переходит в состояние насыщения, т.е. его выходной сигнал принимает напряжение близкое к напряжению питания

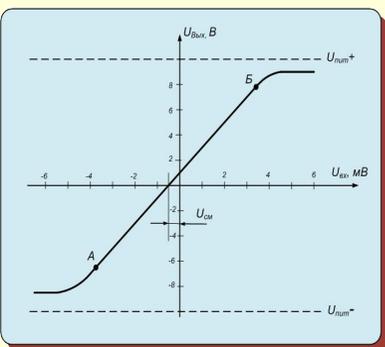
$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} E^+, U_{ВХ} > 0 \\ E^-, U_{ВХ} < 0 \end{cases}$$

Для сбалансированного ОУ АХ проходит через ноль. Реальный ОУ обычно разбалансирован, т.е. его АХ смещена относительно нуля.

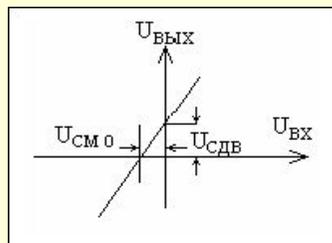
Разбаланс ОУ характеризуется параметрами:

2) Напряжение сдвига - это $U_{СДВ} = U_{ВЫХ} |_{U^-_{ВХ} = U^+_{ВХ} = 0}$

3) напряжение смещения нуля - $U_{СМ0}$. Это такое входное напряжение, которое надо подать на вход, чтобы устранить разбаланс ОУ.



$U_{ВЫХ}$

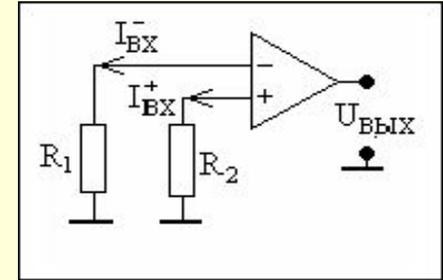


К передаточным параметрам относят также:

4). $K_{\text{ОУдиф}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХдиф}}}$ - коэффициент усиления дифференцирующего сигнала.

5). $K_{\text{ОУСС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХСС}}}$ - коэффициент усиления синфазного сигнала.

6). $K_{\text{КОСС}} = \frac{K_{\text{ОУдиф}}}{K_{\text{ОУСС}}}$ - коэффициент ослабления синфазного сигнала.



2. Входные параметры ОУ.

1). Величины входных токов $I_{\text{ВХ}}^-, I_{\text{ВХ}}^+$ Они зависят от транзисторов входного каскада

$$I_{\text{ВХ}}^-, I_{\text{ВХ}}^+ = \begin{cases} 10^{-6} \div 10^{-9} \text{ А, БипТр} - p \\ 10^{-9} \div 10^{-12} \text{ А, ПолТр} - p \end{cases}$$

Входные токи создают на резисторах R_1, R_2 напряжения (рис.9), если R_1, R_2 не одинаковы, то на входе возникает дифференцирующая составляющая входного напряжения, которая будет усилена ОУ, что приведет к его разбалансу. Для устранения разбаланса ОУ за счет входных токов резисторы R_1, R_2 должны выбираться одинаково.

2). Разность входных токов $\Delta I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}}^+ - I_{\text{ВХ}}^-$

3). $U_{\text{max сс}}$ - максимальное значение входного синфазного напряжения.

4). Величина входного сопротивления: различают входное дифференциальное и входное синфазное сопротивление. $R_{\text{ВХдиф}}, R_{\text{ВХСС}}$

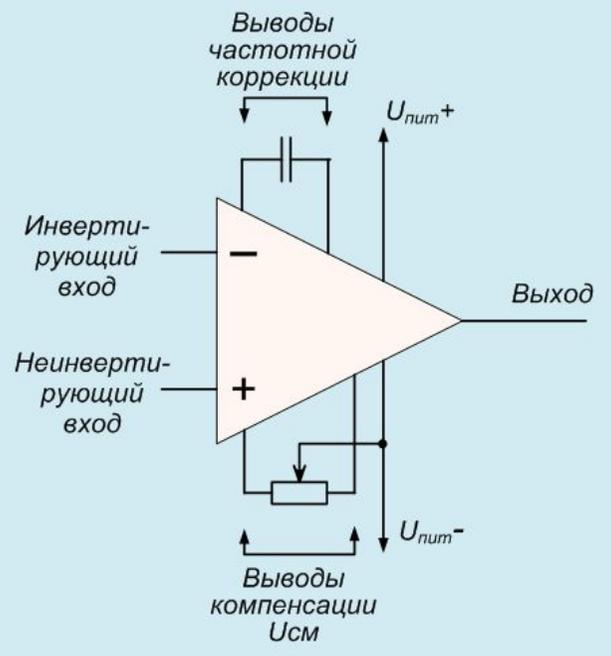
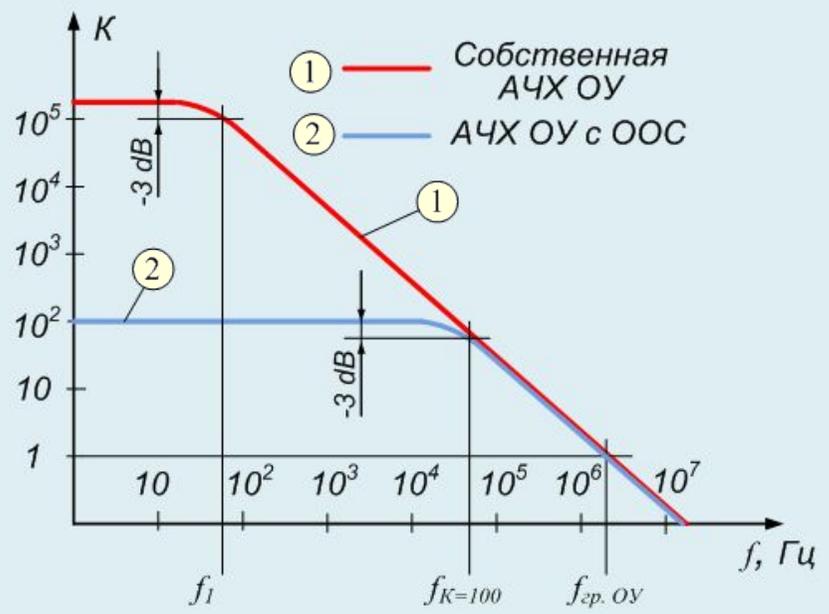
3. Выходные параметры.

1). Выходное сопротивление ОУ $R_{\text{вых}}$. Обычно $R_{\text{вых}} = (10^2 - 10^3) \text{ Ом}$. Однако, благодаря обратным связям $R_{\text{вых}}$ оказывается значительно меньше.

2). $U_{\text{ВЫХ max}}$ - максимальная амплитуда выходного напряжения. $U_{\text{ВЫХ max}} = (E_{\text{П}}^+ - 1,5) V$

3). Максимальная величина выходного тока ($I_{\text{ВЫХ max}} \leq 10 \text{ мА}$ - для ОУ широкого применения).

4). Наличие защиты от КЗ.



4. Частотные параметры ОУ.

Их оценивают по графику зависимости коэффициента усиления от частоты. Эту зависимость обычно строят в логарифмическом масштабе и основные частотные параметры следующие:

1). $f_{ГР}$ - граничная частота - это частота, на которой коэффициент усиления уменьшается в корень из двух раз, если график построен в линейном масштабе,

$$f_{ГР} \rightarrow \frac{K(f_{ГР})}{K^0} = \frac{1}{\sqrt{2}} = K(f_{ГР}) \cong 0,7K^0$$

или на 3дБ, если график построен в логарифмическом масштабе $K(f_{ГР}) = K_0 - 3\text{дБ}$.

2). f_1 - частота единичного усиления, это частота где $(f_1) = 1$ или $K(f_1)[\text{дБ}] = 0 \text{ дБ}$.

Частотные параметры ОУ связаны соотношением $f_1 = K_{ОУ} \cdot f_{ГР}$

5. Динамические параметры ОУ.

Они характеризуют быстрдействие переключения ОУ и количественно оцениваются следующими параметрами.

1. Скорость нарастания выходного сигнала

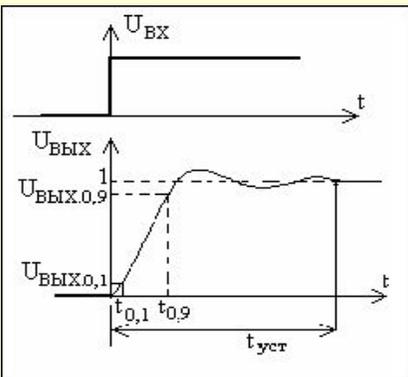
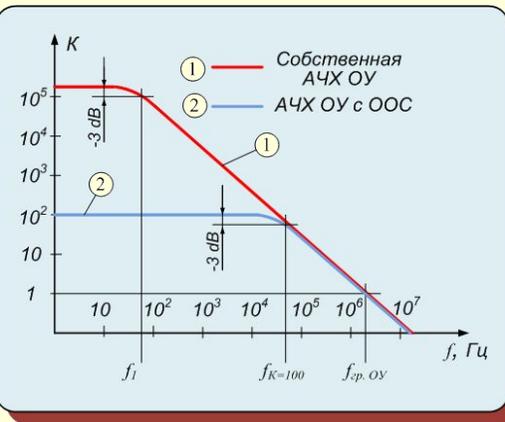
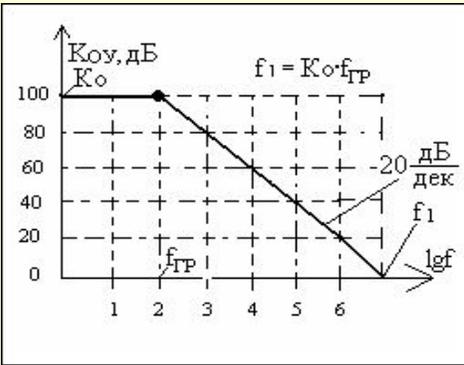
$$v = \frac{U_{\text{ВЫХ}0,9} - U_{\text{ВЫХ}0,1}}{t_{0,9} - t_{0,1}}$$

где $t_{0,1}$ и $t_{0,9}$ время достижения уровня $U_{\text{ВЫХ}0,1}$ и $U_{\text{ВЫХ}0,9}$ от стационарного значения принятого за единицу;

2. $t_{уст}$ - время установления выходного напряжения своего стационарного значения с заданной точностью.

6. Дрейфовые параметры.

Они характеризуют зависимость перечисленных параметров от температуры окружающей среды и от изменения напряжения питания.



9.4. Классификация ОУ по назначению

1). ОУ общего или широкого применения. Применяются наиболее часто, имеют средние значения своих параметров среди ОУ.

2). Быстродействующие ОУ. Их применяют для усиления импульсных и широкополосных сигналов. Для них характерно высокое значение скорости нарастания выходного напряжения

$$v > 100 \frac{B}{\text{мксек}}$$

3). Прецизионные ОУ. Это точно выполняющие преобразования над аналоговыми сигналами. Для них характерно следующее:

1. $K_{OY}^0 > 10^7$ 2. малый дрейф выходного напряжения.

4). Микромощные ОУ. Они имеют малую потребляемую мощность и малое питающее напряжение

$$E_{\Pi} \leq 3B$$

Используются в автономных устройствах, т.е. где существует ограничение по питанию (радиоприемники, слуховые аппараты и т.д.).

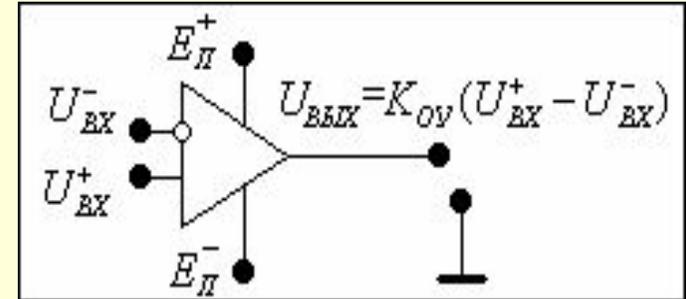
5). Программируемые ОУ. Они имеют добавочный вывод напряжение, на котором позволяет управлять коэффициентом усиления, частотой единичного усиления f_1 или потребляемой мощностью

$$P_{\text{потр}}$$

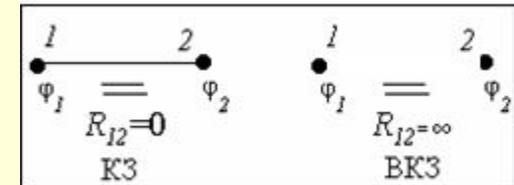
9.5. Понятие об идеальном ОУ. операционном усилителе

- Анализ устройств, содержащих операционный усилитель, значительно упрощается, если операционный усилитель считать идеальным. Под идеальным операционным усилителем понимают усилитель со следующими параметрами:

- $I_{BX}^+, I_{BX}^- \rightarrow 0$
- $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$
- $\Delta F = \infty$



- Входы идеального операционного усилителя можно считать виртуально коротко замкнутыми.
- В электротехнике вводятся такие определения:
 - Две точки электрической цепи, потенциалы которых равны и сопротивление между которыми равно нулю (рис.) называются **короткозамкнутыми (КЗ)**.
 - Две точки электрической цепи, потенциалы которых равны и сопротивление между которыми равно бесконечности (рис.), называются **виртуально короткозамкнутыми (ВКЗ)**.



- Вторым свойством обладают входы ОУ. Это следует, из соотношения что

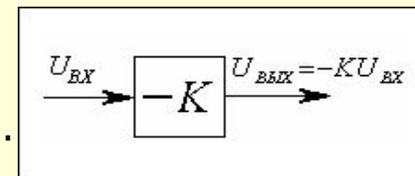
$$U_{BX}^+ - U_{BX}^- = \frac{U_{ВЫХ}}{K_{OY}} = \frac{E_{\Pi}}{\infty} \rightarrow 0$$

- Последнее означает, что входы ОУ виртуально замкнуты т.е. $U_{BX}^+ = U_{BX}^-$, а $R_{ВХ} = \infty$ или $I_{ВХ} = 0$.

9.6. Анализ устройств содержащих ОУ

В большинстве случаев ОУ используется с обратными связями, которые определяют функциональное назначение устройства и его основные параметры.

9.6.1. Инвертирующий усилитель



Его обозначение на функциональных схемах приведено на рисунке.

Знак "-" означает, что выходной сигнал находится в противофазе с входным.

При этом $K > 1$.

Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ рис.9.

В ней R_1, R_2 – резисторы образуют цепь параллельно-параллельной отрицательной обратной связи. R_3 – служит для устранения разбаланса ОУ за счет входных токов и выбирается из условия

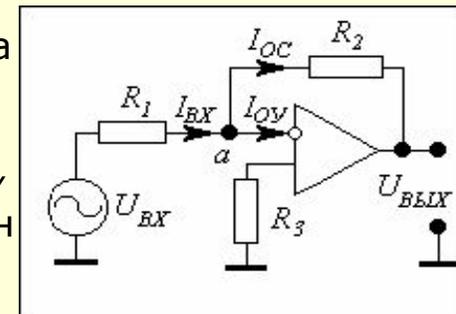
$$R_3 = R_1 // R_2$$

Установим связь между выходным и входным напряжениями.

Для узла «а» по 1-му закону Кирхгофа запишем соотношение: $I_{BX} = I_{OC} + I_{OY}$

Учтем, что для идеального ОУ $I_{OY} = 0$ и распишем токи I_{BX} и I_{OC} используя закон Ома (рис), т.е.:

$$\frac{U_{BX} - U_{BX}^-}{R_1} = \frac{U_{BX}^- - U_{ВЫХ}}{R_2}$$



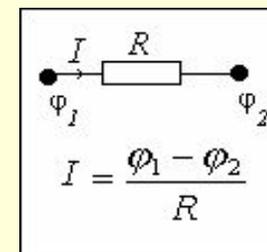
Учитывая, что входы ОУ виртуально замкнуты $U_{BX}^- = U_{BX}^+ = I_{OY} R_3 = 0$

Получим $U_{ВЫХ} = -\frac{R_2}{R_1} U_{BX}$; отсюда

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

Реальный усилитель можно считать идеальным если: 1. $K_{OY} \gg |K|$, где K - коэффициент усиления, который должен иметь усилитель.

2. $I_{OY} \ll (I_{BX}, I_{OC})$ I_{OC} – ток обратной связи



3. К выходу усилителя подключается сопротивление нагрузки $R_H > 1k\Omega$

Порядок расчета усилителя на заданный коэффициент усиления K :

1. По справочнику выбирается ОУ и определяем его I_{OY} и $R_{вх.оу}$. 2. Выбираем R_2 из условия:

$$R_2 < \frac{R_{ВХОУ}}{(10-100)}$$

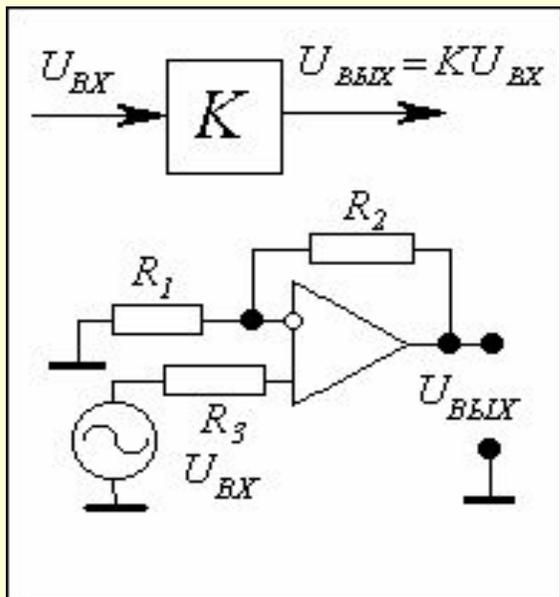
3. Рассчитываем $R_1 = R_2 / K$.

Если $R_1 \geq 1k\Omega$, то выбранный ОУ удовлетворяет требованиям, а если $R_1 \leq 1k\Omega$, то выбираем другой ОУ с большим $R_{вх}$ и все расчеты проводим заново.

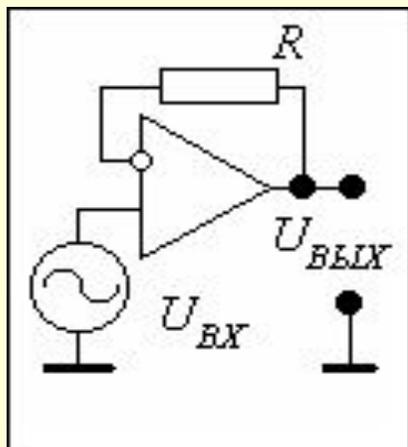
4. Рассчитываем R_3 из соотношения:

$$R_3 = R_1 // R_2$$

9.6.2. Неинвертирующий усилитель.



$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} (R_1 + R_2) / R_1.$$



$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$$

Усилитель выполняющий преобразование $U_{ВЫХ} = K \cdot U_{ВХ}$, где $K > 1$ называется неинвертирующим.

Его условное обозначение и принципиальная схема приведены на рис. .

Резисторы R_1, R_2 образуют последовательно-параллельную отрицательную обратную связь.

Установим связь между входным и выходным напряжениями. Поскольку входы идеального ОУ виртуально замкнуты, то, запишем $U^+_{ВХ} = U^-_{ВХ}$. где $U^-_{ВХ} = R_1 U_{ВЫХ} / (R_1 + R_2)$, а $U^+_{ВХ} = U_{ВХ}$. Подставим записанное в исходное уравнение и, разрешим это уравнение относительно $U_{ВЫХ}$, получим

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} (R_1 + R_2) / R_1.$$

Отсюда $K = (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + R_2 / R_1$.

Если $R_1 = \infty$ (рис.9), то $K_{и} = 1$, и такой усилитель называется повторителем напряжения. Благодаря последовательной обратной связи по входу он имеет практически $R_{ВХ} \rightarrow \infty$, а благодаря параллельной обратной связи по выходу - $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$.

9.6.3. Преобразователь ток-напряжение

Преобразователь ток-напряжение это устройство которое выполняет преобразует ток в напряжение. Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

В простейшем случае такое преобразование осуществляет резистор R по схеме приведенной на рис. :

Напряжение и ток связаны соотношением $U=IR_H$ при этом должно выполняться соотношение $R_i \gg R_H$.

Если резисторы R_i и R_H становятся соизмеримыми по величине резко возрастает погрешность преобразования.

Этого недостатка лишена схема на ОУ. Благодаря обратной связи эта схема имеет почти нулевое входное сопротивление. А потому преобразование тока в напряжение происходит практически при любом сопротивлении R_i

Установим связь между входным током и выходным напряжением для схемы на ОУ.

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа запишем соотношение для токов:

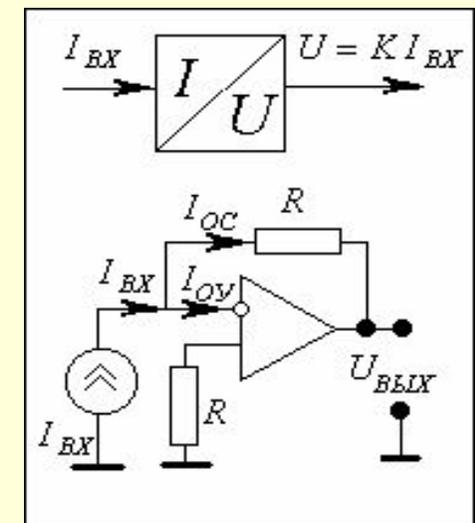
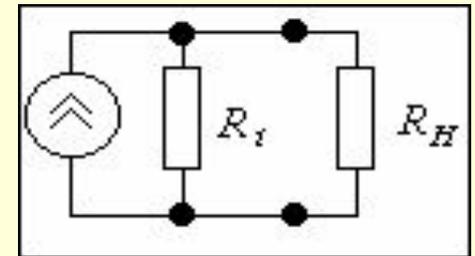
$$I_{вх} = I_{ос} + I_{оу}$$

Учитывая, что входы ОУ виртуально замкнуты ($I_{оу} = 0$, $U_{+вх} = U_{-вх} = 0$), запишем по закону Ома соотношение для тока

$$I_{ос} = -U_{вых} / R$$

и разрешив его относительно $U_{вых}$, получим

$$U_{вых} = -R \cdot I_{вх}.$$



$$U_{вых} = -R \cdot I_{вх}$$

9.6.4.. Инвертирующий сумматор

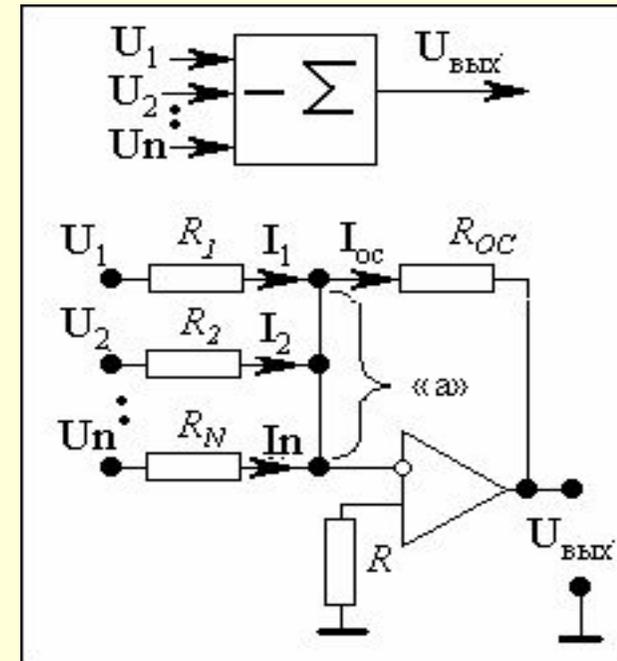
Это устройство, у которого выходное напряжение равно алгебраической сумме входных напряжений, взятой с противоположным знаком (рис.5). Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

Установим связь между выходным и входными сигналами этой схемы.

Если считать, что ОУ идеальный т.е. $I_{оу}=0$ и $U_{+}=U_{-}=0$, то при подаче на его входы напряжения U_1, U_2, \dots, U_n , для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что $I_{вх} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_{ос}$,

Расписав каждый из токов по закону Ома: $I_1 = U_1/R_1, I_2 = U_2/R_2, \dots, I_n = U_n/R_n, I_{ос} = -U_{вых}/R_{ос}$, получим выражение связывающее входные и выходное напряжения

$$U_{вых} = -(U_1 R_{ос}/R_1 + U_2 R_{ос}/R_2 + \dots + U_n R_{ос}/R_n)$$



9.6.5. Усилитель разности напряжения

Это усилитель, в котором выходное напряжение пропорционально разности входных сигналов $U_{вх2}$ и $U_{вх1}$ (рис.).

Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

Установим связь между выходным и входными сигналами этой схемы.

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что $I_{вх} = I_{ос} + I_{оу}$

Если считать, что ОУ идеальный т.е.

$I_{оу} = 0$ и $U_{+вх} = U_{-вх} = U_{вх+} = U_{вх2} R_2 / (R_1 + R_2)$,

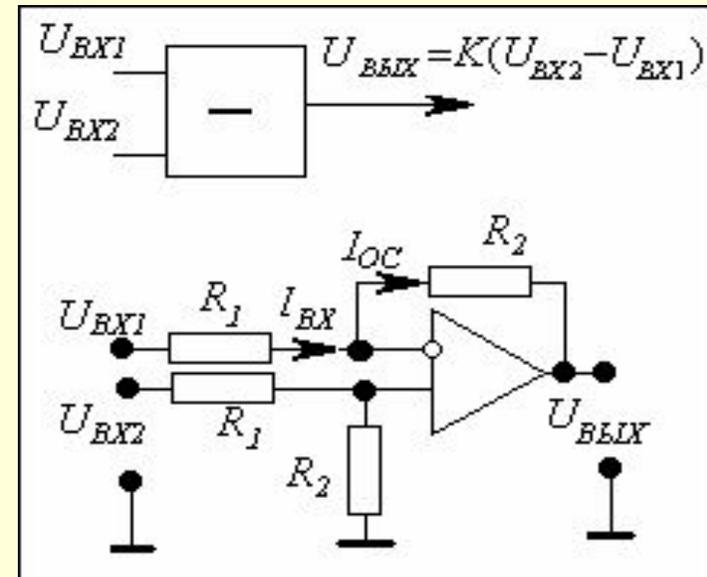
то записав токи по закону Ома ($I_{вх} = (U_{вх1} - U_{-вх}) / R_1$,
а $I_{ос} = (U_{-вх} - U_{вых}) / R_2$) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения примет вид

$$\mathbf{U_{вых} = (R_2 / R_1)(U_{вх2} - U_{вх1}).}$$

Идеальный разностный усилитель при подаче на оба входа одинаковых напряжений, т.е. $U_{вх1} = U_{вх2}$, имеет на выходе напряжение равное нулю. Такие входные напряжения называются синфазными $U_{сс}$. В общем случае синфазный сигнал представляет собой среднее значение двух входных напряжений, т.е. $U_{сс} = (U_{вх1} + U_{вх2}) / 2$. Если $U_{вх1} = -U_{вх2}$, то $U_{сс} = 0$.

Разность двух входных напряжений называется дифференциальным сигналом $U_{дс} = U_{вх2} - U_{вх1}$.

Поскольку усилитель разности усиливает только разностный (дифференциальный) сигнал, то такой усилитель часто называют дифференциальным усилителем.



$$\mathbf{U_{вых} = (R_2 / R_1)(U_{вх2} - U_{вх1})}$$

9.6.6. Дифференцирующий усилитель

Дифференцирующий усилитель, это устройство, в котором входное и выходное напряжение связано соотношением (рис.) $U_{\text{вых}} = K(dU_{\text{вх}}/dt)$. (7)

Простейшие дифференцирующие цепи (например RC-цепь) выполняют эту операцию со значительными погрешностями, причем с повышением точности дифференцирования существенно уменьшается уровень выходного сигнала.

Схема дифференцирующего усилителя на ОУ приведена на рис.7.

Установим связь между выходным и входным напряжениями этого усилителя.

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что $I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}} + I_{\text{оу}}$

Если считать, что ОУ идеальный, т.е. $I_{\text{оу}} = 0$ и $U_{+} = U_{-} = U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} = 0$,

то записав токи по закону Ома ($I_{\text{вх}} = I_{\text{с}} = C d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}})/dt$, а $I_{\text{ос}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_2$) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения

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

(8)

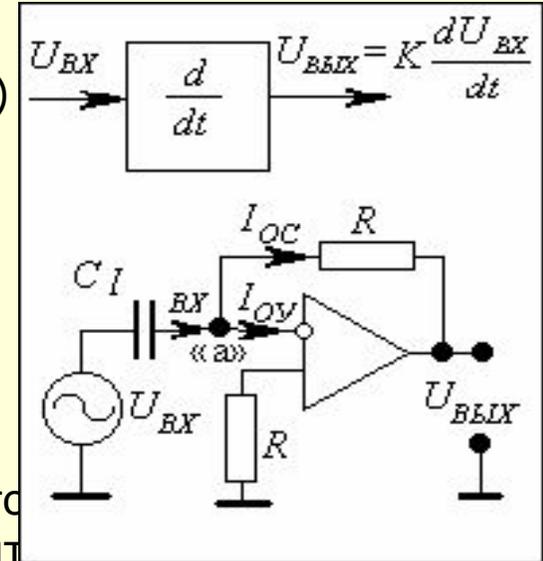
где $R_{\text{ос}} C = \tau$ - постоянная времени дифференцирующего усилителя.

Коэффициент передачи дифференцирующего усилителя определяется выражением

$$K(j\omega) = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = j\omega\tau = K(\omega)e^{j\phi(\omega)}, \quad (9)$$

где $K(\omega) = \omega\tau$ - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\phi(\omega) = \pi/2$ - фазово- частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи.



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

9.6.7. Интегрирующий усилитель

Это устройство, в котором входное и выходное напряжение связано соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$$

Простейшим интегрирующим цепям (например RC - цепям) аналогичны недостатки предыдущего устройства.

Схема интегрирующего усилителя на ОУ приведена на рис.8. Установим связь между выходным и входным напряжениями этой схемы. Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что $I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ОС}} + I_{\text{ОУ}}$

Если считать, что ОУ идеальный, т.е. $I_{\text{ОУ}}=0$ и $U^+_{\text{ВХ}}=U^-_{\text{ВХ}}=0$, то, записав токи по закону Ома ($I_{\text{ВХ}}=(U_{\text{ВХ}} - U^-_{\text{ВХ}})/R_2$, а $I_{\text{ОС}}=I_{\text{С}}=Cd(U^-_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}})/dt$) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(1/RC) \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$$

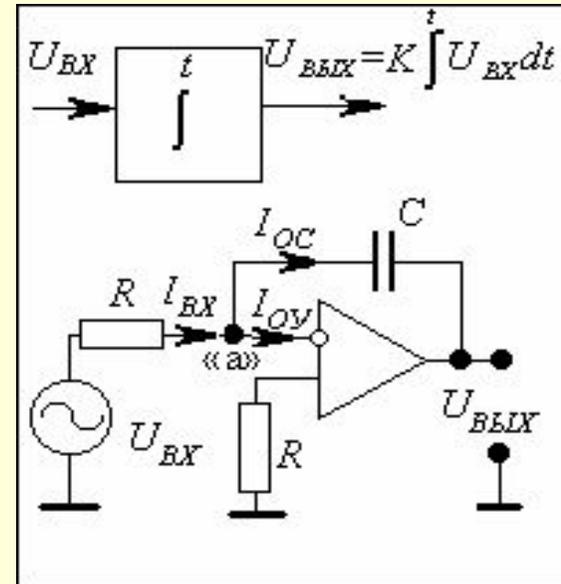
где $RC = \tau$ - постоянная времени интегрирующего усилителя.

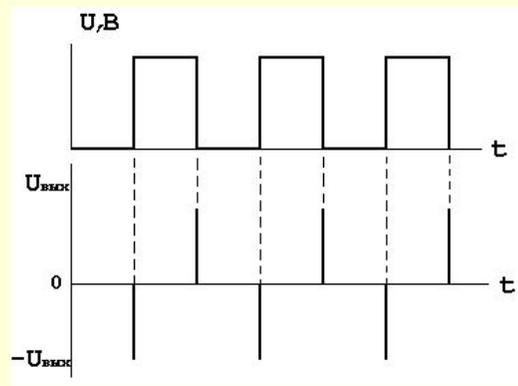
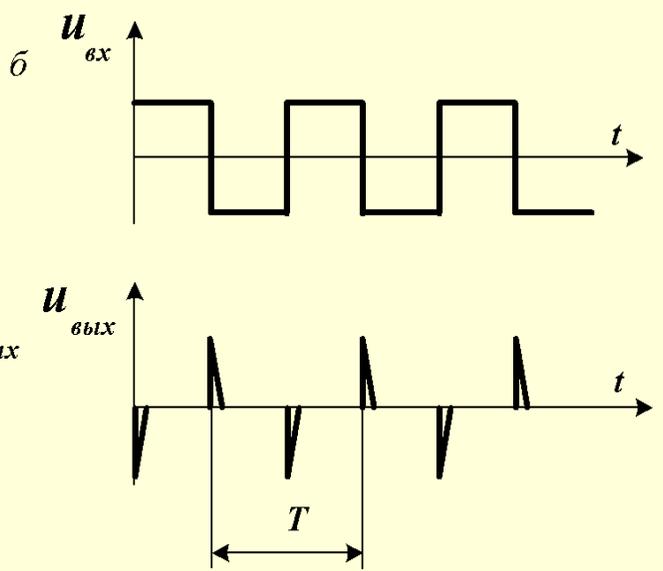
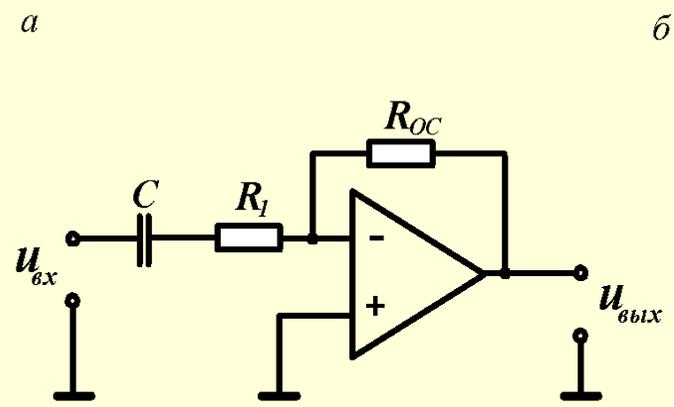
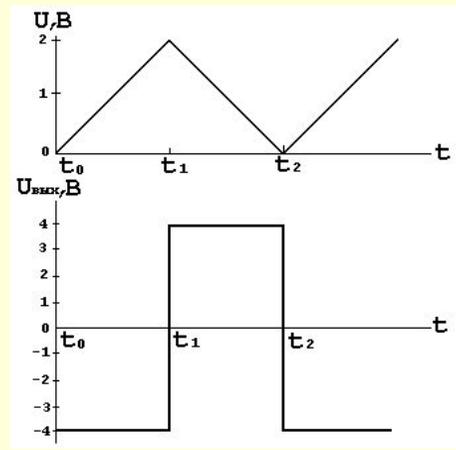
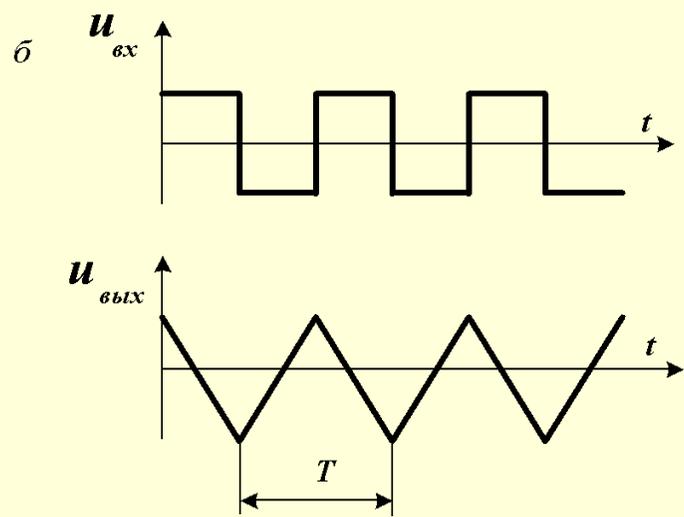
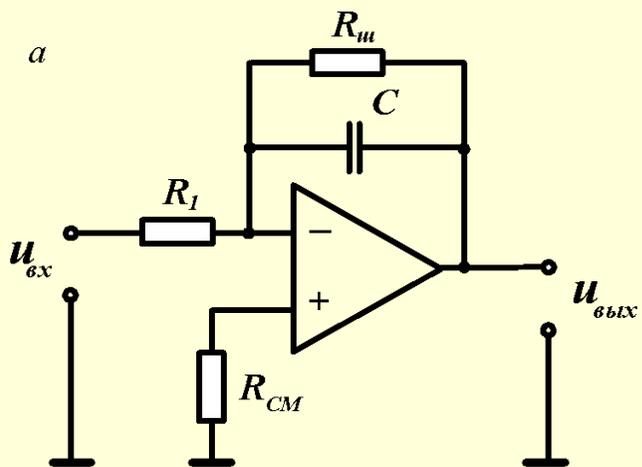
Коэффициент передачи интегрирующего усилителя определяется выражением

$$K(j\omega) = U_{\text{м.ВЫХ}}/U_{\text{м.ВХ}} = (j\omega\tau)^{-1} = K(\omega) e^{j\phi(\omega)},$$

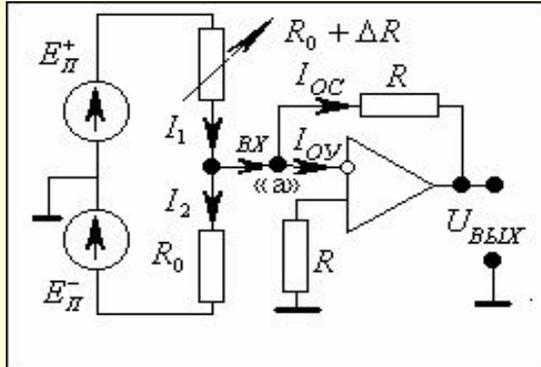
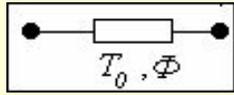
Где $K(\omega) = (\omega\tau)^{-1}$ - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\phi(\omega) = -\pi/2$ - фазово-частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи интегрирующего усилителя.





9.6.8. Усилитель сигнала резистивного датчика



Резистивным датчиком называют измерительный преобразователь, сопротивление, которого зависит от измеряемой физической величины. Сопротивление измерительного преобразователя состоит из двух составляющих

R_0 – номинальное сопротивление резистивного датчика, когда измеряемая величина $H=0$; $R = R_0 + \Delta R$

$\Delta R = SH$, где S – чувствительность датчика к измеряемой величине.

Для преобразования сопротивления резистивного датчика в напряжение применяют полумостовая схема преобразования (рис.). Установим связь

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что $I_1 + I_2 = I_{OC} + I_{OY}$

Если считать, что ОУ идеальным, т.е. $I_{OY} = 0$ и $U_{+} = U_{-} = 0$, то, записав токи по закону Ома

($I_1 = (E_{\Pi}^+ - U_{ВХ}) / (R_0 + \Delta R)$, $I_2 = (E_{\Pi}^- - U_{ВХ}) / R_0$, а $I_{OC} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) / R$) получим

$$\frac{E_{\Pi}^+ - U_{ВХ}}{R_0 + \Delta R} - \frac{E_{\Pi}^- + U_{ВХ}}{R_0} = \frac{U_{ВХ} - U_{ВЫХ}}{R}$$

Считая $|E_{\Pi}^+| = |E_{\Pi}^-| = E_{\Pi}$, получаем

$$\frac{E_{\Pi}}{R_0 + \Delta R} + \frac{E_{\Pi}}{R_0} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R}$$

$$U_{ВЫХ} = -ER_{OC} \left[\frac{1}{R_0 + \Delta R} - \frac{1}{R_0} \right] = -ER_{OC} \left[\frac{R_0 - R_0 - \Delta R}{R_0(R_0 + \Delta R)} \right] = ER_{OC} \frac{\Delta R}{R_0^2} = ER_{OC} \frac{SH}{R_0^2}$$

Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Логарифматор

Логарифмирующий усилитель. Логарифмирующие усилители предназначены для получения выходного напряжения, пропорционального логарифму входного напряжения. Они используются в компандерах и эспандерах сигналов (в устройствах сжатия и расширения динамического диапазона входных сигналов при магнитной записи), в системах шумопонижения, устройствах перемножения напряжений и т. д. Теоретически логарифмическая зависимость определяется следующим соотношением: $y = \log_a(x)$. При $a = e$ имеем $y = \ln(x)$.

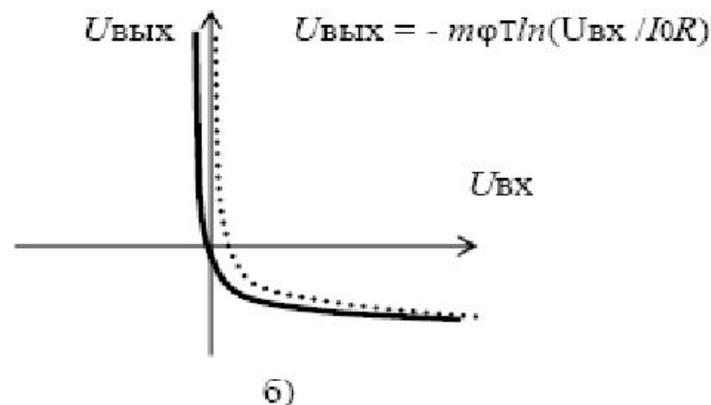
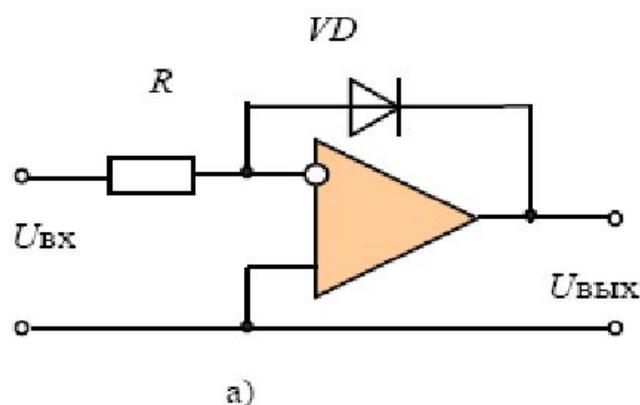
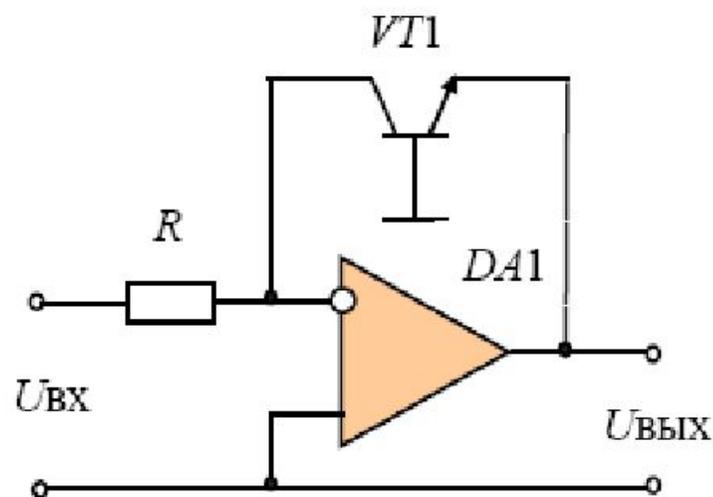


Схема логарифмирующего усилителя *а)* и его амплитудная характеристика *б)*

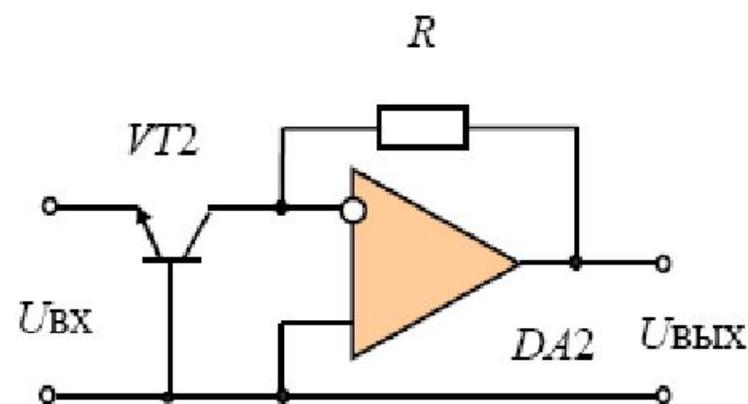
Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Логарифматор и потенциатор

$$U_{\text{ВЫХ}} = -m\varphi_T \ln \left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{I_0 R} \right)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R \left(e^{\frac{U_{\text{ВХ}}}{m\varphi_T}} - 1 \right)$$

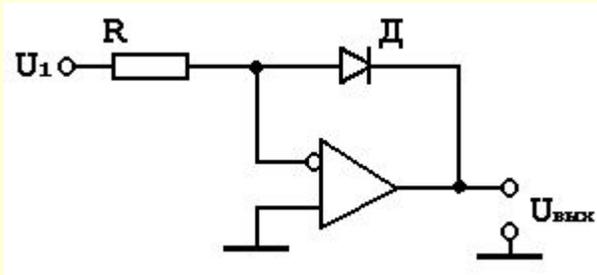


Логарифматор

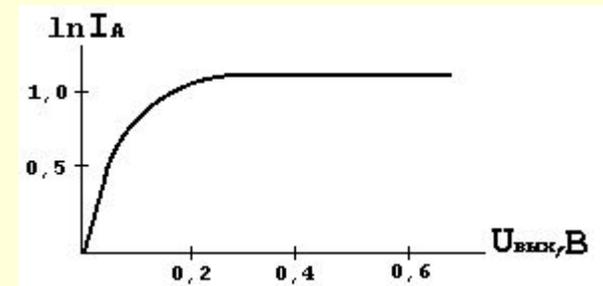


Антилогарифматор

- Ток через п/п диод равен: $I_D = I_0(e^{\frac{eU}{kT}} - 1) = I_0 e^{\frac{eU}{kT}}$
- где I_0 - ток утечки при небольшом обратном смещении, e - заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл), U - напряжение на диоде, k - постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T - абсолютная постоянная температура в кельвинах.
- Построив зависимость $I_D = F(U_{\text{вых}})$ в линейном масштабе, получим логарифмическую характеристику в масштабе на плоскости $U-I$.
- Если построить зависимость $U_{\text{вых}} = F(\ln I)$, то получим прямую линию с наклоном около 26 мВ. $U_{\text{вых}}$ достигает вблизи 0.6 В

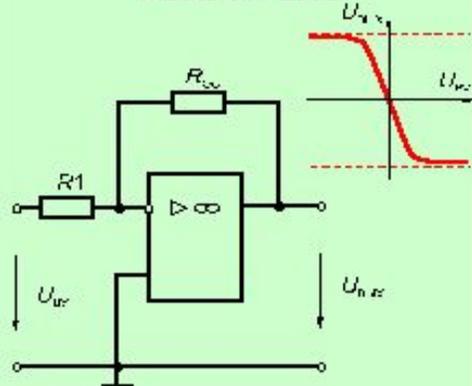


$$U_{\text{вых}} = \frac{kT}{e} \left(\ln \frac{U_1}{R I_0} \right)$$



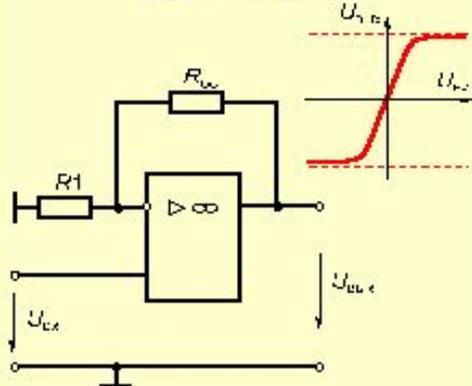
ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ОУ)

ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



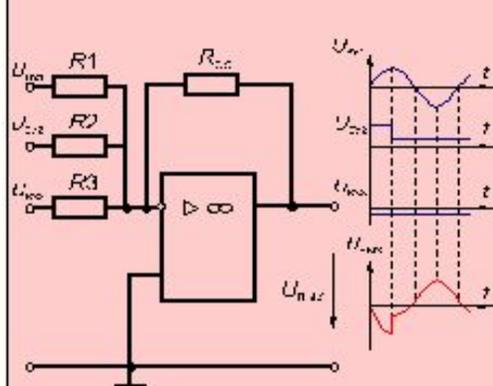
$$K_{UH} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{00}}{R_1}$$

НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



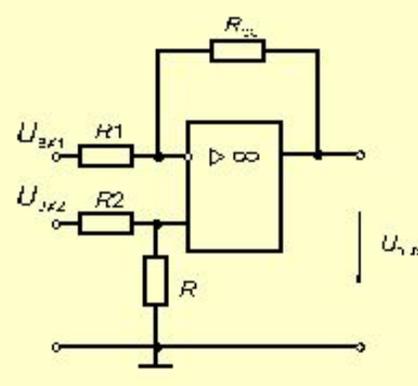
$$K_{UH} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{00}}{R_1}$$

СУММАТОР



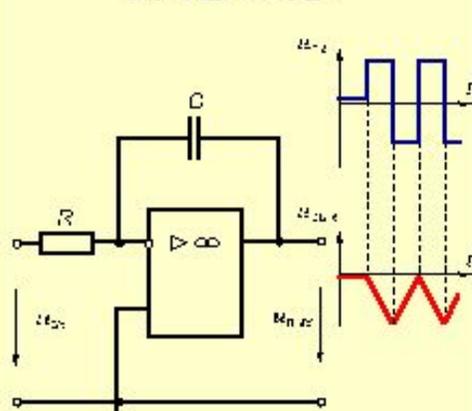
$$U_{вых} = -\left(\frac{R_{00}}{R_1} U_{вх1} + \frac{R_{00}}{R_2} U_{вх2} + \frac{R_{00}}{R_3} U_{вх3}\right)$$

ВЫЧИТАТЕЛЬ



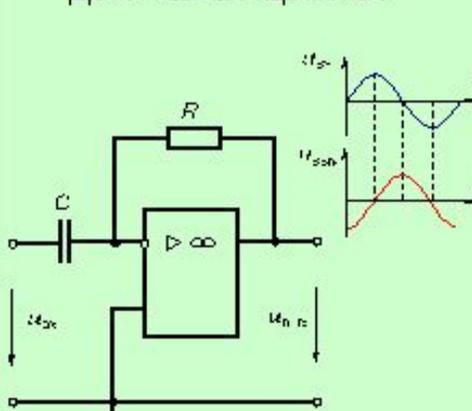
$$U_{вых} = U_{вх2} \frac{R}{R_2 + R} \left(1 + \frac{R_{00}}{R_1}\right) - U_{вх1} \frac{R_{00}}{R_1}$$

ИНТЕГРАТОР



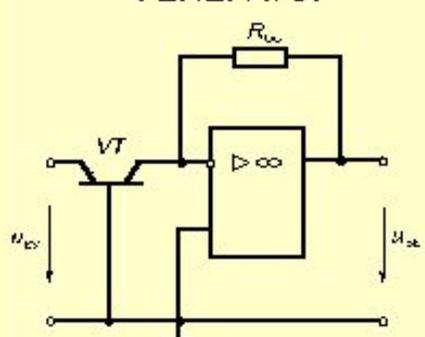
$$u_{вых} = -\frac{1}{RC} \int u_{вх} dt$$

ДИФФЕРЕНЦИАТОР



$$u_{вых} = -RC \frac{du_{вх}}{dt}$$

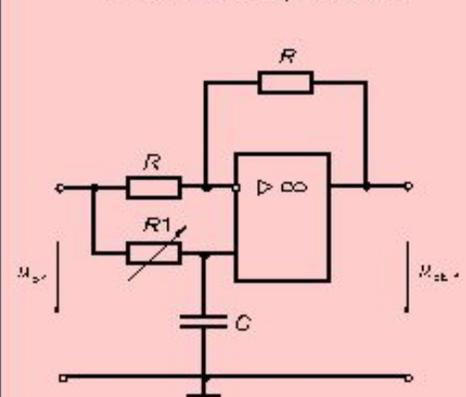
ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР



$$u_{вых} = I_{30} R_{00} e^{-\frac{u_{вх}}{25.5}}$$

I_{30} - обратный ток эмиттера

ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

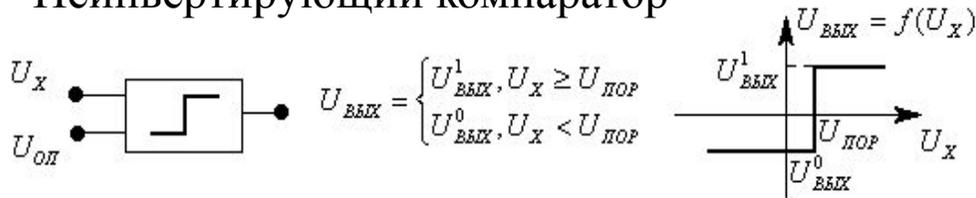


$$\varphi = -2 \arctg(\omega R_1 C)$$

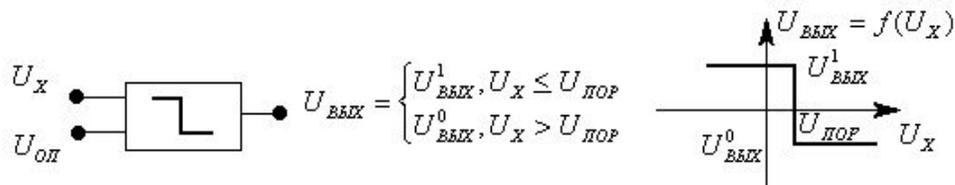
$$\varphi = 0^\circ \div 180^\circ$$

Компараторы напряжений

- Компараторы напряжений это устройства, которые предназначены для сравнения двух сигналов. Они имеют два входа. На один из входов подается исследуемого сигнал U_x , а на другой - опорного напряжения $U_{оп}$.
- В момент времени, когда исследуемый сигнал U_x сравнивается с пороговым напряжением $U_{пор}$, который зависит от величины опорного напряжения ($U_{пор}=F(U_{оп})$), компаратор изменяет свое состояние.
- Состояние компаратора определяется величиной выходного напряжения, которое может принимать два значения: $U_{вых}=U^0_{вых}$ или $U^1_{вых}$.
- Разновидности компараторов:
- Неинвертирующий компаратор



- Инвертирующий компаратор



В качестве компараторов обычно используют операционные усилители. Входные ($U_{вх+}$, $U_{вх-}$) и выходное ($U_{вых}$) напряжения ОУ связаны соотношением: при малом входном сигнале $U_{вых} = K_{оу} (U_{вх+} - U_{вх-})$, (1) где $K_{оу}$ - коэффициент усиления операционного усилителя.

Схема и название	Амплитудная хар-ка	Временные диаграммы
Одновходовой инвертирующий компаратор 	$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R_1}{R_2}$	
Двух входовой инвертирующий компаратор 	$U_{пор} = U_{оп}$	
Одновходовой неинвертирующий компаратор 	$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R_1}{R_2}$	
Двух входовой инвертирующий компаратор 	$U_{пор} = U_{оп}$	
Инвертирующий компаратор с положительной ОС 	$U_{пв} = \frac{R_1}{R_1+R_2} E_{п+}; \quad U_{пн} = \frac{R_1}{R_1+R_2} E_{п-}$	

При большом входном сигнале:
$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} E_{п+}, & U_{ВХ} > 0 \\ E_{п-}, & U_{ВХ} < 0 \end{cases}$$

18.9. Аналоговые перемножители сигналов

Аналоговые перемножители - это устройства, которые предназначены для перемножения двух аналоговых сигналов в виде напряжения и выдачи результата перемножения в форме напряжения. Их условное обозначение приведено на рис.

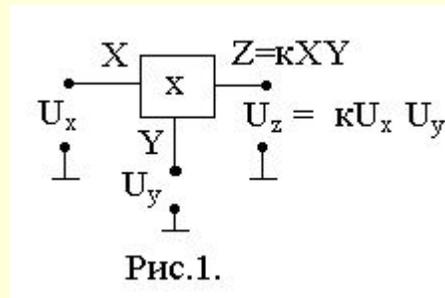


Рис.1.

Разработано несколько способов построения аналоговых перемножителей напряжения: логарифмирующие, квадратирующие, с широтноимпульсной модуляцией и др., однако в интегральных микросхемах преимущественно применяется метод построения перемножителей на принципе переменной крутизны.

В основе этого метод лежит использование дифференциальных каскадов.

Простейшая схема АП на основе дифференциального усилительного каскада приведена на рис. Выходное напряжение дифференциального каскада, определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = R_k(I_{k2} - I_{k1}) = R_k I_0 \operatorname{th}(U_x / 2\phi_T) \approx R_k I_0 (U_x / 2\phi_T),$$

где $U_x = U_2 - U_1$. Учитывая, что $I_0 = U_y / R_3$, получим

$$U_{\text{вых}} = R_k I_0 (U_x / 2\phi_T) = U_x U_y R_k I_0 / (2 R_3 \phi_T) = K U_x U_y.$$

Следовательно, выходное напряжение является результатом перемножения двух напряжений U_x и U_y .

Недостатком этой схемы является:

- малый диапазон перемножаемых сигналов, т.к. $U_x \ll \phi_T$;

- сильная температурная зависимость выходного напряжения, что связано с $\phi_T = kT/e$;

- он работает только в двух квадрантах, т.к. I_0 , а следовательно и U_y не могут принимать отрицательных значений, т. е. преобразователь может быть только двухквадрантным

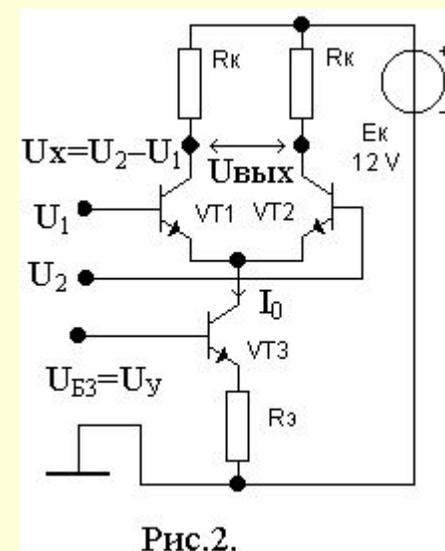


Рис.2.

Схемы аналоговых перемножителей

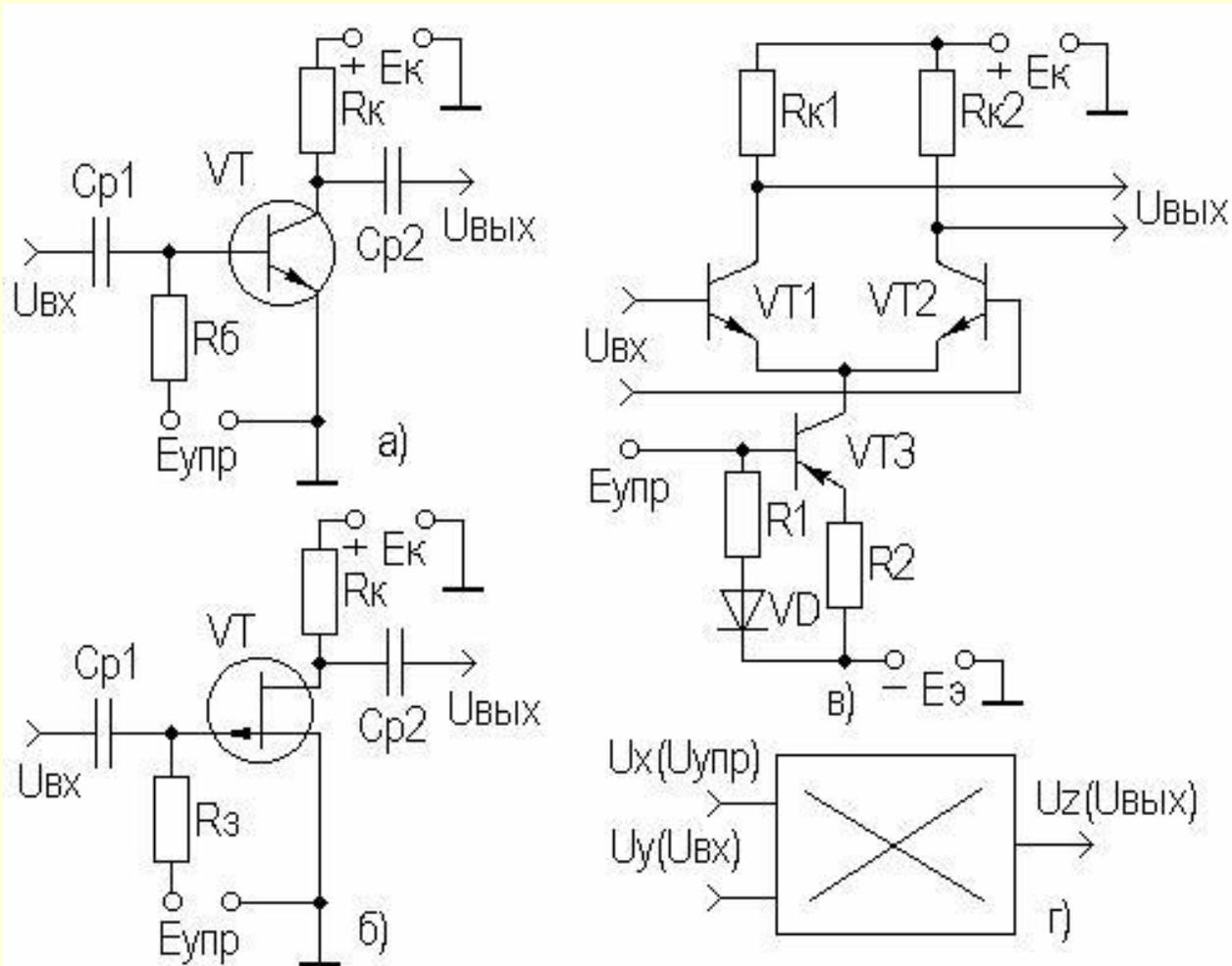
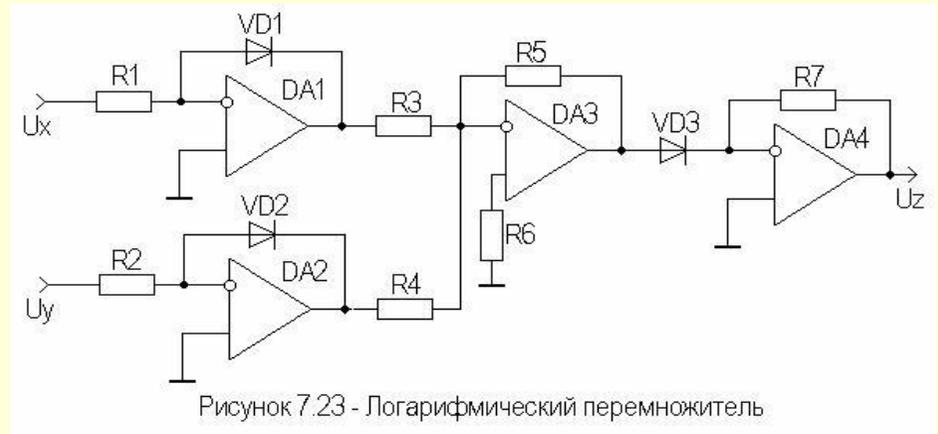


Рисунок 7.7 Регуляторы с изменением режима работы элементов

Более широкий динамический диапазон перемножаемых напряжений при меньшей погрешности обеспечивают логарифмические перемножители построенные по принципу "логарифмирование - антилогарифмирование".
 Схема подобного ПАС приведена на рисунке 7.23.

Здесь ОУ DA1и DA2 производят логарифмирование входных напряжений, а DA3 используется в качестве сумматора, на выходе которого напряжение равно:

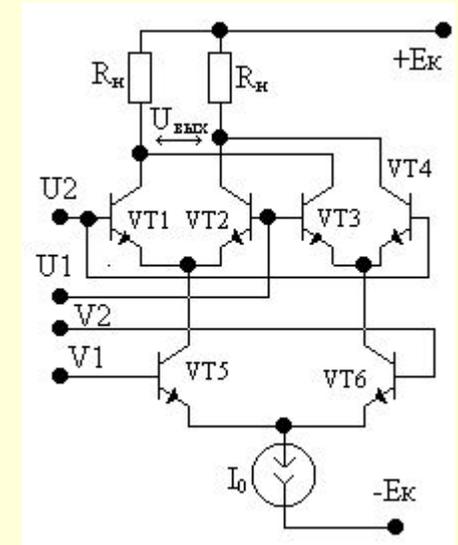
$$U_0 = k_1 (\ln u_x + \ln u_y) = k_2 \ln u_x u_y$$

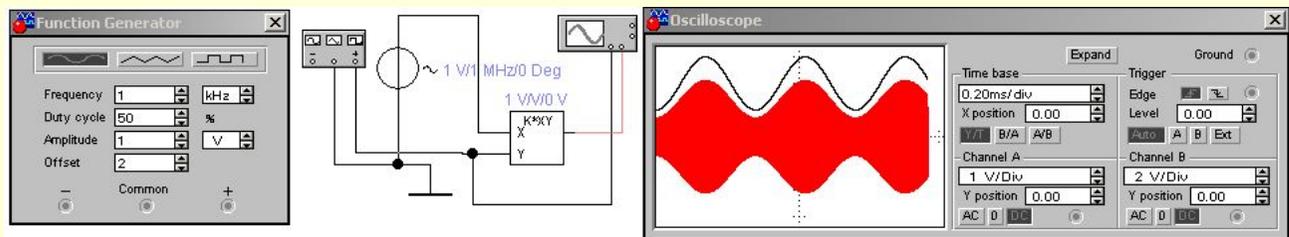


- С помощью ОУ DA4 производят антилогарифмирование $U_{\text{вых}} = k_3 \text{anti ln } U_0 = k_3 u_x u_y$
- Следует заметить, что в данных выражениях используются напряжения, нормированные относительно одного вольта. Коэффициенты пропорциональности K1, K2, K3 определяются резистивными элементами, включенными в цепи ООС используемых ОУ. Большим недостатком подобных ПАС является сильная зависимость диапазона рабочих частот от амплитуд входных сигналов. Так, если при входном напряжении 10В верхняя частота перемножаемых напряжений может составлять 100кГц, то при входном напряжении 1В полоса рабочих частот сужается до 10кГц [13].
- Принцип логарифмирования и антилогарифмирования используется в наиболее распространенном способе построения четырехквadrантных ПАС с нормировкой токов, которые обладают наилучшей совокупностью таких параметров, как линейность, широкополосность, температурная стабильность. Обычно они имеют дифференциальные входы, что расширяет их функциональные возможности. Перемножители с нормировкой токов выполняются по интегральной полупроводниковой технологии.

Схема улучшенного аналогового перемножителя

- Она состоит из двух параллельно соединенных дифференциальных каскадов на транзисторах VT1, VT2 и VT3, VT4. В них токи задаются дифференциальным каскадом на транзисторах VT5, VT6. Входным сигналом второго дифференциального каскада на транзисторах VT3, VT4 является дифференциальное напряжение $U_y = V_2 - V_1$, а входным сигналом для первого дифференциального каскада на транзисторах VT1, VT2 является напряжение $U_x = U_2 - U_1$. Так как смена полярности напряжения U_y приводит к перераспределению токов между дифференциальными каскадами, то эта схема может работать как четырехквadrантный перемножитель входных напряжений.
- Выходное напряжение схемы определяется изменением коллекторных токов транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 выражением
- $$U_{\text{вых}} = (I_2 - I_4) R_{\text{н}} - (I_1 - I_3) R_{\text{н}} = ((I_2 - I_1) + (I_4 - I_3)) R_{\text{н}} .$$
- Учитывая, что
- $(I_4 - I_3) = 2\beta \Delta I_{34} = 2\beta U_x / (2(\beta + 1)R_{\text{эп}}) = U_x / R_{\text{эп}} = U_x I_0 / \phi_T,$
- $(I_2 - I_1) = 2\beta \Delta I_{12} = 2\beta U_x / (2(\beta + 1)R_{\text{эп}}) = U_x / R_{\text{эп}} = U_x I_0 / \phi_T,$
- получаем следующее выражением для выходного напряжения
- $$U_{\text{вых}} = R_{\text{н}} U_x (I_0 - I_0) / 2\phi_T$$
- Разность выходных токов $I_6 - I_5$ определяется входным дифференциальным напряжением $U_y = V_2 - V_1$ на входе дифференциального каскада на транзисторах VT5, VT6.
- $(I_6 - I_5) = 2\beta \Delta I_{56} = 2\beta U_y / (2(\beta + 1)R_{\text{эп}}) = U_y / R_{\text{эп}} .$
- Учитывая, что $R_{\text{эп}} = \phi_T / I_0$, получим
- $$U_{\text{вых}} = U_x U_y R_{\text{н}} I_0 / 2\phi_T = K U_x U_y$$
- Введение избыточных дифференциальных каскадов и генератора тока с зеркальными свойствами увеличивает динамический диапазон схемы во много раз и делает аналоговые ИС перемножителей практически идеальными в широком диапазоне частот, что позволяет стандартизировать радиотехнические цепи.





• Рис.3.1. Схема исследования амплитудного модулятора на АП.

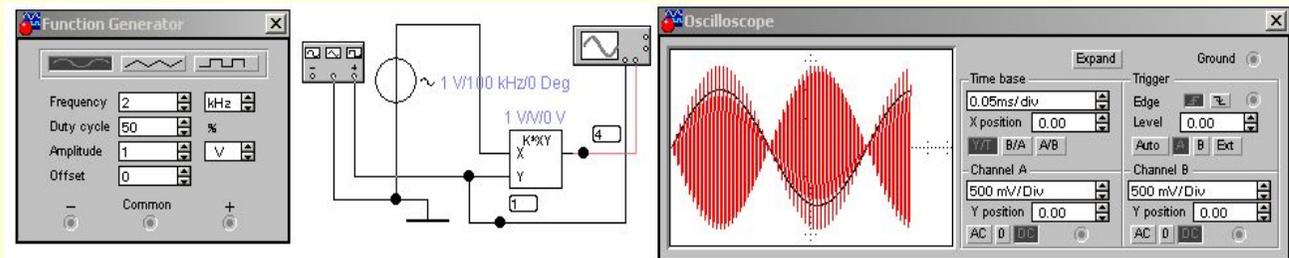


Рис. 3.3. Схема исследования амплитудного балансного модулятора на АП

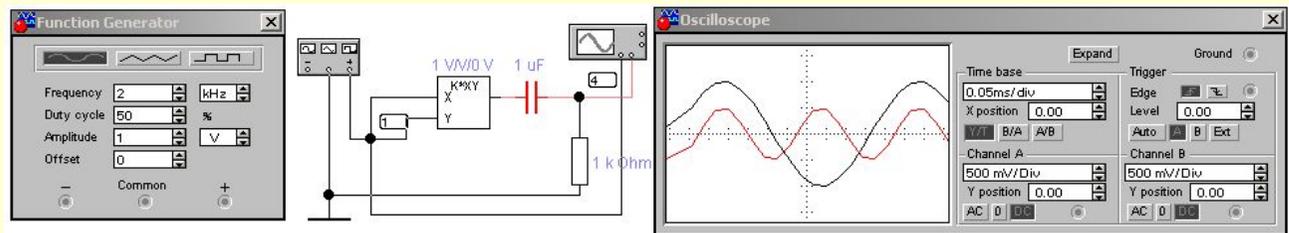
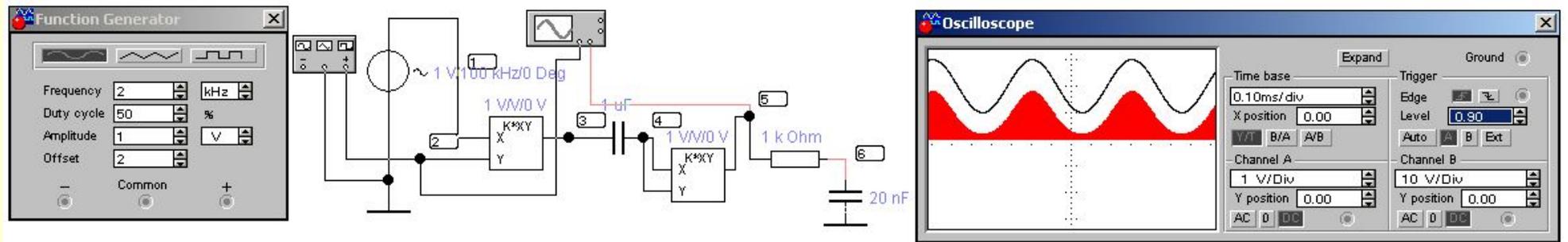
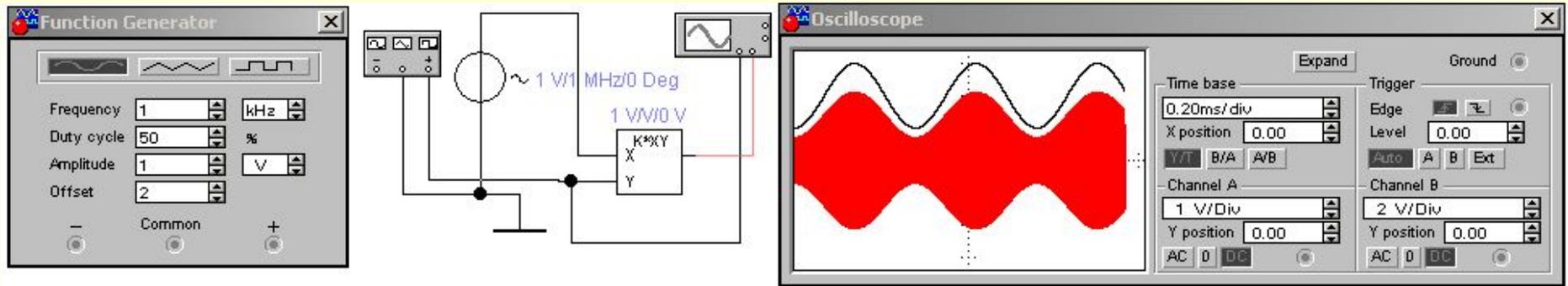


Рис. 3.3. Схема исследования удвоителя частоты



.3.1. Схема исследования амплитудного квадратичного детектора на АП

Различные схемы на АП

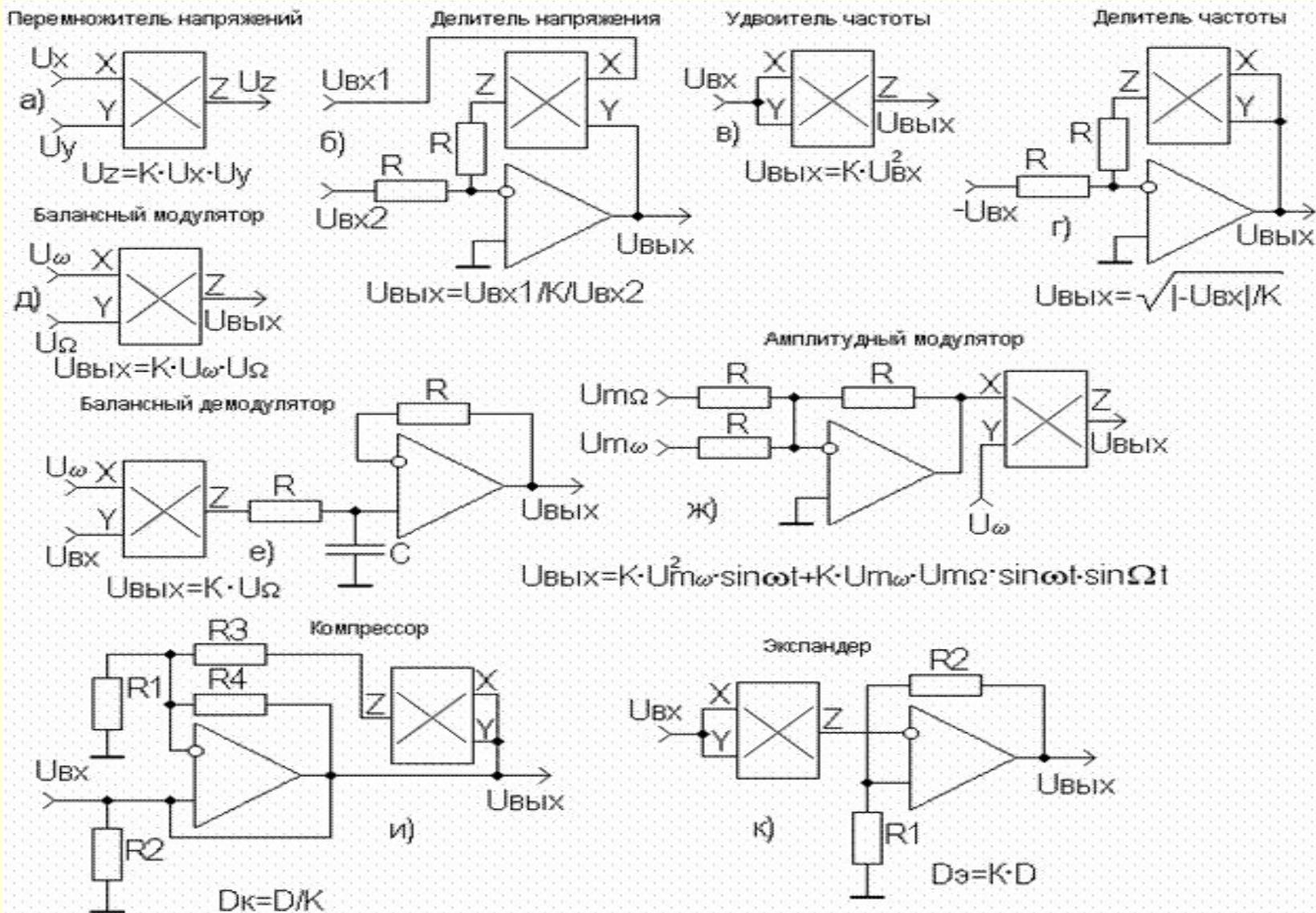


Рисунок 7.25 - Схемы аналоговых электронных устройств на основе ПАС