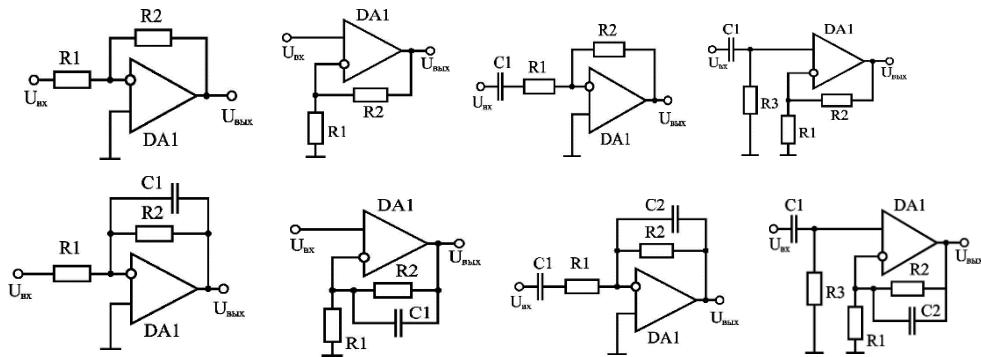


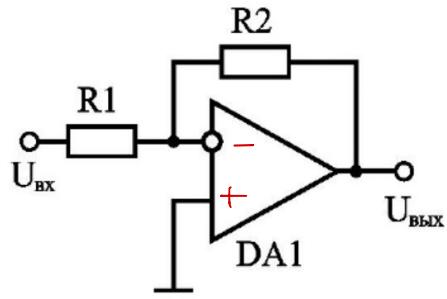
### Вопрос 1 (задача).

Для одной из приведенных схем с указанными номиналами резисторов и конденсаторов определить коэффициент усиления на средних частотах, найти  $f_h$  и  $f_b$ , построить (приближённо) аппроксимированную ЛАЧХ.

ОУ с внутренней частотной коррекцией, указана  $f_1$ .



## Инвертирующий усилитель

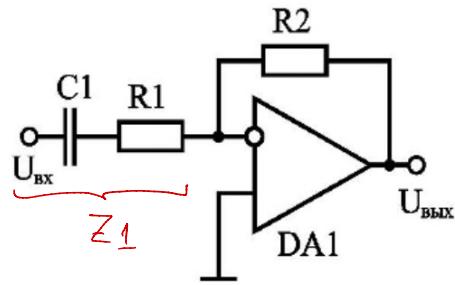
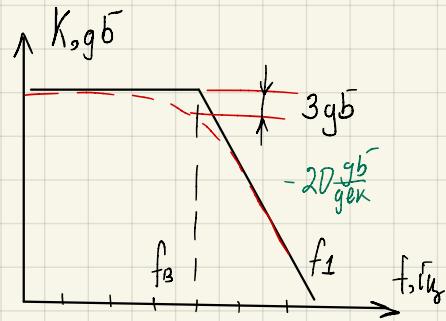


$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$K_{\text{инв}} = 1 - \frac{1}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$f_{\text{инв}} = f_1 \beta = \frac{f_1}{1 + |K|}$$

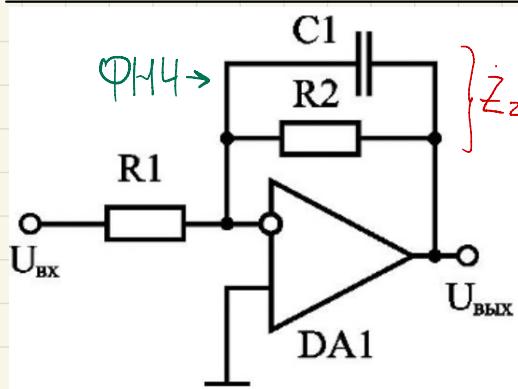
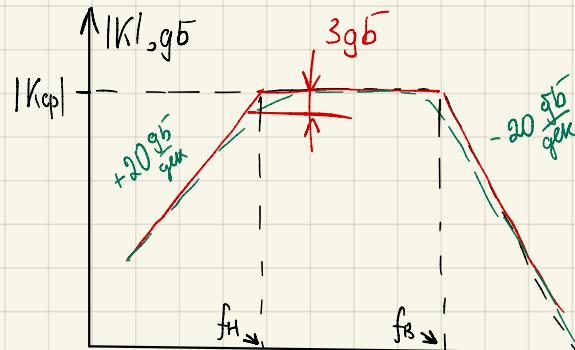
Нижняя  
границная  
частота зависит  
от конденсатора  
(их тут нет)



$$K_{\text{инв}} = 1 - \frac{1}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi L_1 R_1}$$

$$f_B = \frac{f_1}{1 + |K|}$$

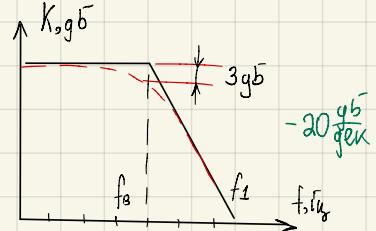


$$K_{\text{инв}} = 1 - \frac{1}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1}$$

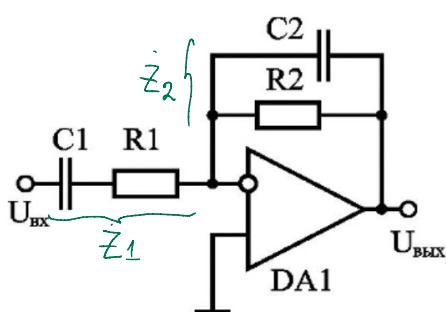
$$f_B = \frac{|K|}{2\pi f_1}$$

$$L_2 = R_2 f_1$$

$$f_{B2} = \frac{1}{2\pi (L_B + L_2)}$$



Нижняя границная частота зависит от конденсатора (их тут нет)



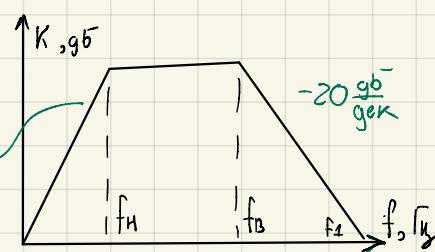
$$K_{\text{инв}} = 1 - \frac{1}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi L_1 R_1}$$

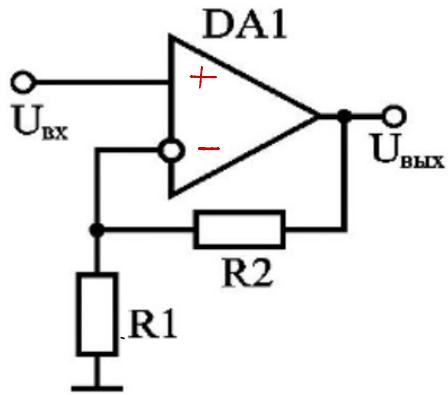
$$f_B = |K| / 2\pi f_1$$

$$L_2 = f_2 R_2$$

$$f_{B2} = \frac{1}{2\pi (L_B + L_2)} + 20 \text{ гб/дек}$$



## Неинвертирующий усилитель

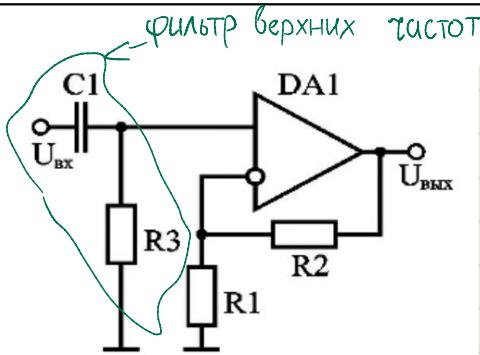
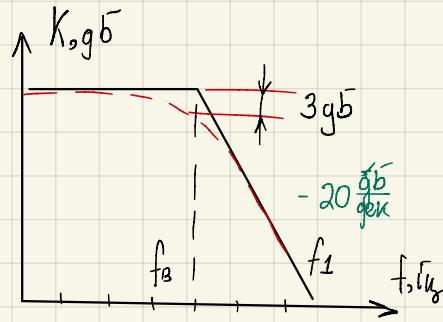


$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$K_{\text{нелив}} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$f_B = f_1 \beta = \frac{f_1}{K_{\text{нелив}}}$$

Нижняя граничная частота зависит от конденсатора (их тут нет)

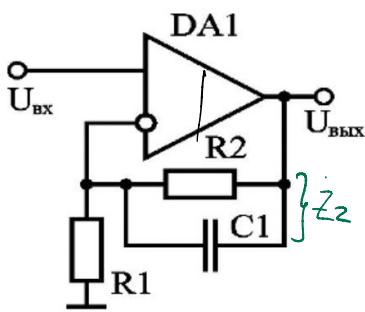
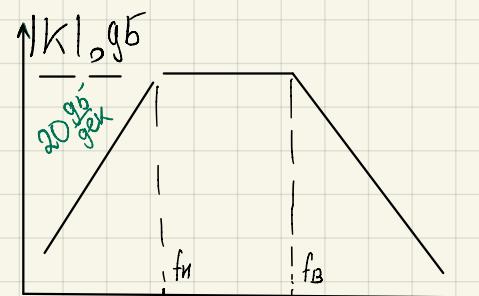


$$K_{\text{нелив}} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi L_1 R_3}$$

$$\tilde{L}_B = \frac{K_{\text{нелив}}}{2\pi f_1}, \quad L_2 = R_2 f_2$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi(\tilde{L}_B + \tilde{L}_2)}$$



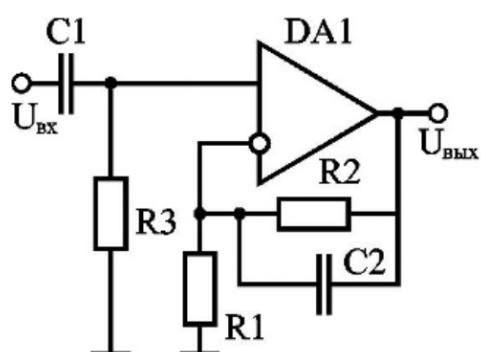
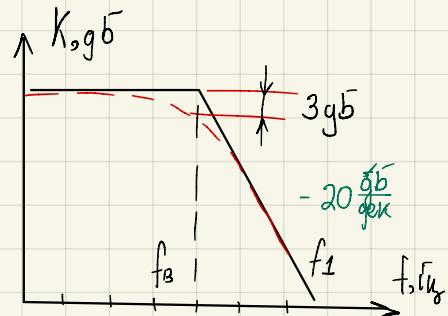
$$K_{\text{нелив}} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Нижняя граничная частота зависит от конденсатора (их тут нет)

$$\tilde{L}_B = \frac{K}{2\pi f_1}$$

$$\tilde{L}_2 = R_2 f_2$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi(\tilde{L}_B + \tilde{L}_2)}$$



$$K_{\text{нелив}} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi L_1 R_3}$$

$$\tilde{L}_B = \frac{K}{2\pi f_1}$$

$$\tilde{L}_2 = R_2 f_2$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi(\tilde{L}_B + \tilde{L}_2)}$$

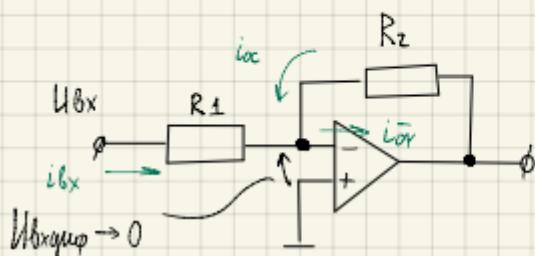


**Информация по проведению контроля модуля 2**  
**(дисциплина «Электроника и микроэлектроника»,**  
**ИУ2, ПС2-4, 2022/2023 уч. год)**

**Вопрос 2.**

Нарисовать схему ОУ в инвертирующем включении

**2. Инвертирующий усилитель на ОУ**



$$\Rightarrow K_{uvb} = \frac{Ubxout}{Ubx} = -\frac{R2}{R1}$$

$$Ubx^+ = 0 \Rightarrow Ubx^- \rightarrow 0$$

$$i_{bx} + i_{ox} + i_{or} = 0 \Rightarrow i_{bx} = -i_{ox}$$

$$i_{or} \rightarrow 0$$

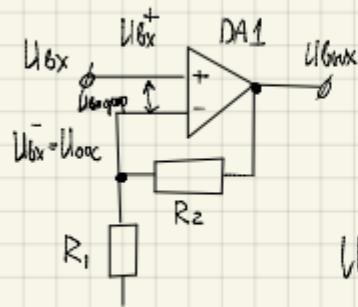
$$\frac{Ubx}{R1} = \frac{Ubx}{R2} = -\frac{Ubx}{R1} \frac{Ubxout}{R2}$$

В данной схеме действует параллельная обратная связь, происходит взаимное вычитание токов

Так как обратная связь параллельная, то входное сопротивление уменьшается  
При глубокой обратной связи это уменьшение оказывается очень большим

Нарисовать схему ОУ в неинвертирующем включении

**1. Неинвертирующий усилитель на ОУ**



Цель обратной связи представляет собой делитель напряжения на обратной связи

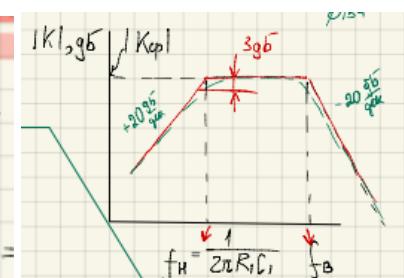
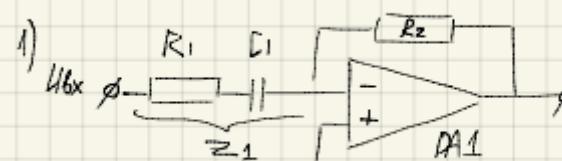
$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2}; \quad Ubx_{out} = Ubx - Ubx \cdot Ubx \cdot \beta = \frac{Ubx}{1 + \beta}$$

$$Ubx = \frac{Ubxout}{1 + \beta} + \beta Ubxout = Ubxout \left( \frac{1}{1 + \beta} + \beta \right)$$

$$K_{uvb} = \frac{Ubxout}{Ubx} = \frac{Ubxout}{Ubxout \left( \frac{1}{1 + \beta} + \beta \right)} = \frac{1}{\frac{1}{1 + \beta} + \beta} = \frac{1 + \beta}{1 + \beta + \beta^2}$$

Нарисовать схему инвертирующего усилителя на ОУ с ограничением полосы частот «снизу»

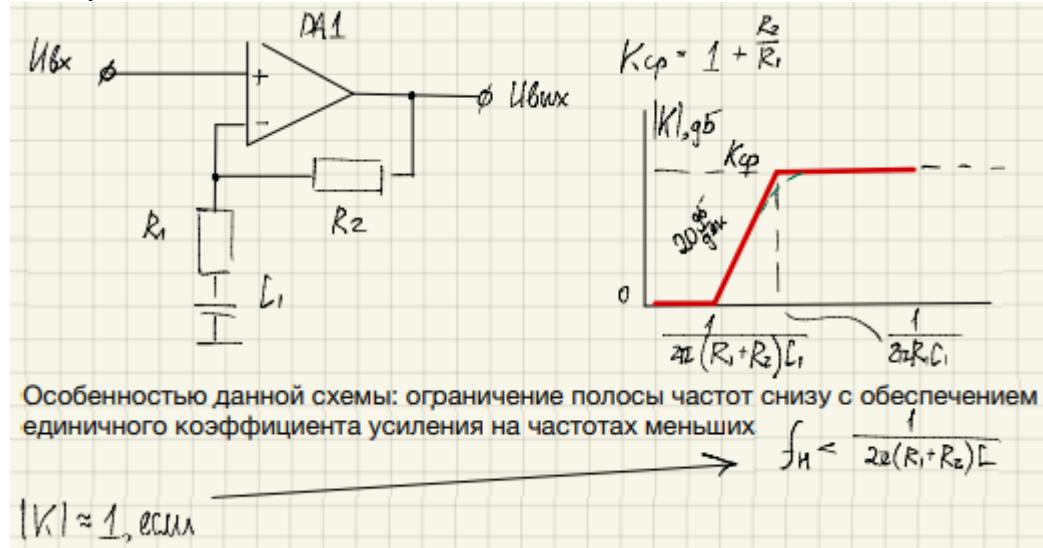
**Ограничение полосы частот снизу**



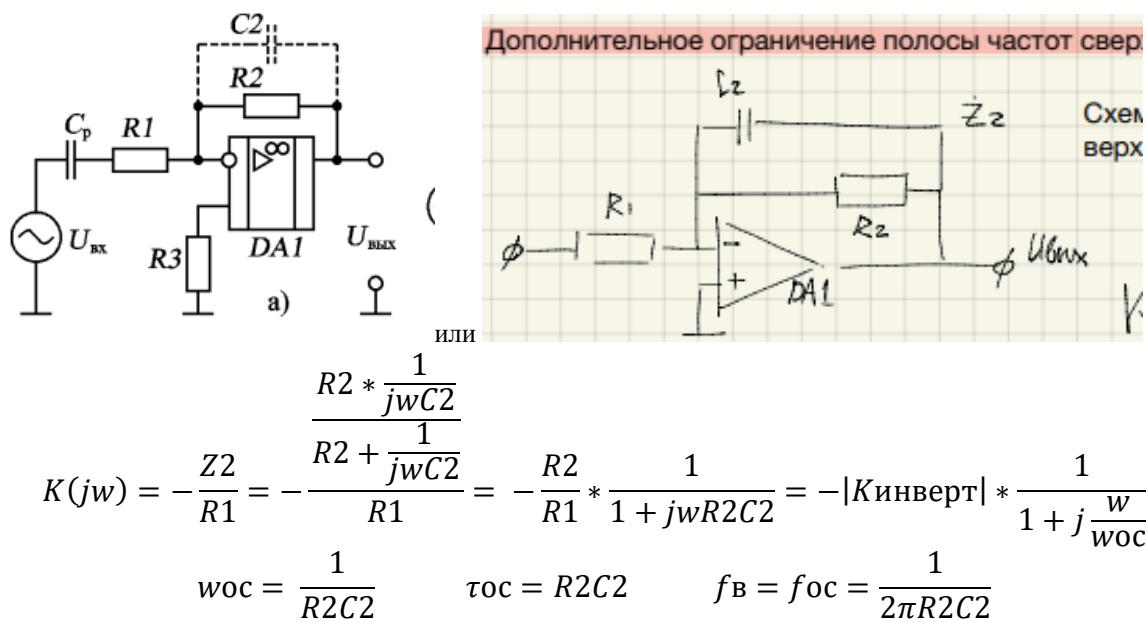
$$K_{uvb}(jw) = -\frac{R2}{R1} = -\frac{R2}{R1 + \frac{1}{jwC1}} = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{jwC1R1}} = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{wH}{w}}$$

$$wH = \frac{1}{R1C1} \quad fH = \frac{1}{2\pi R1C1}$$

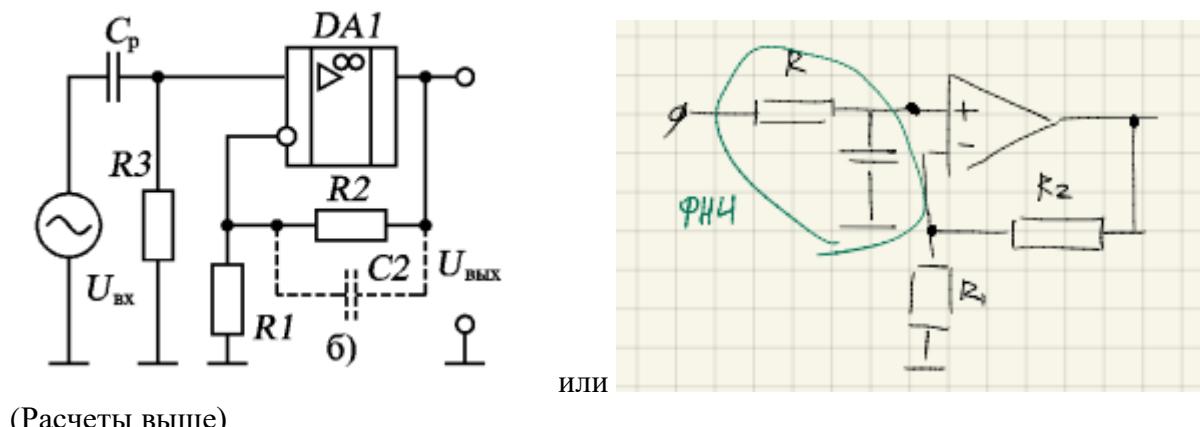
Нарисовать схему неинвертирующего усилителя на ОУ с ограничением полосы частот «снизу»



Нарисовать схему инвертирующего усилителя на ОУ с дополнительным ограничением полосы частот «сверху»



Нарисовать схему неинвертирующего усилителя на ОУ с дополнительным ограничением полосы частот «сверху»

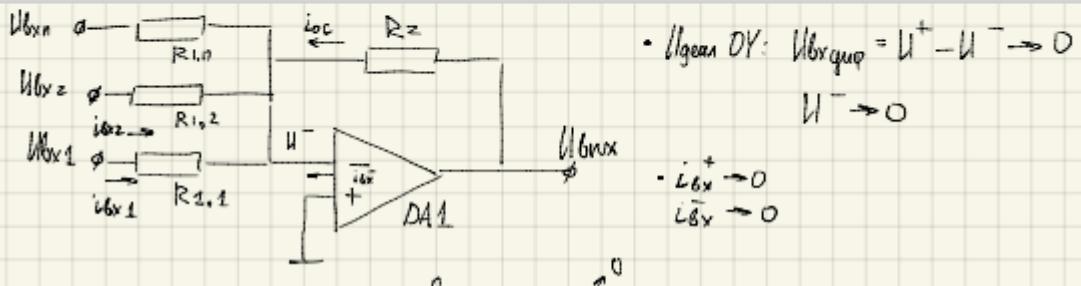


Нарисовать схему суммирующего усилителя на ОУ

### Суммирующий усилитель на ОУ

Выходное напряжение такого усилителя должно быть пропорционально сумме п входных напряжений

1. Считает ОУ идеальный ( для него выполняется принцип виртуально 0)
2. Входные токи стремятся к 0



Нарисовать схему дифференциального усилителя на ОУ

### Дифференциальный усилитель (разностный усилитель)

- это усилитель на выходе которого напряжение пропорционально разности 2x входных напряжений

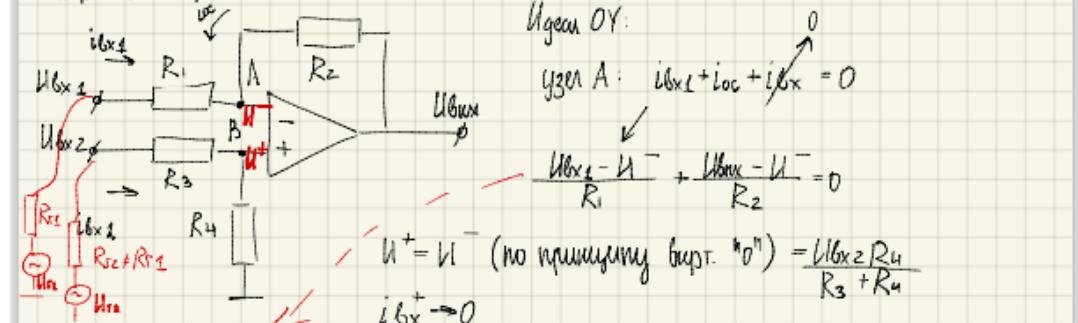
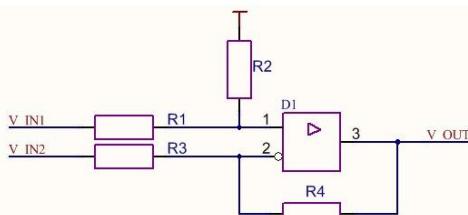
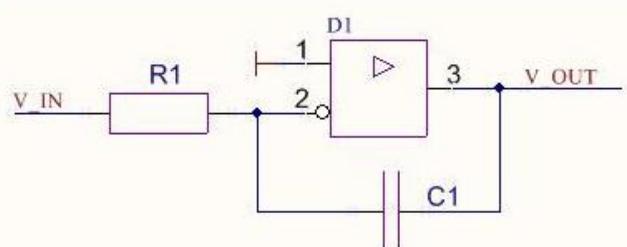


Схема дифференциального усилителя приведена на рисунке.



Нарисовать схему интегратора на ОУ

Простейшая схема интегратора на операционном усилителе, встречающаяся во всех учебниках, приведена на рисунке ниже.



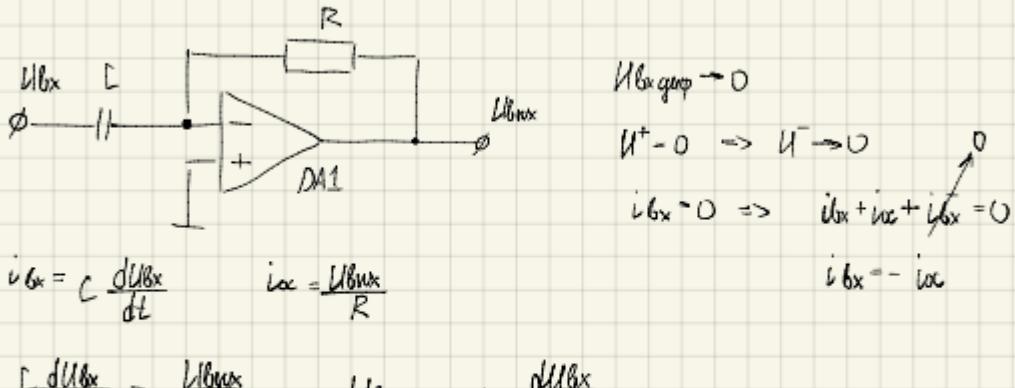
Интегратор можно также рассматривать как фильтр нижних частот. Частота среза АЧХ фильтра высчитывается по формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Нарисовать схему дифференциатора на ОУ

### Дифференциатор на ОУ

Выходное напряжение должно быть пропорционально входному напряжению



На основе реальных ОУ схема дифференциатора часто теряет устойчивость, чтобы не теряла включаются в схему включаются дополнительные элементы

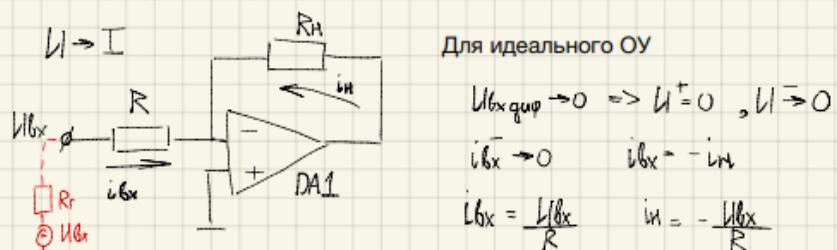
На практике рассматривается неинвертирующая схема

Нарисовать схему преобразователя напряжение-ток на ОУ

### Преобразователи напряжения в ток на основе ОУ

Эти устройства создают в нагрузке ток пропорциональный входному управляемому напряжению и в идеале независящий от сопротивления нагрузки

1. Инвертирующий преобразователь в ток



Можно показать, что выходное сопротивление нагрузки стремится к бесконечности, если ОУ идеальный

$$R_{bxout} \approx R(1 + K_{ov})$$

Можно показать, что очень высоким сопротивлением будет в пределах  $0 \rightarrow f_{ov}$

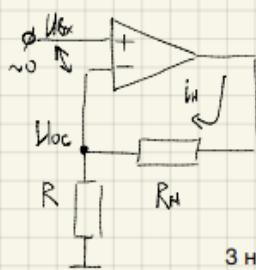


Выходное сопротивление схемы уменьшается с такой скоростью

Недостаток:

1. низкое входное сопротивление  $R$
2. Зависимость выходного тока от выходного сопротивления источника сигнала

2. Неинвертирующий преобразователь в ток



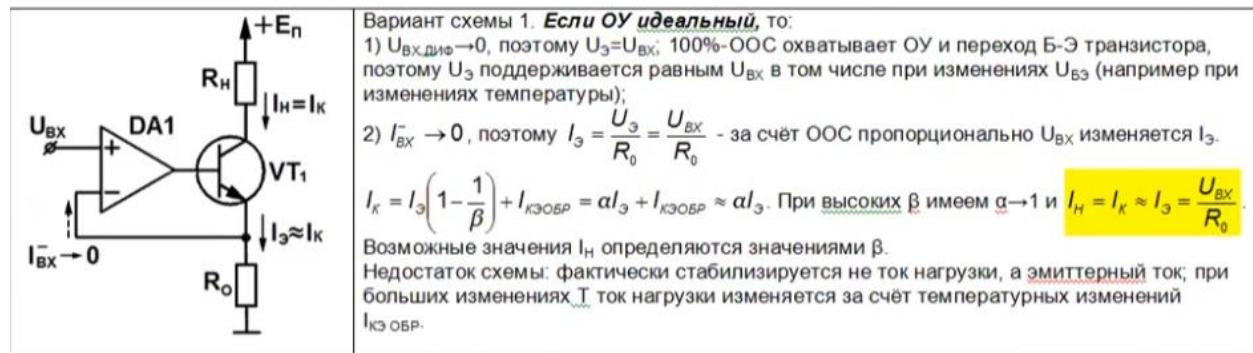
$$I_{bx} = U_{bx} - U_{bxout} / R$$

1 недостаток: в отличие от инвертирующего преобразователя входное сопротивление оказывается высоким, вследствие чего выходной ток нагрузки не зависит от сопротивления источника сигнала

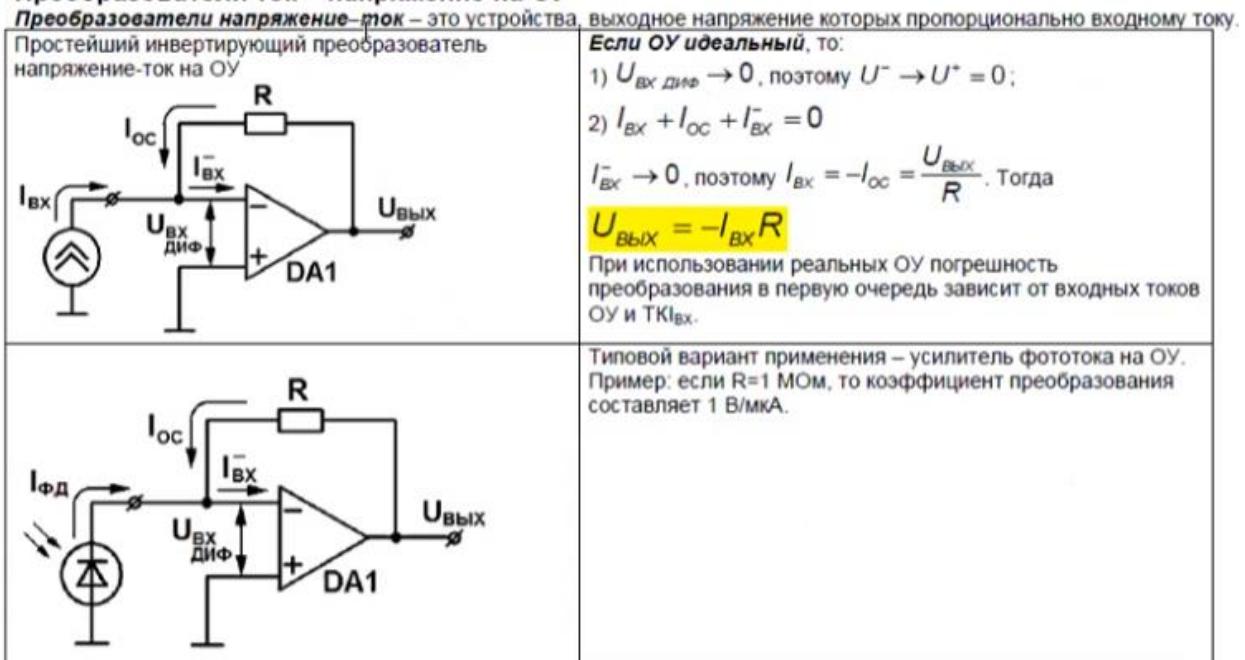
2 недостаток: величина выходного тока не может превышать допустимый выходной ток усилителя

3 недостаток: нагрузка является незаземленной, т.е. не имеющей непосредственного связи с общим проводом

Нарисовать схему преобразователя напряжение-ток с внешним транзистором



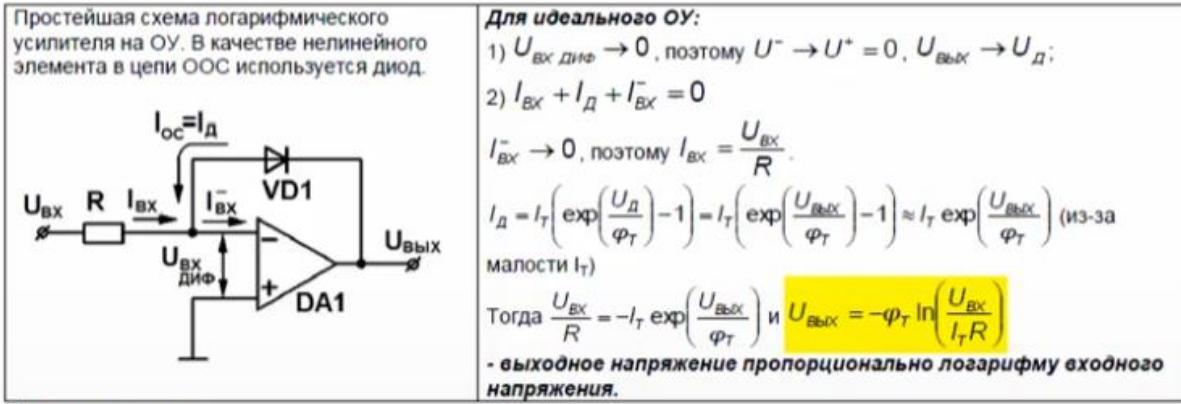
Нарисовать схему преобразователя ток-напряжение на ОУ



Нарисовать схему логарифмического усилителя на ОУ

Характерный пример усилителя с нелинейной характеристикой – **логарифмический усилитель**, выходное напряжение которого пропорционально логарифму входного напряжения. Коэффициент усиления таких усилителей уменьшается при увеличении входного сигнала. При этом эффективно усиливаются малые входные сигналы, а большие входные сигналы не вводят усилитель в насыщение.

Применение: радиолокация, измерительные схемы с широким диапазоном входных напряжений и др.



Недостатки схемы:

малые входные напряжения: при  $U_{BХ} > 100$  мВ погрешность преобразования сильно увеличивается;  
зависимость от температуры.

Нарисовать схему антilogарифмического усилителя на ОУ



Если в схеме поменять местами диод и резистор, то получим антilogарифмический усилитель на ОУ.

1)  $U_{вх\text{ диф}} \rightarrow 0$ , поэтому  $U^- \rightarrow U^+ = 0$ ,  $U_{вх} \rightarrow U_d$ :

2)  $I_{вх} + I_d + I_{вх}^- = 0$ ,  $I_{вх}^- \rightarrow 0$ , поэтому  $I_{вх} = -I_{вх}$ .

$$I_{вх} \approx I_T \exp\left(\frac{U_{вх}}{\varphi_T}\right) = I_T \exp\left(\frac{U_{вх}}{\varphi_T}\right), I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R}$$

$$I_T \exp\left(\frac{U_{вх}}{\varphi_T}\right) = -\frac{U_{вых}}{R}, \text{ тогда } U_{вых} = -R I_T \exp\left(\frac{U_{вх}}{\varphi_T}\right)$$

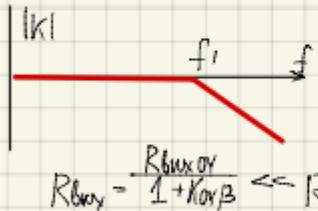
Нарисовать схему повторителя на ОУ

Повторитель на ОУ



В данной схеме действует 100% последовательная ОС по напряжению, что и обеспечивает  $K=1$

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_{1\infty}}$$



Плюсы: очень высокое входное сопротивление

$$R_{6x} = R_{6x\text{OU}} (1 + K_{OU} \beta) \gg R_{6x\text{OU}}, \beta = 1$$

$$R_{6x\text{OU}} = \frac{R_{6x\text{OU}}}{1 + K_{OU} \beta} \ll R_{6x\text{OU}}$$

Как и любой повторитель можно использовать, как буферную схему между высокоомным источником сигнала и низкоомным усилителем

Но работает такой повторитель гораздо лучше, чем простейший повторитель

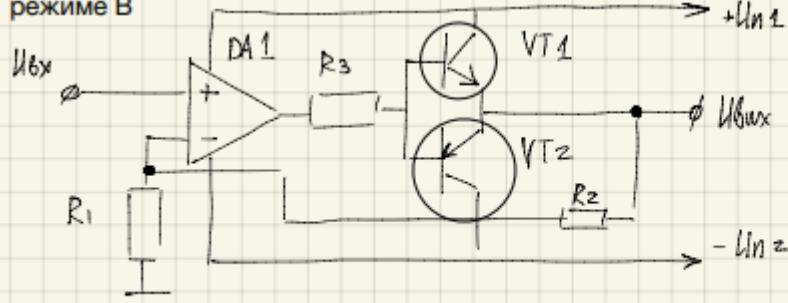
Нарисовать схему усилителя на ОУ с увеличением выходного тока дополнительным выходным каскадом

Повышение выходного тока ОУ

В основном величина максимального выходного тока составляет 1 мА (редко 10 мА)

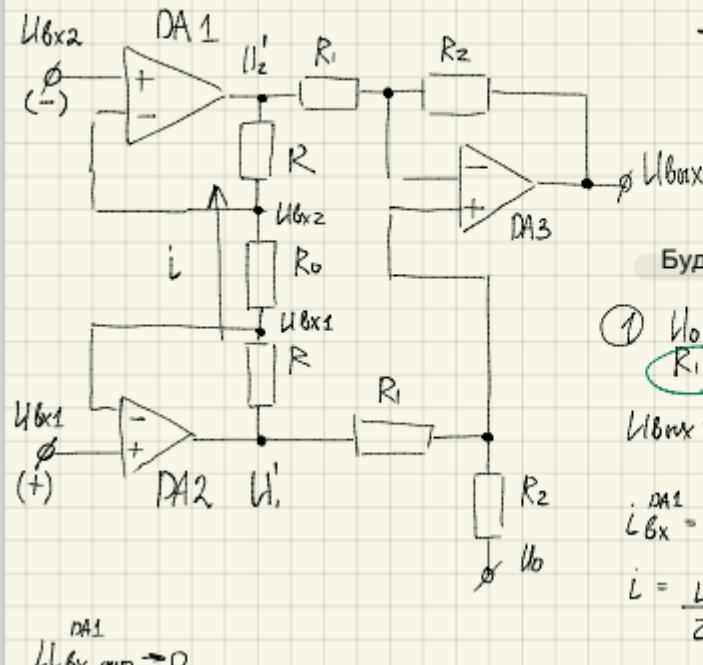
Для повышения выходного тока на выходе схемы с ОУ ставится дополнительный усилительный каскад, при этом ООС должна охватывать как ОУ, так и дополнительный выходной каскад

Простейший пример: усилитель на ОУ с дополнительным двухтактным повторителем в режиме В



Нарисовать схему измерительного (инструментального) усилителя на трёх ОУ

## Измерительный ( инструментальный) усилитель на 3 ОУ



- это усилитель с дифференциальным входом, высоким входным сопротивлением, имеющий высокий точностные характеристики вследствие чего и используются в разного рода измерительных схемах

Будем считать, что 3 ОУ идеальны

$$\textcircled{1} \quad \begin{array}{l} R_1 = R_2 \\ R_1 = 0 \end{array} \quad (\text{сумні рівнопомп. випад.)}$$

$$U_{B_{\text{max}}} = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2) = U_1 - U_2 \quad \text{⇒}$$

$$\Delta A_1 = \Delta A_2$$

$$L = \frac{L_1' - L_2'}{ZB + R_0} = \frac{L1_{Bx1} - L1_{Bx2}}{R_0}$$

$$\text{Ll6x gap} \rightarrow 0$$

$$U_B \xrightarrow{\Delta A^2} \text{gap} \rightarrow 0$$

$$\Leftrightarrow U_{Bx1} - U_{Bx2} \left( \frac{2R + R_0}{R_0} \right) = (U_{Bx1} - U_{Bx2}) \left( 1 + \frac{2R}{R_0} \right)$$

### Достоинства:

1. Для изменения коэффициента усиления , можно в данной схеме изменять сопротивление одного резистора  $R_0$
  2. Da1 и Da2 являются повторителями, входное сопротивление по обоим входам оказывается очень высоким

②  $b_0 \neq 0$

$$U_{Bx0} = U_{Bx1} - U_{Bx2} \left( 1 + \frac{2R}{R_0} \right) + U$$

Kang

No. \_\_\_\_\_

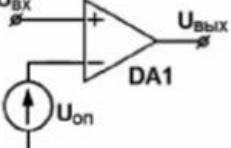
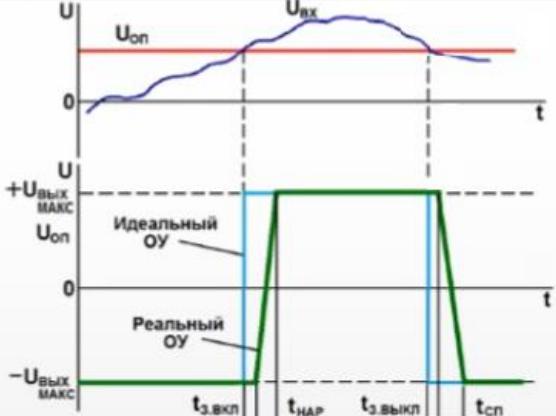
На основе данной схемы создаются специализированные интегральные микросхемы инструментальных усилитель, где внутри микросхемы размещены все элементы микросхемы, кроме  $R_o$ . Меняя значение этого сопротивления, коэффициент усиления сигнала можно изменять

Нарисовать схему компаратора на ОУ

Компаратор сравнивает напряжение сигнала на одном входе с опорным напряжением, поданным на его другой вход. При этом на выходе компаратора отрабатывается двоичный уровень напряжения, значение которого позволяет судить о том, больше или меньше напряжение исследуемого сигнала по отношению к опорному. В качестве компаратора может быть использован операционный усилитель, на один из входов которого подан входной сигнал, а на другой – опорное напряжение (рис. 11.1).

## Компараторы напряжений

**Компаратор – устройство для сравнения двух сигналов.** Простейший компаратор может быть построен на основе ОУ без ООС.

	<p>Наиболее распространённый случай – сравнение входного напряжения <math>U_{bx}</math> с постоянным опорным напряжением <math>U_{оп}</math>.      Если <math>U_{bx} &lt; U_{оп}</math>, то <math>U_{вых} = -U_{вых, \text{макс}} &lt; 0</math>      Если <math>U_{bx} &gt; U_{оп}</math>, то <math>U_{вых} = +U_{вых, \text{макс}} &gt; 0</math>.</p>
<p>У компаратора на идеальном ОУ выходное напряжение мгновенно переходит с уровня <math>-U_{вых, \text{макс}}</math> на уровень <math>+U_{вых, \text{макс}}</math> и обратно. Для реального ОУ включение и выключение сопровождается переходом транзисторов ОУ из режима отсечки в режим насыщения и обратно, поэтому появляются <math>t_{з.вкл}</math> и <math>t_{з.выкл}</math> – времена задержки включения и выключения.</p>	
<p><math>t_{напр}</math> и <math>t_{сп}</math> – время нарастания и спада выходного напряжения, определяются величиной <math>VU</math>, для многих ОУ не нормируются.</p>	

При ответе на вопрос 1 (задача) : формула – подстановка значений – ответ. Можно давать краткие пояснения.

При ответе на вопрос 2 достаточно нарисовать требуемую схему, но также можно дать краткие пояснения (насколько хватит времени и знаний).

При ответе на вопрос 3 постараться дать максимально подробный ответ (можно писать обо всём, что считаете прямо связанным с вопросом).

### Вопрос 3.

#### 1. Какие параметры ОУ характеризуют его быстродействие?

Параметры, характеризующие быстродействие ОУ, можно разделить на параметры для малого и большого сигналов. К первой группе динамических параметров относятся полоса пропускания  $f_p$ , частота единичного усиления  $f_T$  и время установления  $t_y$ . Эти параметры называются малосигнальными, т.к. они измеряются в линейном режиме работы каскадов ОУ ( $U_{\text{вых}} < 1\text{В}$ ). Ко второй группе относятся скорость нарастания выходного напряжения  $g$  и мощностная полоса пропускания  $f_p$ . Эти параметры измеряются при большом дифференциальном входном сигнале ОУ (более 50 мВ). Некоторые из этих параметров рассмотрены выше. Время установления

#### 2. Какие параметры ОУ характеризуют точность его работы?

К точностным параметрам относятся:

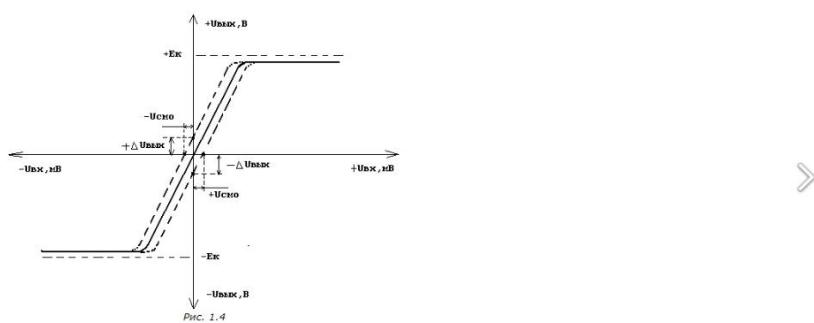
- дифференциальный коэффициент усиления по напряжению ( $K_U$ );
- коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС);
- напряжение смещения нуля ( $U_{\text{см}}$ );
- входной ток ( $I_{\text{вх}}$ );
- разность входных токов по инвертирующему и неинвертирующему входам ( $I_p$ );
- коэффициент влияния источников питания ( $K_{\text{в.ип}}$ );
- коэффициенты температурных дрейфов перечисленных параметров.

Действие точностных параметров проявляется в том, что при постоянных напряжениях на входах выходное напряжение ОУ отличается от расчетного

#### 3. Какие параметры ОУ характеризуют его температурную стабильность?

##### Дрейфовые характеристики

На (рис. 1.4) показан вид передаточной характеристики реального ОУ.



Напряжение  $U_{\text{сно}}$  при котором  $U_{\text{вых}} = 0$ , называется **входным напряжением смещения** нуля. Оно определяется значением напряжения, которое необходимо подавать на вход ОУ для создания баланса. Напряжения  $U_{\text{сно}}$  и  $\Delta U_{\text{вых}}$  связаны соотношением  $U_{\text{сно}} = \Delta U_{\text{вых}} / K_{\text{уоу}}$ . Основной причиной разбаланса ОУ является существенный разброс параметров элементов дифференциального усилительного каскада. Зависимость от температуры параметров ОУ вызывает **температурный дрейф** входного напряжения смещения и **температурный дрейф** выходного напряжения.

Важным параметром ОУ является коэффициент “дрейфа нуля”  $\Delta U_{\text{см}}^0 \Delta U_{\text{см}}^0 = \Delta U_{\text{вых}} / (\Delta T K_{\text{у пар}})$ , характеризующий изменение выходного потенциала при  $U_{\text{вх}} = 0$  в некотором диапазоне изменения **температуры** (или с течением времени).

#### 4. Основные свойства прецизионных ОУ

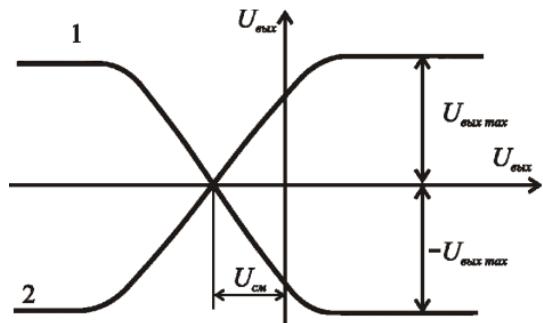
Прецизионные усилители характеризуются суммарной погрешностью не более долей процента и при среднем быстродействии имеют высокий коэффициент усиления напряжения, малое напряжение смещения нуля, большой коэффициент подавления синфазного сигнала, малый входной ток и низкий уровень шума

## 5.Основные свойства быстродействующих ОУ

Быстродействующие усилители имеют высокую частоту единичного усиления  $f = 50 \dots 100$  МГц и обеспечивают скорость нарастания выходного сигнала  $vU = 10 \dots 1000$  В мкс при средних точностных параметрах.

## 6.Основные свойства ОУ общего применения

Универсальные усилители общего назначения широко распространены. Это дешевые усилители среднего быстродействия, невысокой точности и малой выходной мощности, с типичными параметрами:  $KU = 103 \dots 105$ , предельной частотой  $f = 0,1 \dots 10$  МГц и напряжением смещения нулевого уровня  $U_{cm} = 0,1 \dots 10$  мВ. Под напряжением смещения нулевого уровня понимается напряжение смещения амплитудной характеристики операционного усилителя.



## 7.Свойства идеального ОУ

Идеальный операционный усилитель имеет бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению ( $KU = \infty$ ), бесконечно большое входное сопротивление, бесконечно малое выходное сопротивление, бесконечно большой коэффициент обратной связи и бесконечно широкую полосу рабочих частот. На практике ни одно из этих свойств не может быть осуществлено полностью, однако к ним можно приблизиться в достаточной для многих областей мере.

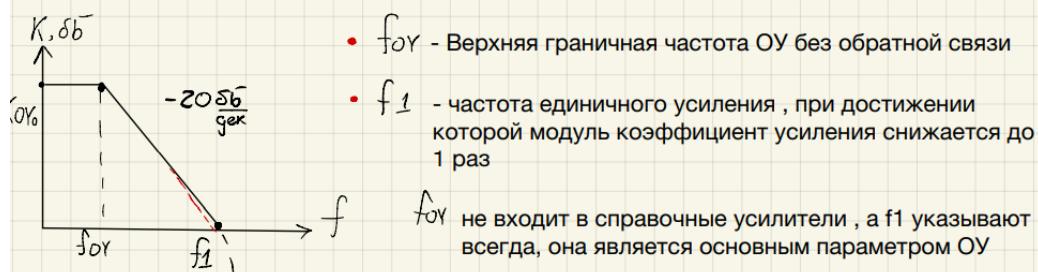
## 8.Нарисовать ЛАЧХ ОУ с внутренней частотной коррекцией, дать необходимые пояснения

Простейшая частотная коррекция обеспечивает устойчивость работы усилителя, но ценой существенного снижения полосы пропускания ОУ.

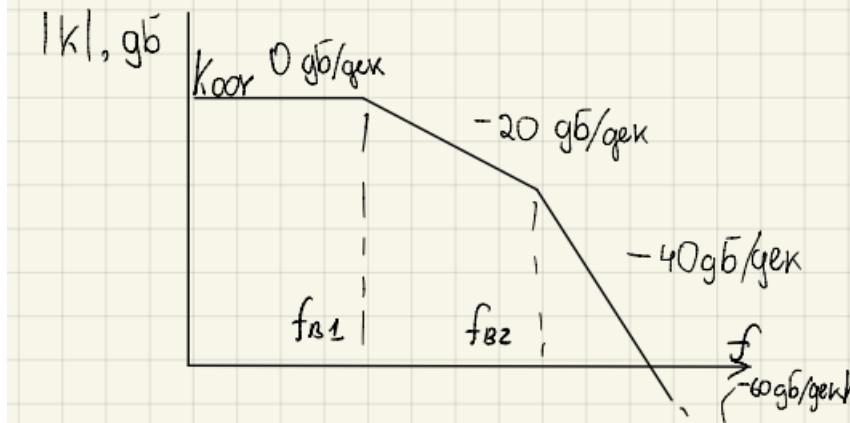
Вследствие этого у усилителей с подобной коррекцией собственная граничная частота  $f_{oy}$  фактически равна частоте корректирующего фильтра, и составляет 1-10 Гц.

Помимо простейшей коррекции могут применяться более сложные корректирующие цепи, при применении которых полоса операционного усилителя сужается не так сильно, как при простейшей емкостной коррекции.

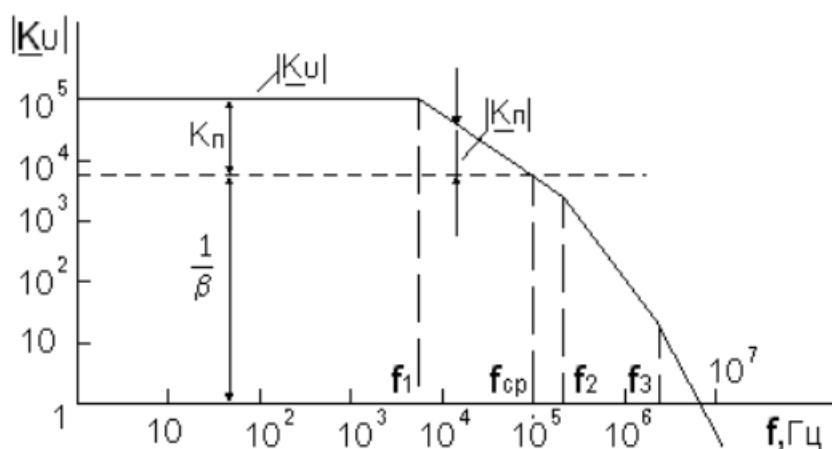
Усилители с внутренней частотной коррекцией, у которых частотная характеристика в наклонной своей части имеет наклон -20дБ



## ЛАЧХ ОУ без внутренней частотной коррекции



9. Нарисовать ЛАЧХ ОУ без внутренней частотной коррекции, дать необходимые пояснения



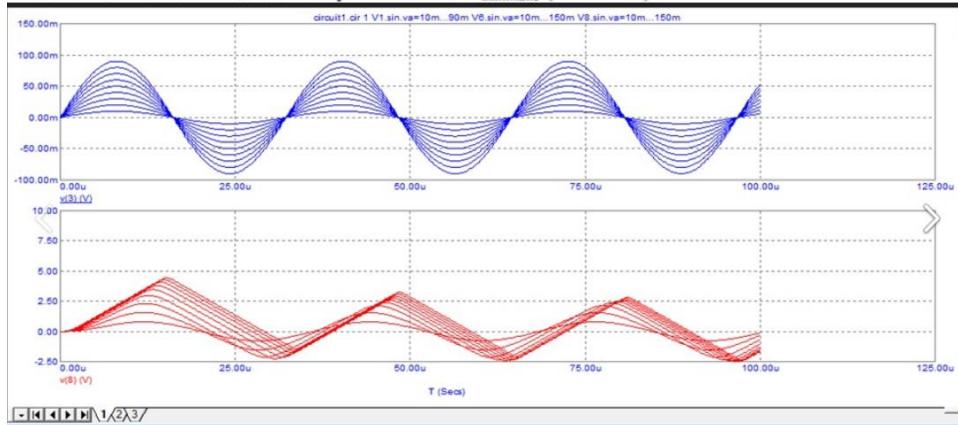
Выше частоты  $f_1$  частотная характеристика определяется инерционным звеном с максимальной постоянной времени. Коэффициент усиления в этой области убывает со скоростью  $-20$  дБ/дек. Выше частоты  $f_2$  начинает действовать второе инерционное звено, коэффициент усиления убывает быстрее ( $-40$  дБ/дек), а фазовый сдвиг между  $U_d$  и  $U_{вых}$  достигает  $\varphi = -180^\circ$ . Частота, при которой выполняется это условие, называется критической  $f_{кр}$ . Частота, при которой модуль коэффициента усиления петли обратной связи (коэффициента петлевого усиления)  $|K_p| = |\beta K_u| = 1$ , называется частотой среза  $f_{ср}$ .

10. Какова причина динамических нелинейных искажений? Пояснить влияние ограниченной скорости нарастания выходного напряжения ОУ на форму выходного сигнала (дать поясняющий рисунок)

**Динамические искажения** – обусловлены ограниченной скоростью изменения выходного напряжения ОУ второго каскада. Чаще проявляются на высоких частотах – например, при увеличении амплитуды синусоидального входного сигнала выходной сигнал постепенно превращается из синусоидального в треугольный (рис. 3, б). Можно показать, что динамические искажения выходного сигнала с частотой  $f$  становятся заметными, если амплитуда выходного напряжения превышает значение  $U_{\text{вых.макс.}}$ :

$$U_{\text{вых.макс.}} > U_{\text{вых.макс.}} = V_{U2} / 2\pi f,$$

где  $V_{U2}$  – скорость нарастания выходного напряжения ОУ второго каскада. При выполнении задания для каждого варианта схемы усилителя следует определить  $U_{\text{вых.макс.}}$  на частотах  $f_a$  и  $f_b/2$ . Однако при расчете может получиться, что определенное таким образом  $U_{\text{вых.макс.}}$  будет больше максимального выходного напряжения ОУ  $U_{\text{вых.макс.}}$  т. е. оказывается физически нереализуемым. Это означает, что на частоте  $f_a$  динамические искажения не проявляются. В этом случае нелинейные искажения проявляются как ограничение выходного сигнала на уровне максимального выходного напряжения ОУ  $U_{\text{вых.макс.}}$  (см. выше).



11. Описать, как возникают нелинейные искажения в усилителе на ОУ на низких частотах, дать поясняющий рисунок

**Ограничение выходного напряжения по уровням  $\pm U_{\text{вых.макс.}}$**  – в основном типично для низких частот, но может проявляться и при работе на высоких частотах. С учетом того, что напряжение на выходе усилителя на ОУ будет изменяться не относительно нуля, а относительно напряжения сдвига  $U_{\text{сдв}}$  (рис. 3, а; вычисление  $U_{\text{сдв}}$  см. далее), максимальная амплитуда неискаженного выходного сигнала может быть определена как

$$U_{\text{вых.макс.}} = U_{\text{вых.макс.}} - U_{\text{сдв.}}$$

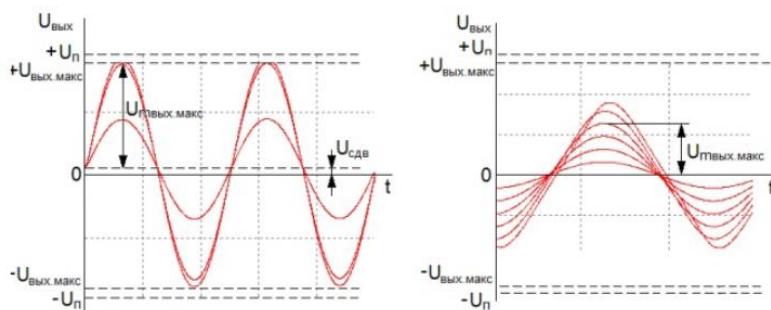


Рис. 3. Нелинейные искажения из-за ограничения выходного напряжения (а); динамические искажения выходного напряжения ОУ (б)

12. Какова причина наличия выходного напряжения сдвига? Привести формулу для вычисления  $U_{\text{сдв}}$ .

Сдвиг выходного напряжения  $U_{\text{сдв}}$  в основном определяется сдвигом выходного напряжения ОУ первого каскада  $U_{\text{сдв1}}$  и в меньшей степени сдвигом выходного напряжения ОУ второго каскада  $U_{\text{сдв2}}$ :

$$U_{\text{сдв}} = K_2 U_{\text{сдв1}} + U_{\text{сдв2}}$$

Данная формула подходит для вычисления  $U_{\text{сдв}}$  усилителей постоянного тока ( $f_u=0$ ) и усилителей переменного напряжения, у которых разделительный конденсатор включен во входной цепи первого каскада для гальванической развязки входа усилителя и источника входного сигнала (рис. 1, а, б). Очевидно, что если разделительный конденсатор  $C_1$  включен между каскадами усилителя (рис. 1, в, г), образуя с  $R4$  ФВЧ, то  $U_{\text{сдв}} = U_{\text{сдв2}}$ , т. е. существенно уменьшается. Наконец, включаем разделительный конденсатор на выходе второго каскада усилителя, получаем на выходе усилителя  $U_{\text{сдв}} = 0$ , однако следует учесть, что непосредственно на выходе ОУ DA2 все равно остается постоянное напряжение  $U_{\text{сдв2}}$ .

$U_{\text{сдв1}}$  и  $U_{\text{сдв2}}$  зависят от напряжений смещения нуля и входных токов используемых ОУ и определяются для каждого каскада отдельно. Из анализа эквивалентной схемы ОУ при отсутствии входного сигнала (рис. 4) сдвиг выходного напряжения схемы на ОУ может быть определен следующим образом:

$$U_{\text{сдв}} = |(Ra + Rb)/Ra| [U_{\text{см}} + I_{\text{вх}}^+ R_c - I_{\text{вх}}^- R_a R_b / (R_a + R_b)],$$

где  $U_{\text{см}}$  – напряжение смещения нуля ОУ (приведенное ко входу),  $I_{\text{вх}}^+$  и  $I_{\text{вх}}^-$  – токи неинвертирующего и инвертирующего входов ОУ.

В каких пределах могут находиться параметры ОУ:

коэффициент усиления

В современных ОУ величина коэффициента усиления достигает десятков, а иногда и сотен тысяч.

частота единичного усиления

**Частота единичного усиления  $f_1$**  – частота, на которой  $k(f_1) = 1$

Типовое значение  $f_1 = (0,1 \div 100)$  МГц.

напряжение смещения нуля

Напряжение смещения зависит от температуры и напряжения источников питания. Типичная паспортная величина напряжения смещения нуля 10 – 50 мВ. Величина дрейфа 1 – 50 мкВ / °C.

входные токи

начальный входной ток, который определяется входным сопротивлением ОУ; обычно сила входного тока составляет 1 – 100 мкА;

максимальная скорость нарастания выходного напряжения

Максимальная скорость нарастания современных ОУ находится в пределах **0.3 – 50 В/мкс.**

выходное сопротивление.

Для разных типов ОУ находится в пределах от 50 до 2000 Ом.