

министерство образования и науки республики казахстан

**ВОСТОЧНО - КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени Д.СЕРИКБАЕВА**

Асет Асхат

**АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 050716 «Приборостроение»

Усть-Каменогорск  
2009

УДК 621.37

**Асет Асхат.** Аналоговые электронные устройства. Методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 050716 «Приборостроение» / А. Асет/ВКГТУ.- Усть-Каменогорск,2009.-34с

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов на практических занятиях и некоторым разделам теоретического курса. Они включают краткий теоретический материал, достаточный для решения рассматриваемых задач, примеры решения задач и задания на самостоятельную работу.

Данные методические указания могут быть использованы также студентами и других специальностей, изучающих затронутые темы.

Утверждено Методической комиссией факультета информационных технологий и энергетики

Протокол №            от            2009г.

©Восточно-Казахстанский  
государственный технический  
университет им. Д. Серикбаева,  
2009



## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| 1. Теоретическая часть .....  | 5  |
| 1.1. Общие сведения об операционных усилителях.....   | 5  |
| 1.2. Структура ОУ.....  | 6  |
| 1.3. Основные параметры ОУ.....   | 8  |
| 1.4. Характеристики ОУ.....   | 9  |
| 1.5. Схема включения ОУ.....  | 16 |
| 2. типовые включения ОУ с резистивной обратной связью.....                                    | 16 |
| 2.1. Инвертирующее включение ОУ.....  | 16 |
| 2.2. ОК терістеуші қосылуы.....   | 21 |
| 2.3. Дифференциялық қосылу кезіндегі операциялық күшейткіш<br>(дифференциялық күшейткіш)..... | 22 |
| 2.4. Синфазное включение ОУ.....  | 23 |
| 2.5. Выбор операционного усилителя.....   | 24 |
| 3. Задание.....   | 26 |
| 4. Экспериментальная часть.....   | 27 |
| 5. Методические указания .....  | 29 |
| Список литературы .....   | 34 |

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям для студентов исследование характеристик и параметров аналоговых устройств на операционном усилителе с резистивной обратной связью и изучение теоретических сведений об операционных усилителях с резистивной обратной связью и устройствах на их основе, изучение методики исследования, составление схем установок для выполнения экспериментальной части работы, подготовка заготовки отчета, выполнение эксперимента, анализ результатов, оформление и защита отчета.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Общие сведения об операционных усилителях

Операционным усилителем (ОУ) называют высококачественный усилитель постоянного тока, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление и ослабление, сложение и вычитание, интегрирование и дифференцирование, логарифмирование, преобразование их формы и др. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей положительной и отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости и индуктивности, диоды, транзисторы и другие элементы.

Согласно ГОСТ 2.759-82 на схемах радиоаппаратуры ОУ обозначается прямоугольником (рис. 1.1,а), в верхней части которого изображается равнобедренный треугольник, указывающий направление передачи. Оба вывода входов ОУ делают с одной стороны прямоугольника, обычно слева, а выход - с противоположной стороны. Вход, сигнал с которого передается на выход ОУ без изменения фазы, называется неинвертирующим, или прямым. Другой вход является инвертирующим (инверсионным) и отмечается кружком.

Прямоугольник может быть разграничен на основное и дополнительные одно или два поля, расположенные по обе стороны от основного. На дополнительных полях указывают назначение дополнительных выводов ОУ (питание, коррекция, балансировка нуля, корпус микросхемы). Большинство ОУ питаются от двух разнополярных источников питания, как правило, равной величины  $+E_{п1}$  и  $-E_{п1}$ .

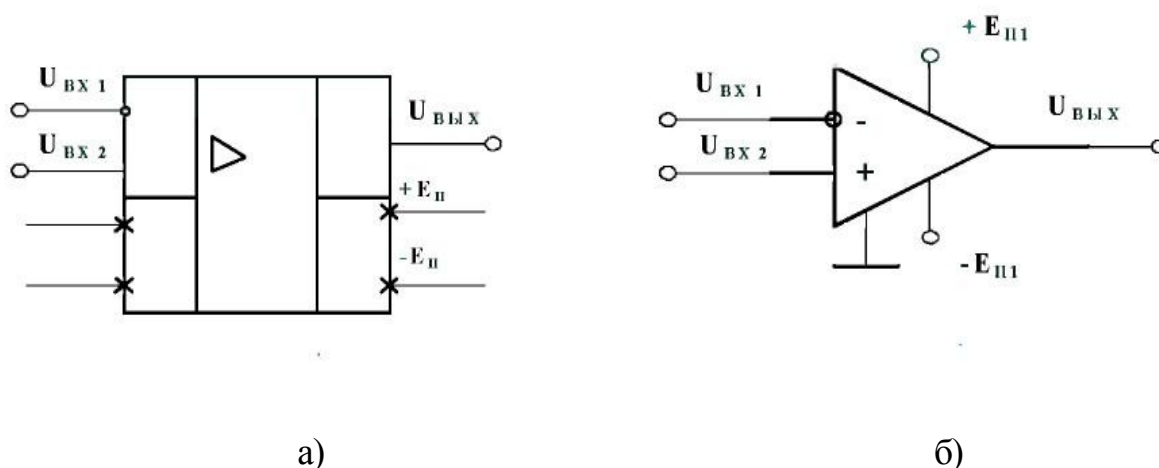


Рисунок 1.1 Условное обозначение ОУ:

а) Обозначение ОУ согласно ГОСТ 2.759-82;

б) обозначение ОУ, широко распространенное в технической литературе

На рисунок 1.1,б приведено широко распространенное в технической литературе обозначение ОУ в виде равностороннего треугольника, которое будет использоваться в настоящих методических указаниях.

Выходное напряжение при дифференциальном включении определяется следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = K_0(U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1})$$

где  $K_0$  - коэффициент усиления ОУ.

При этом одно из входных напряжений может быть равно нулю, а второй вход включен на корпус. Если оба входа ОУ соединить вместе, то имеем один вход, а приложенный к нему сигнал называется синфазным входным сигналом

$$U_{\text{вх.сф}} = K_0(U_{\text{вх}2} = U_{\text{вх}1})$$

Идеальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

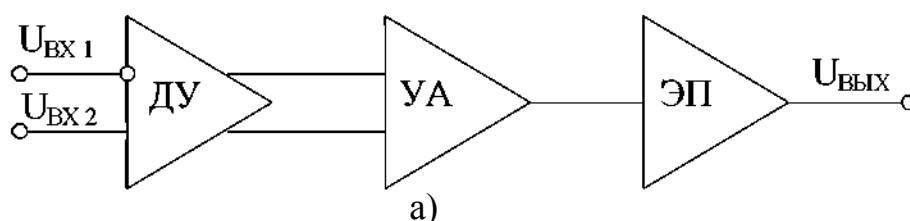
- дифференциальный коэффициент передачи (усиления) - неограниченно большая величина,
- бесконечно большое входное сопротивление,
- нулевое выходное сопротивление,
- полностью подавляет синфазную составляющую сигнала,
- бесконечная полоса пропускания.

Реальные ОУ по своим параметрам весьма близки к идеальным ОУ. Поэтому при решении многих задач реальные ОУ можно заменять идеальными и рассматривать их как усилительные "кирпичики", из которых можно строить различные усилительно-преобразовательные устройства.

## 1.2 Структура ОУ

Для современных интегральных ОУ характерны две структуры: трехкаскадная и двухкаскадная.

Трехкаскадная структура (рис.1.2,а) включает дифференциальный усилитель (ДУ), усилитель напряжения (УН), усилитель амплитуды (УА) и выходной

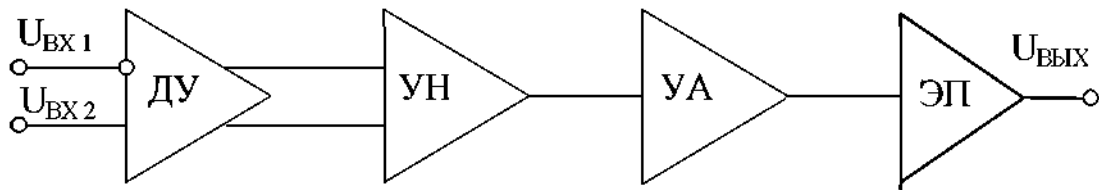


эмиттерный повторитель (ЭП).

Рисунок 1.2 Структура типового ОУ: трехкаскадная (а) и двухкаскадная (б) модели ОУ



б)



Первый каскад ОУ - дифференциальный с эмиттерной связью и резисторной нагрузкой, необходимой для уменьшения дрейфа нуля, подавления синфазной помехи, увеличения входного сопротивления и усиления входного дифференциального сигнала.

Второй каскад - усилитель напряжения обеспечивает основное усиление входного дифференциального сигнала по напряжению, строится также по дифференциальной схеме и включает специальную схему сдвига потенциала.

В третьем каскаде - усилителе амплитуды - обычно совмещаются схемы усиления сигнала, схемы сдвига уровня и формирования выходного двухполярного неискаженного сигнала. Как правило, все схемы ОУ заканчиваются эмиттерными повторителями (ЭП), которые определяют нагрузочную способность ОУ и не участвуют в формировании его коэффициента усиления.

Двухкаскадная модель ОУ (рис.1.2,б) включает дифференциальный усилитель (ДУ), усилитель амплитуды (УА) и выходной эмиттерный повторитель (ЭП). В этой модели первый каскад выполняет функции входного ДУ и малосигнального УН, а также схемы сдвига уровня.

В остальном каскады УА и ЭП не отличаются от одноименной трехкаскадной модели.

На рис.1.3 приведена упрощенная принципиальная схема двухкаскадного ОУ. Дифференциальный каскад ОУ выполнен на транзисторах Т1 ...Т4. Транзисторы Т1, Т2 образуют дифференциальный усилитель,

а транзисторы Т3, Т4 - его динамическую нагрузку. Выходным сигналом дифференциального каскада является  $2i_i$  - ток, который поступает в интегрирующее звено, выполненное на транзисторах Т5, Т6 и корректирующей емкости  $C_k$ . Выходным сигналом интегратора тока является напряжение  $U_i$ , равное напряжению на конденсаторе  $C_k$ .

Повторитель напряжения выполнен на транзисторах Т7, Т8 по схеме с эмиттерной нагрузкой.

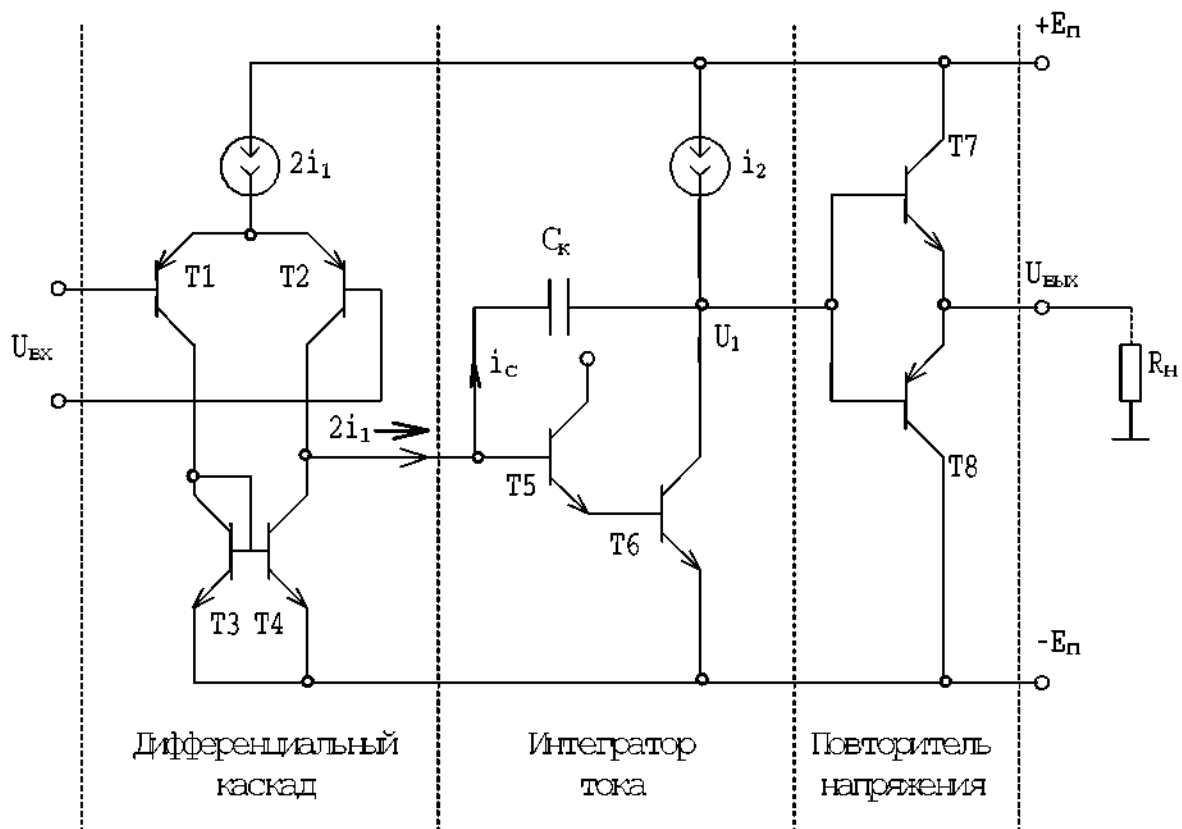


Рисунок.1.3. Упрощенная принципиальная схема двухкаскадного ОУ

В лабораторной работе исследуется двухкаскадный ОУ 140УД8Б, принципиальная схема которого приведена в прил. 3. Некоторые особенности схемы 140УД8Б:

- а) входной дифференциальный каскад выполнен на полевых транзисторах T1, T2 и T3, T4, включенных по каскодной схеме;
- б) балансировка ОУ осуществляется с помощью внешнего потенциометра 0.5 - 2к, включенного между 2-м и 6-м выводами ОУ (эмиттеры транзисторов T5, T6) и источником питания  $-E_n$ ;
- в) для обеспечения устойчивости усилителя (т.е. для устранения опасности самовозбуждения) применена внутренняя коррекция с помощью емкости C, включенной между выходом 2-го каскада (коллекторы транзисторов T7, T8) и первым каскадом (база транзистора T9).

### 1.3 Основные параметры ОУ

Для полного описания свойств ОУ необходимо знать десятки его параметров. Рассмотрим основные из них.

1. Коэффициент усиления дифференциального входного сигнала без об-

ратной связи  $K_0$ , равного десяткам - сотням тысяч раз.

2. Напряжение смещения ( $U_{см}$ ) - величина постоянного входного напряжения, при котором выходное напряжение равно нулю.

3. Коэффициент ослабления синфазного входного сигнала ( $K_{ос}$ ) - отношение коэффициента усиления дифференциального входного напряжения ОУ к коэффициенту усиления синфазного входного напряжения или коэффициент, равный отношению синфазного входного напряжения к дифференциальному входному напряжению, вызывающих одно и то же приращение выходного напряжения. Обычно выражается в децибеллах и на низких частотах составляет от 60 до 120 дБ.

4. Максимальное входное синфазное напряжение  $U_{вх.сф.макс.}$  - это такое напряжение постоянного тока, примененное к обоим входам одновременно, при котором коэффициент ослабления синфазного входного сигнала на переменном токе уменьшается в 2 раза (на 6 дБ).

5. Входное сопротивление для дифференциального сигнала или дифференциальное входное сопротивление  $R_{вх}$ . Оно составляет от единиц килоом до десятков мегаом.

6. Синфазное входное сопротивление  $R_{вх.сеп.}$  - это сопротивление между корпусом и замкнутыми друг с другом входами. Оно составляет обычно не менее десятков мегаом.

7. Выходное сопротивление  $R_{вых}$  ОУ обычно невелико и не превышает сотен ом. Часто вместо выходного сопротивления ОУ дается величина минимального сопротивления нагрузки  $R_{им.мин.}$

8. Верхняя граничная частота  $F_B$ , определяемая для ОУ без обратной связи на уровне  $0.707K_0$ .

9. Частота единичного усиления  $F_i$  - это частота, на которой коэффициент усиления ОУ  $k_d = 1$ .

10. Скорость нарастания выходного напряжения ( $V_{тр}$ ) - максимальная скорость изменения выходного напряжения ОУ при воздействии на вход импульса максимального входного напряжения прямоугольной формы.

11. Время нарастания  $t_{нар}$  (время установления) - это время изменения нормированной переходной характеристики от уровня 0.1 до уровня 0.9.

12. Входная емкость  $C_{вх}$

13. Разность входных токов ( $A_{1вх}$ ) - разность значений токов, протекающих через входы дифференциального ОУ при заданном значении входного напряжения. Она тем меньше, чем симметричнее усилительные плечи первого каскада, чем выше входное сопротивление ОУ и при применении на входе полевых структур.

## 1.4 Характеристики ОУ

### 1. Передаточная характеристика ОУ по постоянному току

Передаточная характеристика ОУ по постоянному току - это зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$  - Схема для измерения передаточной характеристики ОУ по постоянному току показана на рис.1.4.

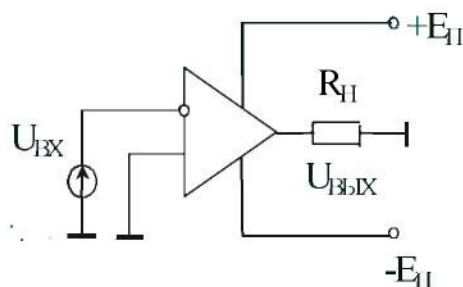


Рисунок 1.4 Схема включения ОУ по постоянному току

Передаточные характеристики ОУ для инвертирующего и неинвертирующего включения приведены на рисунок 1.5

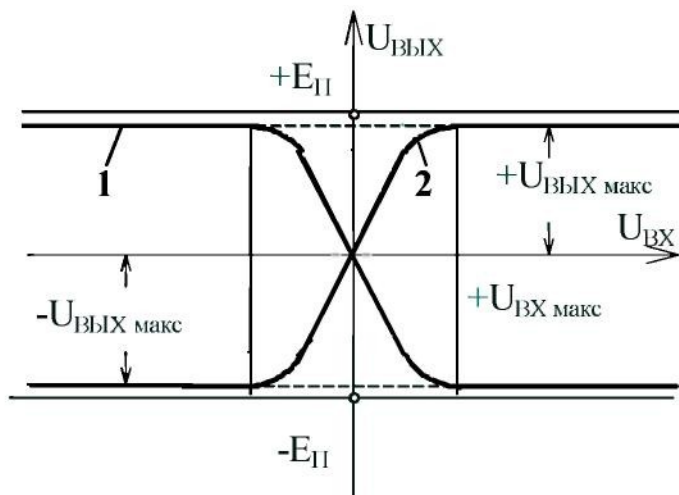


Рисунок 1.5 Передаточные характеристики ОУ по постоянному току для инвертирующего (1) и неинвертирующего (2) включения ОУ

При отсутствии обратной связи тангенс угла наклона характеристик в диапазоне  $-U_{\text{вх.макс}} \dots +U_{\text{вх.макс}}$  коэффициенту усиления  $K_0$ . Максимальное напряжение  $U_{\text{ВЫХ.макс}}$  близко к напряжению источников питания  $\pm E_{\text{П}}$ . В реальных ОУ наблюдается разбаланс, который устраняется подачей на вход ОУ внешнего напряжения смещения нуля  $\pm U_{\text{СМ}}$ .

На рис.1.6 приведена эквивалентная схема компенсации разбаланса ОУ, а на рис.1.7 - передаточные характеристики ОУ с учетом напряжения смещения нуля и его компенсации.

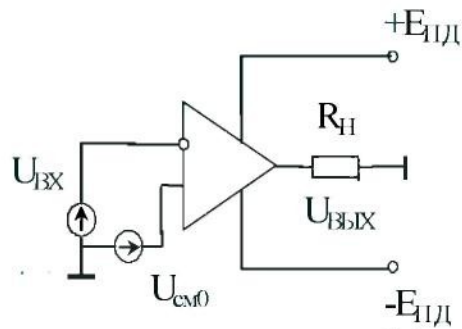


Рисунок 1.6 Эквивалентная схема компенсации разбаланса ОУ

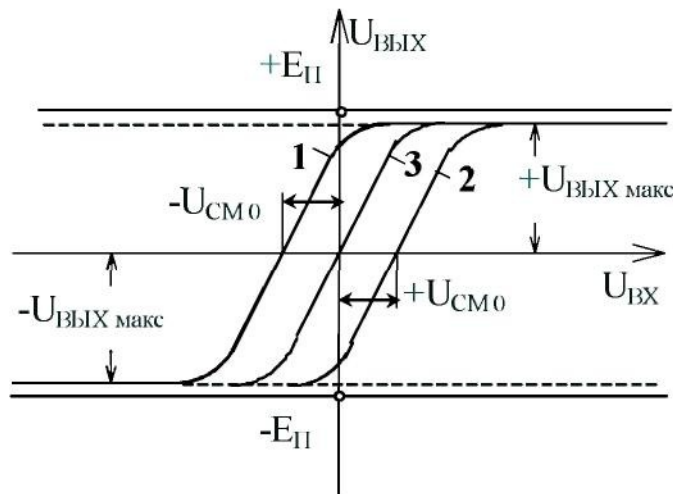


Рисунок 1.7 Передаточная характеристика ОУ по постоянному току с учетом смещения нуля (1,2) и его компенсации (3)

2. Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики ОУ для малого сигнала

Операционные усилители, имеющие трехкаскадную структуру (рис.2.2,а) для малого сигнала обладают амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) с тремя полюсами.

Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики ОУ, снятые в режиме малого сигнала, имеют вид, изображенный на рис.1.8

Плавные кривые линии - реальные характеристики, ломаные прямые - их аппроксимации. Наиболее распространенной является аппроксимация частотной характеристики отрезками прямых, наклон которых соответствует  $-20\text{дБ/декаду}$ , а фазовой - участками, фазовый сдвиг на которых равен  $\pi - (7t/2)$ , где  $\pi = 0,1,2,\dots$  (так называемые диаграммы Боде).

Диаграммы боде соответствуют внутренней структуре частотной и фазовой характеристик многокаскадного ОУ, которые складываются из характеристик отдельных каскадов

$$K(f)[\text{дБ}] = \sum k_i(f) [\text{дБ}],$$

$$\varphi(f) = \sum \varphi_i(f)$$

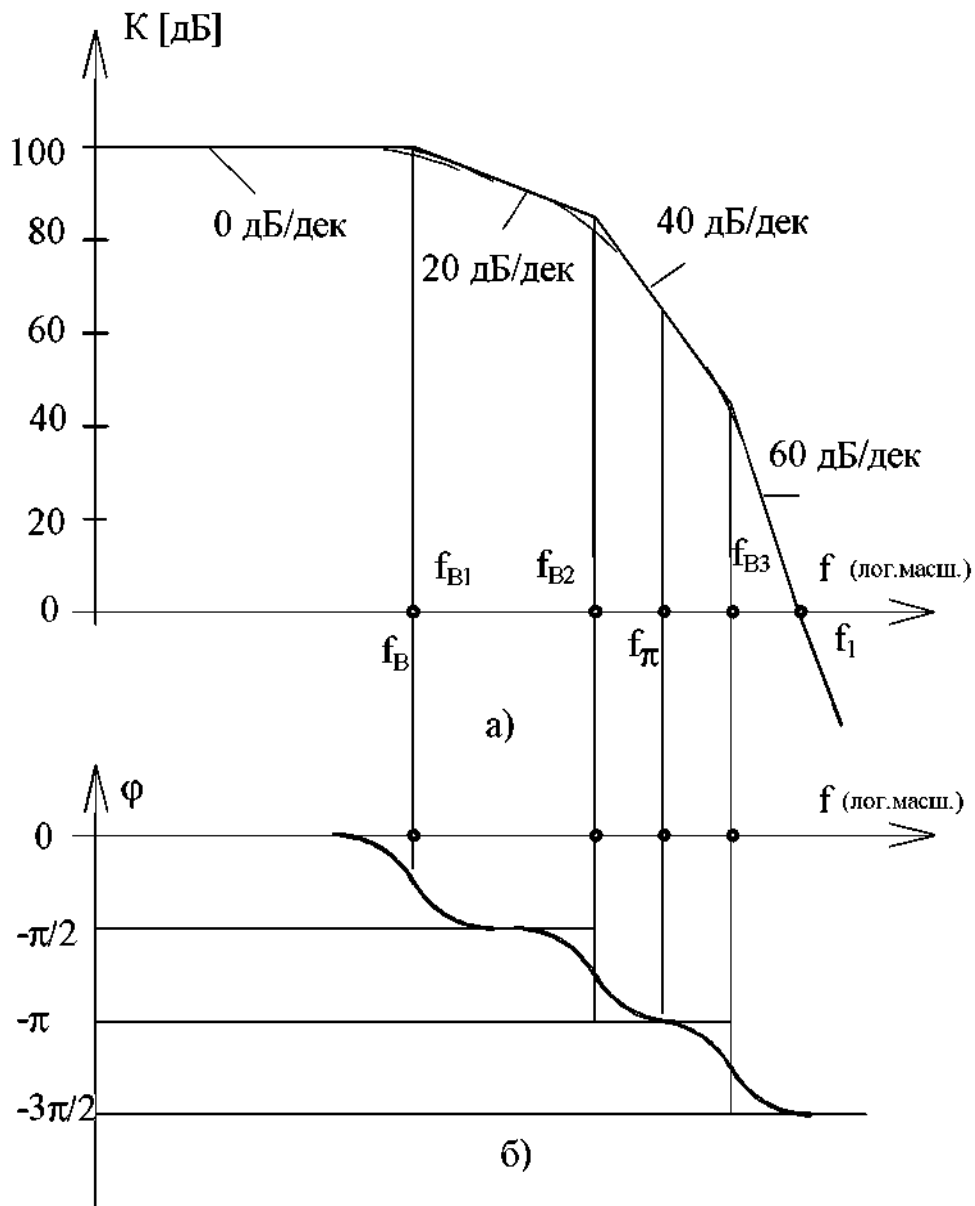


Рисунок 1.8 Малосигнальные характеристики трехкаскадного ОУ:  
 а) амплитудно-частотная;  
 б) фазово-частотная

Характеристики отдельных каскадов близки к характеристикам эквивалентной RC-цепи [3]:

$$K(f)[ДБ] = \Sigma K_i(f)[ДБ]$$

$$\Phi(f) = \Sigma \Phi_i(f)$$

$$K_i = \frac{K_{0i}}{\sqrt{1 + (f / f_{Bi})^2}}$$

( $K_{0i}$  при  $f \ll f_{Bi}$  .  $K_{0i}(f/f_{Bi})$  при  $f \gg f_{Bi}$  )

$$\varphi_i(f) = - \operatorname{arctg}(f / f_{Bi})$$

(0 при  $f \ll f_{Bi}$  -  $\pi / 2$  при  $f \gg f_{Bi}$ )

где  $f_{B.} = 1/2 \pi \tau_i$  - верхняя граничная частота  $i$ -го каскада,

$\tau_i$  - постоянная времени эквивалентной RC-цепи  $i$ -го каскада. Таким образом, частоты излома характеристик ОУ соответствуют (примерно) граничным частотам отдельных каскадов. Погрешность аппроксимации не превышает обычно 3дБ для частотной и  $\pi / 4$  для фазовой характеристики, что часто достаточно для практических целей пользования ОУ. Следует иметь в виду, что если граничные частоты отдельных каскадов близки друг к другу, то реальные характеристики не показывают в явном виде изломы, соответствующие аппроксимации по Боде.

Параметры амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик:

$f_{B.}$ - верхняя граничная частота ОУ с разомкнутой обратной связью, измеренная в режиме малого сигнала. Ее величина определяется частотной характеристикой самого инерционного каскада ОУ и, в свою очередь, определяет ход переходной характеристики ОУ;

$f_1$  - частота единичного усиления - это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице;

$f_{\pi}$  - частота, на которой внутренний фазовый сдвиг в ОУ достигает величины  $\pi$  радиан ( $180^\circ$ ). При применении ОУ с внешней частотно-независимой отрицательной обратной связью именно на этой частоте возникает самовозбуждение, если на ней петлевое усиление.

Отличительной особенностью двухкаскадного ОУ является то, что АЧХ обладает только двумя полюсами и имеет только две частоты излома  $f_{B.}$  и  $f_{B2.}$

В целях обеспечения устойчивости ОУ вводится коррекция АЧХ. В трехкаскадном ОУ используются две RC - цепи, подключаемые к УН и УА, которые создают дополнительную задержку по фазе высокочастотного сигнала до тг и тем самым обеспечивают устойчивую работу усилителя. Отличительной особенностью двухкаскадного ОУ является то, что для коррекции его АЧХ в целях обеспечения устойчивости при ООС необходима лишь одна емкость  $C_k$ . На рис 2.9 приведена упрощенная структурная схема двухкаскадного ОУ с учетом коррекции АЧХ.

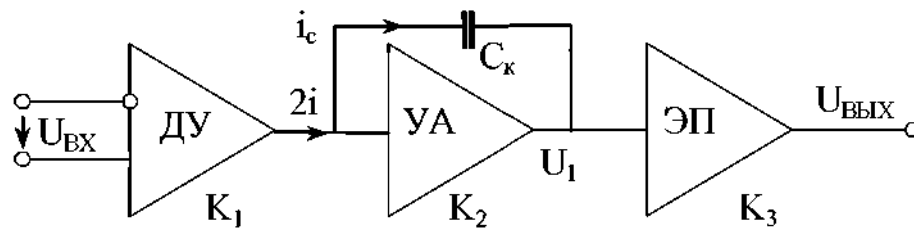


Рисунок 1.9 Упрощенная структурная схема двухкаскадного ОУ с коррекцией АЧХ ( $K_1, K_2, K_3$  - коэффициенты усиления ДУ, УА, ЭП соответственно)

Полагая, что АЧХ ОУ будет определять в основном второй каскад, практически выполняющий операцию интегрирования, АЧХ имеет вид [11]

$$K\omega(\omega) = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = K_1 \cdot K_2 / (1 + \omega \cdot T_k)$$

где  $K_1$  - коэффициент усиления ДУ,

$K_2$  - коэффициент усиления УА в области средней частоты,  $K_3 = 1$  - коэффициент усиления ЭП,  $T_k = C_k R$  - постоянная времени.

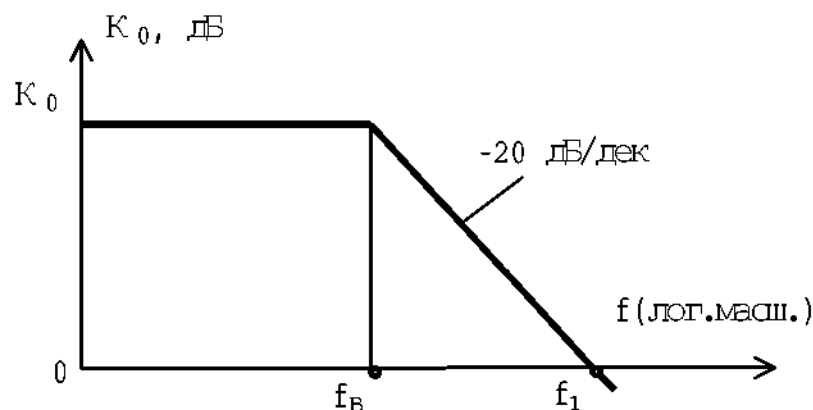


Рисунок 1.10 Малосигнальная АЧХ двухкаскадного ОУ

Таким образом, малосигнальная АЧХ двухкаскадного ОУ принимает вид, изображенный на рис.2.10, отображает закон уменьшения коэффициента усиления  $K^{\wedge}$  с изменением частоты  $f$  и имеет две особые точки: граничную частоту  $f_в$  и частоту единичного усиления  $f_1$ .

### 3. Переходная характеристика ОУ

Наиболее универсальной и наглядной характеристикой ОУ является переходная характеристика (рис.1.11), позволяющая в режиме малого сигнала определить линейные искажения импульсного сигнала, в том числе время нарастания выходного сигнала при воздействии единичного напряжения на входе усилителя.



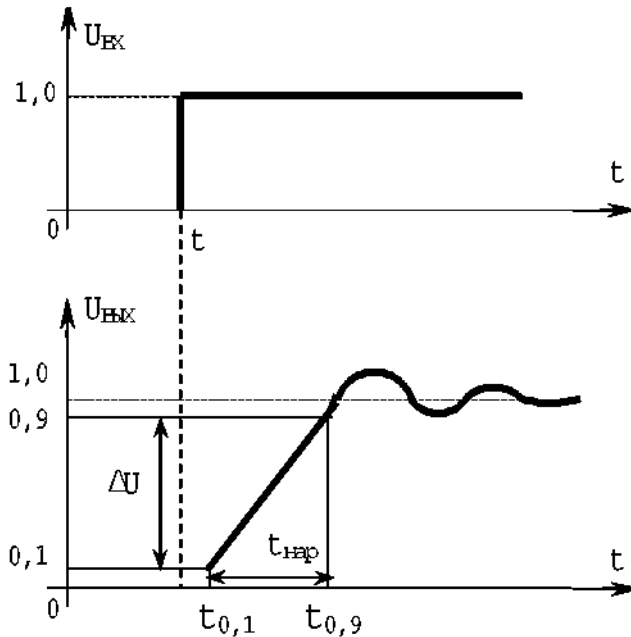


Рисунок 2.11 Переходная характеристика ОУ  
(нар = 0,9 – 1" время нарастания)

#### 4. Скорость нарастания выходного напряжения ОУ

При большом уровне сигнала ОУ характеризуется скоростью нарастания выходного напряжения, которая определяется внутренними токами и емкостями схемы. Из-за ограниченной скорости отклика большого сигнала с ростом частоты снижается амплитуда неискаженного выходного сигнала ОУ.

При воздействии синусоидального сигнала на входе ОУ имеем [11]

ОУ питаются, как правило, от двух полярного источника питания с равными напряжениями ( $\pm 12.6$  В,  $\pm 15$  В и др.). Причем, если заземляется одна из внутренних точек ОУ, то допустима нестабильность и асимметрия  $\pm E_n$ .

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вых}} \cdot \sin 2\pi ft$$

Скорость изменения выходного сигнала является функцией времени

$$V_{U_{\text{вых}}}(t) = \frac{\beta U_{\text{вых}}(t)}{\beta t} = 2\pi f \cdot U_{\text{вых}} \cdot \cos 2\pi ft$$

При этом максимальная скорость изменения выходного сигнала наблюдается при  $t = 0$  и не может превышать быстродействие ОУ  $V_{\text{вых}}$ .

$$V_{U_{\text{вых.мак.}}} = 2\pi f \cdot U_{\text{вых}}$$

Условие для максимального неискаженного сигнала имеет вид:

$$U_{\text{вых.мак.}} \leq \frac{V_{U_{\text{вых.мак.}}}}{2\pi f}$$

на рис. 1.12 показаны диаграммы, иллюстрирующие изменение

неискаженной амплитуды на выходе ОУ при различных частотах входного сигнала.

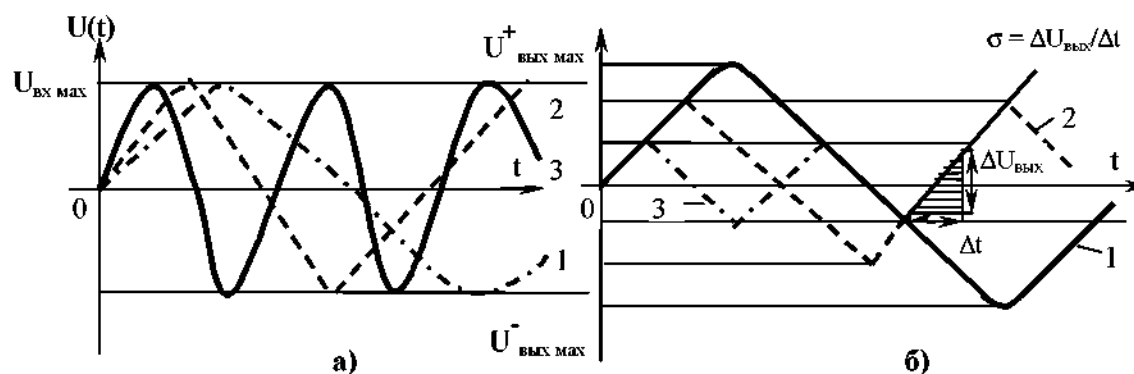


Рисунок 1.12 Диаграммы, показывающие образование треугольных, ограниченных по скорости нарастания, выходных сигналов ОУ (б) при одинаковых амплитудах выходных сигналов с разными частотами (а)

### 1.5 Схема включения ОУ

Для обеспечения нормальной работы ОУ необходимо выполнять правила включения их в схему.

ОУ питаются, как правило, от двух полярного источника питания с равными напряжениями ( $\pm 12.6\text{В}$ ,  $\pm 15\text{В}$  и др.) Причем, если заземляется одна из внутренних точек ОУ, то допустимая нестабильность и асимметрия  $\pm E_{\text{П}}$ .

При включении ОУ без или с неглубокой обратной связью может потребоваться балансировка ОУ. У ОУ 140УД8 потенциометр балансировки специально предусмотрен; а балансировку других ОУ можно выполнить, подав на один из входов напряжение смещения нуля от делителя напряжения блока питания стенда. При глубокой отрицательной обратной связи по постоянному току балансировка осуществляется автоматически и дополнительных мер принимать не нужно.

Многие ОУ при введении внешней обратной связи становятся склонны к самовозбуждению. Для устранения самовозбуждения в ОУ первых выпусков применяются цепи внешней коррекции, уменьшающие усиление или изменяющие фазовый сдвиг таким образом, чтобы выполнилось условие: на частоте, на которой фазовый сдвиг петлевого усиления равен  $2\pi$ , модуль  $|\beta K| < 1$ .

Для защиты ОУ от неправильных режимов работы обычно применяют следующие:

- между входами ОУ в параллель навстречу друг другу включают 2 точечных кремниевых диода. Эти диоды, практически не шунтируя вход ОУ при малых дифференциальных сигналах, ограничивают максимальную величину дифференциального сигнала на уровне 0.7-1В, предотвращая пробой транзисторов входного каскада;
- на выход ОУ, не имеющий внутренней защиты от короткого замыкания, включают ограничительное сопротивление порядка сотен ом.

## 2 ТИПОВЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ С РЕЗИСТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Внешняя частотно-независимая резистивная обратная связь, охватывающая ОУ, изменяет его коэффициент усиления и полосу частот, не изменяя формы частотной характеристики. В зависимости от того, на какой вход ОУ подается полезный сигнал, различают инвертирующее, Неинвертирующее и дифференциальное включения ОУ.

### 2.1 Инвертирующее включение ОУ

Инвертирующее включение является основной схемой включения ОУ. В этом случае сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а неинвертирующий вход заземляется через резистор  $R_3$  или непосредственно (рис.3.1).

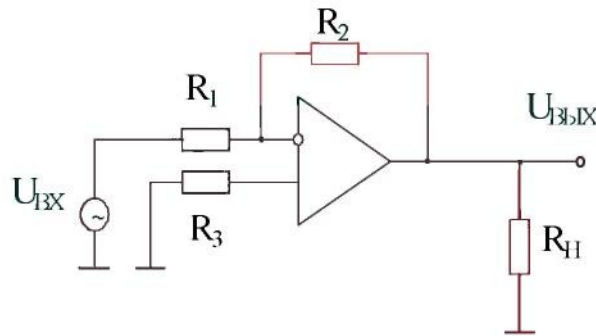


Рисунок 2.1 Основная схема включения ОУ

Элементы схемы:

$R_1$  - резистор в цепи управления,

$R_2$  – резистор в цепи управления,

$R_3$  – резистор балансировки.

Резистор  $R_2$  создает параллельную отрицательную обратную связь по напряжению. При идеальном ОУ потенциалы его входов будут равны нулю ( $\phi_- = \phi_+ = 0$ ), так как неинвертирующий вход заземлен, а разность потенциалов между входами равна нулю. Соответственно входной ток схемы равен

$$I_{ВХ} = U_{ВХ}$$

/ $R_1$  и весь течет через резистор  $R_2$ , так как входной ток ОУ равен нулю.

С учетом вышеперечисленного для идеального ОУ коэффициент усиления схемы равен [3, 4]

$$K^*_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.1a)$$

Входное сопротивление

$$R_{вх}^* = R_1 \quad (2.1б)$$

Выходное сопротивление

$$R_{вых}^* = 0 \quad (2.1в)$$

Верхняя граничная частота

$$f_{г}^* \rightarrow \infty \quad (2.1г)$$

Таким образом, при применении идеального ОУ параметры схемы определяются только внешними элементами  $R_1$   $R_2$  их величиной и стабильностью и т.д.

Достоинства инвертирующего включения ОУ - простота, отсутствие синфазной помехи. Недостаток - невысокое входное сопротивление.

Реальные ОУ имеют конечные величины параметров  $K_0$   $R_{вх.д}$   $R_{вых}$   $f_v$   $f_1$  что обуславливает неточность соотношений (2.1а) - (2.1 г). Для анализа воспользуемся эквивалентной схемой инвертирующего ОУ (рис.2.2).

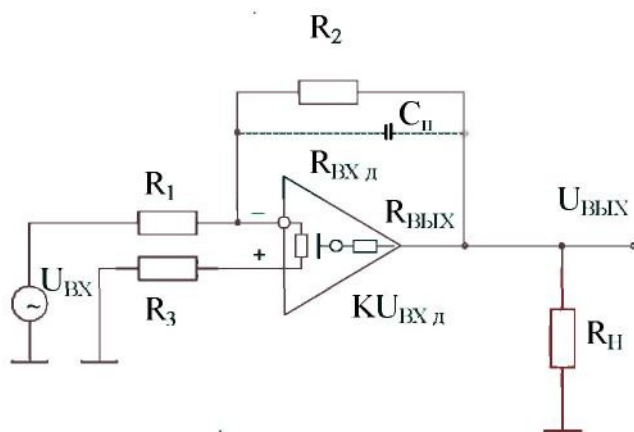


Рисунок 2.2 Эквивалентная схема основной схемы включения О

С учетом не идеальности ОУ коэффициент усиления ОУ

$$K^*_U = \frac{K_0 \cdot K_1}{1 + \beta K_0} \quad (2.2)$$

где  $\beta$  коэффициент передачи цепи обратной связи

$$\beta = \frac{R_1 \parallel (R_{KIP.Д.} + R_3)}{R_1 \parallel (R_{kipД} + R_3) + R_2} \quad (2.3)$$

$K_1$  - коэффициент передачи входной цепи

$$K_1 = \frac{R_2 \parallel (R_{ex.Д.} + R_3)}{R_1 + R_2 \parallel (R_{exД} + R_3) + R_2}$$

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

$$K_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

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

Входное сопротивление

$$R_{ex}^* = R_1 + (R_{ex} + R_3) \parallel (R_2 / K_0) \quad (2.4)$$

Выходное сопротивление

$$R_{вых}^* = \frac{R_{вых}}{1 + \beta K_0} \quad (2.5)$$

граничная частота  $f_B$  лежит в пределах от  $f_B$  до  $f_j$  и тем выше чем глубже обратная связь, т.е. чем меньше  $K_u$ .

$$K_u^* \ll K_0, R_1, R_2, R_3 \ll R_{ex} \quad (3.6)$$

Выражениями (При 2.1) тем правомернее пользоваться, чем сильнее

У современных ОУ они довольно просто выполняются. На основе рассмотренной схемы включения ОУ можно реализовать инвертирующие усилители с плоской частотной характеристикой и коэффициентами  $K_u < K_0$  (Рисунок 7.6)  $R_{вх} \gg R_2, R_3, R_1$ , Усиления. На рис.3.3 приведен сумматор на ОУ при инвертирующем включении, обладающий следующими свойствами:

- слабым взаимовлиянием источников сигнала (хорошая развязка обусловлена тем, что потенциал общей точки входа ОУ (т.А) близок к нулю);
- возможностью суммировать большое количество сигналов с различными весами в соответствии с величинами -  $R_1', R_1''$  и т.д.

$$U_{вых} = -(K_{u1}^* U_{ex1} + K_{u2}^* U_{ex2} + \dots + K_{un}^* U_{ex}^a),$$

Где ,  $K_{u1} = R_2 / R_1'$ ,  
 $K_{u2} = R_2 / R_1''$ ,  
 $K_{un} = R_2 / R_1^a$ .

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  создают последовательную отрицательную обратную связь по напряжению. Резистор  $R_3$  может использоваться для балансировки

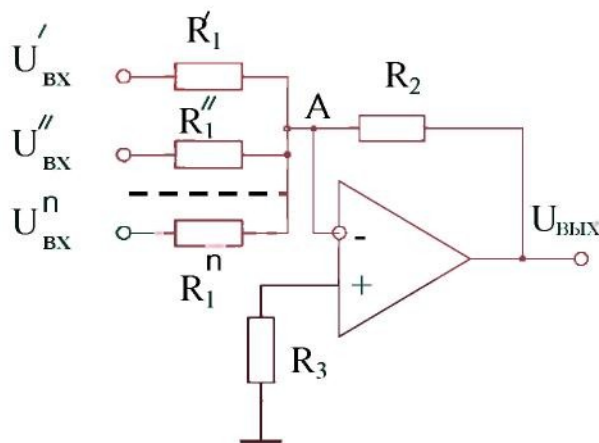


Рисунок 2.3 Сумматор на инвертирующем ОУ

Схема неинвертирующего включения ОУ представлена на рис. 2.4,а

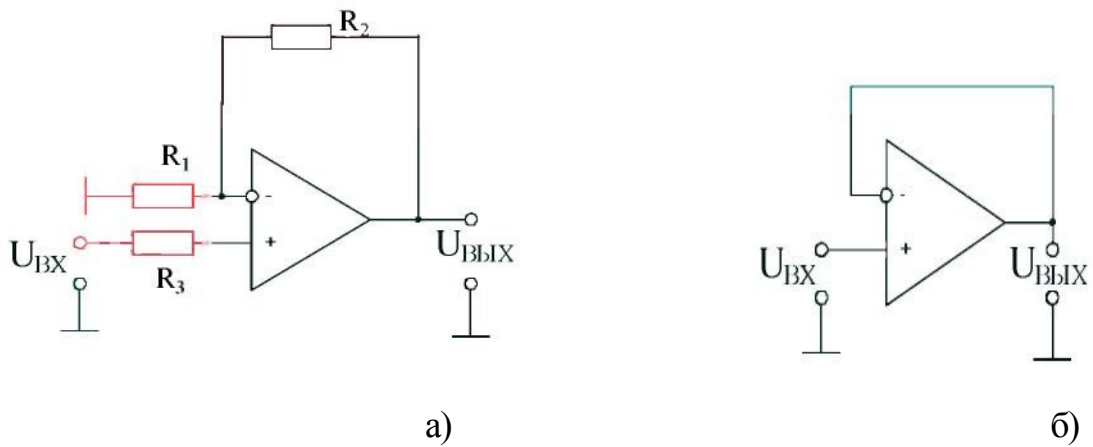


Рисунок 2.4 Неинвертирующее включение ОУ:

а) основная схема;

б) повторитель

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  создают последовательную отрицательную обратную связь по напряжению. Резистор  $R_3$  может использоваться для балансировки ОУ.

Основные параметры схемы неинвертирующего включения для идеально-го ОУ следующие:

- коэффициент усиления

$$K^*_{\text{У}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.7a)$$

- входное сопротивление

$$R_{\text{вх}}^* \rightarrow \infty \quad (2.7б)$$

- выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}}^* = 0 \quad (2.7в)$$

- верхняя граничная частота

$$f_{\text{г}}^* \rightarrow \infty \quad (2.7г)$$

Достоинство схемы - высокое входное сопротивление. С учетом ограниченности величин параметров реального ОУ - коэффициент усиления неинвертирующего ОУ

$$K^*_{\text{У}} = \frac{K_0 \cdot K_1}{1 + \beta K_0} \quad (2.8)$$

Где ,

$$\beta = \frac{R_1 \parallel (R_{кп.д.} + R_3)}{R_1 \parallel (R_{кп.д.} + R_3) + R_2} \cdot \frac{R_{кп.д.}}{R_{кп.д.} + R_3} \quad (2.9)$$

- Входное напряжение

$$R_{кп.д.}^* = R_{кп.д.} (1 + \beta K_0) \quad (2.10)$$

- Выходное напряжение

$$R_{ш.г.}^* = \frac{R_{ш.г.}}{1 + \beta K_0} \quad (2.11)$$

\* - верхняя граничная частота  $f_B$  флуктуирует в пределах от  $f_B$  до  $f_l$  (при  $K_u \geq 1$ )

На основе рассмотренной схемы можно получить неинвертирующие усилители с коэффициентом усиления  $K_u^* < K_0$  и высоким входным сопротивлением. Благодаря этому неинвертирующий усилитель часто применяется в измерительных устройствах.

При  $R_2 = \infty$ ,  $R_1 = R_3 = 0$  имеем повторитель на операционном усилителе ( $K_u = 1$ ) (рисунок. 3.4, б).

## 2.2 Операционный усилитель при дифференциальном включении (дифференциальный усилитель)

Схема при дифференциальном включении ОУ приведена на рисунке 2.5 [4-6].

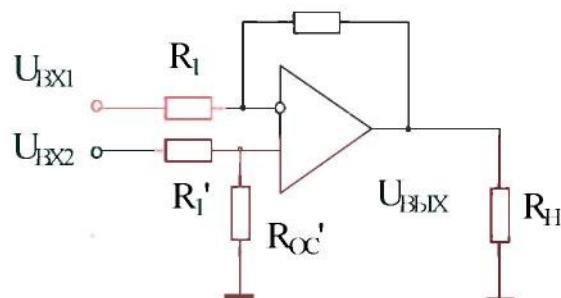


Рисунок. 2.5. Схема при дифференциальном включении ОУ (дифференциальный усилитель)



Такой усилитель, как и дифференциальный каскад, предназначен для усиления разности двух входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ . Схема является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ. При этом для выравнивания коэффициентов передачи с обоих входов напряжение на инвертирующий вход ОУ подается через резистивный делитель  $R_2$  и  $R_3$

При  $R_{вх.д} = \infty$   $R_{oc} = 0$  коэффициент передачи при инвертирующем включении равен

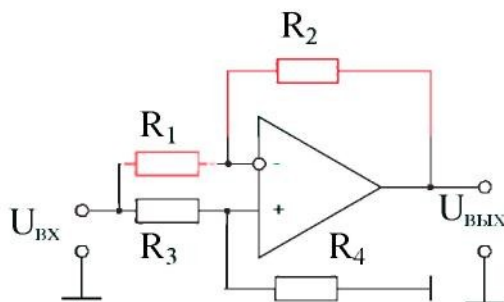
$$K^*_{H_u} = -R_{oc} / R_1$$

при неинвертирующем включении

### 2.3 Синфазное включение ОУ

Если к обоим входам ОУ прикладываются напряжения одной и той же амплитуды и фазы, то такое включение ОУ называется синфазным включением.

Схема при синфазном включении ОУ приведена на рисунок. [4-7].



т.е. зависит от разности входных сигналов и слабо чувствительных к синфазному входному сигналу.

Если выполняется следующее равенство  $R_1 / R_{oc} = R_1^1 / R_{oc}^1$  то имеем

$$K^*_{H_u} = -K_{H..} = -R_{oc} / R_1$$

при этом выходное напряжение равно

$$U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1})R_{oc} / R_1$$

При  $R_1 = R_3$  и  $R_2 = R_4$  и идеальном ОУ выходной сигнал равен нулю. В реальных ОУ это условие практически не выполняется, и при выходной сигнал не равен нулю.

$$U_{вх.1} = U_{вх.2}$$

Коэффициент передачи синфазного сигнала при

$$K_{исф.} = U_{вых. сф} / U_{вх.сф.}$$

Обычно меньше единицы, что затрудняет использование этого параметра.

Более удобным является другой параметр, а именно коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{ос.сф.}$  равный отношению коэффициента усиления

дифференциального сигнала  $K_0$  к коэффициенту передачи синфазного сигнала. Более удобным является другой параметр, а именно коэффициент ослабления синфазного сигнала равный отношению коэффициента усиления дифференциального сигнала  $K_0$  к коэффициенту передачи синфазного сигнала

Обычно  $K_{у.сф.}$  много меньше единицы, что затрудняет использование этого параметра.

$$K_{ос.сф.} = K_0 / K_{исф.}$$

## 2.4. Выбор операционного усилителя

Выбор ОУ производится путем сравнения требований на усилитель (величин  $(K_u, f_v, U_{вых}, R_H, C_H$  и.т.д.) с паспортными параметрами ОУ ( $K_0, f_1, U_{вых}, R_{вх}, V_{U_{вых}}, R_{H,мин}$  и.т.д.)

Необходимым условием правильного выбора ОУ является выполнение следующих соотношений [3-6]:

а) по коэффициенту усиления

$$K_u \ll K_0 \quad (2.12 а)$$

б) по частотным свойствам в режиме малого сигнала

$$K_u^* \cdot f_v^* < f_1 \quad (2.12 б)$$

это довольно жесткое условие,  $K_u^* \cdot f_v^* < f_1$  предполагающее применение в ОУ коррекции с отставанием по фазе, сильно сужающей полосу пропускания; реально можно получить площадь усиления больше, чем частота единичного усиления ОУ  $f_1$ ),

в) по динамическому диапазону

$$U_{вых} < U_{вых.макс.} \quad (2.12.в)$$

г) по быстродействию в режиме большого сигнала

$$f_{ж}^* = \frac{VU_{шыз.}}{2\pi \cdot U_{шыз.макс.}} \quad (2.12.г)$$

Если этим условиям удовлетворяют несколько ОУ, то выбирают наиболее соответствующий остальным требованиям

а) по коэффициенту усиления

$$K_u \ll K_o \quad (2.12.а)$$

б) по частотным свойствам в режиме малого сигнала

$$K_u^* \cdot f_{с}^* < f_1 \quad (2.12.б)$$

в) по динамическому диапазону

$$U_{вых} < U_{вых.макс.} \quad (2.12.в)$$

г) по быстродействию в режиме большого сигнала

$$f_{с}^* = \frac{VU_{вых.}}{2\pi \cdot U_{вых.макс.}} \quad (2.12.г)$$

## 2.5. Выбор и расчет элементов схемы

Рассмотрим расчет величин внешних элементов усилителя на ОУ: цепей обратной связи, коррекции, балансировки, защиты от перегрузки и т.д., а именно определим величину резисторов  $R_1$   $R_2$   $R_3$  (см. рисунок 3.1) [4]. Эти элементы обеспечивают нормальный режим работы ОУ (балансировка) и требуемые усилительно-частотные параметры усилителя.

При инвертирующем включении (рисунок 3.1) величина  $R$  [определяется из соотношения  $R_1 = R_{вх}$

Наибольшая величина  $R_j$  ограничивается допустимым падением напряжения при протекании входного тока ОУ  $U_{вх}$  (обычно 10% от  $U_{вх}$ ), т.е.

$$R_1 < 0,1 U_{вых.макс.} / K_o I_{вх.ср.}$$

Сопротивление  $R_2$  при этом равно

$$R_2 \parallel R_H > R_{H_{мин.}} = U_{вых.макс.} / I_{вых.макс.}$$

Величина подключаемой нагрузки  $R_H$  определяется нагрузочной способностью ОУ, а именно:

Максимальные значения  $R_1$  и  $R_2$  ограничены допустимым ухудшением частотных характеристик усилителя за счет наличия паразитных емкостей схемы  $C_n$  (например, на рисунок 3.2 емкости  $C_n$ ). При этом имеем следующее соотношение:

На практике обычно величину  $R_2$  берут не более единиц мегаом ввиду трудностей, возникающих из-за паразитных токов утечки, обусловленных технологией изготовления усилителя.

Величина  $R_3$  находится из следующих условий:

- если собственно ОУ сбалансирован ( $U_{см} = 0, \Delta I_{кпр.} = 0$ ), тогда  $R_3 = R_1 \parallel R_2$ .

$$R^3 = R^1 \parallel R^2$$

Соотношение верно при условии, что  $R_1 \gg R_r$  (внутреннего сопротивления источника сигнала) или  $R_l$  включает  $R_2 \gg R_{вых}$  что обычно выполняется,

- если существует начальный разбаланс ОУ, то его можно уменьшить, используя падение напряжения на  $R_3$  за счет протекания входного тока

$$R_3 - R_1 \parallel R_2 = U_{см.} / \Delta I_{кпр.}$$

В большинстве случаев и при малых входных токах ОУ, как правило, резистор  $R_3$  не используется.

Покажем расчет усилителя на следующем примере. Требуется рассчитать усилитель со следующими параметрами:

$$K_u = 100, U_{вых.макс} = 6В, R_H = 10 \text{ к Ом}, R_r = 0, f_b = 10 \text{ МГц}$$

Выбираем тип ОУ, который с точки зрения частотных свойств должен иметь  $f_1 \gg K_u f_b = 1 \text{ МГц}$

$$\sqrt{U_{вых.} / 2\pi U_{вых.макс} f_b} = 1,5 \text{ В/мкс.}$$

Этим требованиям удовлетворяет

ОУ 140УД8Б. Выбираем и рассчитываем навесные элементы в соответствии

с (2.13):

$$R_1 < 0,1 U_{\text{шЫГ.макс}} / K_0 I_{\text{кИр.ср.}} = 10 \text{ кОм.}$$

$$R_2 \ll 1/2\pi f_B C_{\text{п}} \approx 1,0 \text{ МОм}$$

соответствии с (2.15) и приняв величину паразитной емкости, имеем

При  $R_2 = 1 \text{ МОм}$  имеем

При  $I_{\text{ВХ}} = 1 \text{ нА} = 10^{-9} \text{ А}$  падение напряжения на  $R_3$ , будет равно  $U_{R3} = 0.01 \text{ мВ}$ , что значительно меньше  $U_{\text{см}}$ . Следовательно, при малых  $I_{\text{см}}$  сопротивление  $R_3$   $R_1 = R_2 / 100 = 10 \text{ кОм}$  можно не использовать.

### 3 ЗАДАНИЕ

1. Изучить описание экспериментальной установки, основные параметры

и правила пользования измерительными приборами.

2. Изучить особенности схемотехники, параметры и характеристики операционных усилителей общего назначения.

рациональных усилителей общего назначения.

3. Изучить способы включения, параметры и характеристики при включении операционных усилителей с резистивной обратной связью.

4. Выбрать и рассчитать резисторы цепи управления и обратной связи с целью получения коэффициентов усиления  $K_{u1} = n 5$ ,  $K_{u2} = n 20$

номер стола. Величины резисторов рекомендуется выбирать из условий  $R_1$  и  $R_2$

а также с учетом имеющихся в лаборатории номиналов резисторов. Выбор провести:

-для  $R_1 \geq 1,0 \text{ кОм}$   $R_2 \leq 1,0 \text{ МОм}$  инвертирующего включения ОУ,

-для неинвертирующего включения ОУ,

-для дифференциального включения ОУ.

5. Составить схему установки для измерения коэффициента усиления  $K_{ш}$  и  $K_{ш}$ , максимального входного сигнала  $U_{ВХ}$ , скорости нарастания выходного напряжения  $V_{ТЛ}$ , времени нарастания выходного напряжения  $t_{Нар}$

амплитудно-частотной характеристики ОУ:

-при инвертирующем включении ОУ,

-при неинвертирующем включении ОУ,

-при дифференциальном включении ОУ.

6. Составить схему установки для измерения коэффициента усиления, максимального входного сигнала  $U_{ВХ.макс}$ , скорости нарастания выходного напряжения  $V_{ТЛ}$ , времени нарастания выходного напряжения  $t_{Нар}$  граничных частот и частоты единичного усиления для повторителя на ОУ.

7. Составить схему установки для измерения коэффициента ослабления синфазного входного сигнала.

## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Ознакомление с работой приборов.

2. Исследование масштабного усилителя при инвертирующем включении ОУ с заданными коэффициентами усиления  $K_{u1}$  и  $K_{u2}$ . Измеряются:

- максимальное входное напряжение  $U_{вх.макс}$ .  
- коэффициент усиления по напряжению  $K_u$

- входное сопротивление  $R_{вх}$

- амплитудно-частотная характеристика (до уровня ослабления коэффициента усиления не менее 40 дБ) при двух  $K_u(P)$  значениях амплитуды входного сигнала,

- частота единичного усиления  $f_1$  и верхняя граничная частота  $f_B$ ,

- максимальная скорость нарастания выходного напряжения  $VU_{шнг}$ .

- время нарастания выходного напряжения  $t_{нар}$ .

3. Исследование масштабного усилителя при неинвертирующем включении ОУ с заданными коэффициентами усиления  $K_{u1}$  и  $K_{u2}$  измеряются:

- максимальное входное напряжение  $U_{вх.макс}$ .

- коэффициент усиления по напряжению  $K$ ,

- амплитудно-частотная характеристика (до уровня ослабления коэффициента усиления не менее 40 дБ при двух значениях амплитуды входного сигнала,

- частота единичного усиления  $f_1$  и верхняя граничная частота  $f_B$

- максимальная скорость нарастания выходного напряжения  $VU_{вых.макс}$ .

- время нарастания выходного напряжения  $t_{нар}$

4. Исследование усилителя при дифференциальном включении ОУ с за

данными коэффициентами усиления  $K_{u1}$  и  $K_{u2}$ , измеряются коэффициенты усиления по напряжению в полосе пропускания усилителя.

Измеряются:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_u$ ,

- верхняя граничная частота  $f_B$

- максимальное входное напряжение

при двух способах подачи сигнала генератора  $E$ ; (рисунок.3.5):

а) на инвертирующий вход(вход включен на корпус),

$$U_{\text{вх.1}} = E_{\Gamma}; U_{\text{вх.2}} = 0$$

б) на неинвертирующий вход (вход включен на корпус).  $U_{\text{вх.2}} = E_{\Gamma}; U_{\text{вх.1}} = 0$ .

5. Исследование повторителя на ОУ. Измеряются:

-коэффициент усиления по напряжению  $K_u$ ,

-верхняя граничная частота  $f_B$ ,

-максимальная скорость нарастания выходного напряжения  $VU_{\text{вых.макс}}$ .

-время нарастания выходного напряжения  $t_{\text{нар}}$ .

6.Исследование усилителя при синфазном включении ОУ при

$K_{u1} = K_{u2}$  Измеряется коэффициент передачи синфазного сигнала при заданных соотношениях  $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$

## 5 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Измерение  $U_{\text{вх.макс}}$  производить на частоте 1кГц при появлении небольших нелинейных искажений балансировкой  $R_g$  добиться симметричного искажения синусоиды. Измерение остальных параметров производить при  $U_{\text{вх.}} = 0,3 U_{\text{вх.макс}}$ .

1. Рекомендуемые для использования схемы:

- при инвертирующем включении ОУ - рисунок 5.1,
- при неинвертирующем включении ОУ – рисунок 5.2,
- при исследовании повторителя на ОУ – рисунок 5.3,
- при дифференциальном включении ОУ – рисунок 5.4,
- при синфазном включении ОУ – рисунок 5.5.

2. При измерении максимального входного сигнала  $U_{\text{вх.макс}}$  с ГЗ-112 на вход исследуемого усилителя подается синусоидальный сигнал в полосе его пропускания в диапазоне частот от 1.0 до 10.0 кГц и фиксируется значение  $U_{\text{вх}}$ , при котором начинают появляться искажения в выходном сигнале.



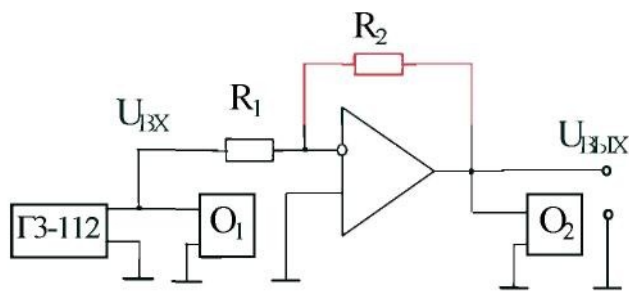


Рисунок 5.1 Инвертирующее включение ОУ

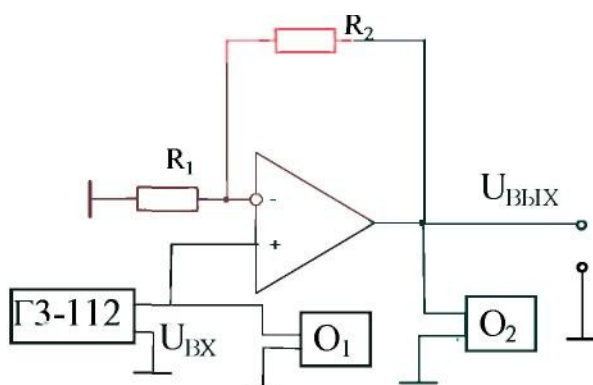


Рисунок 5.2 Неинвертирующее включение ОУ

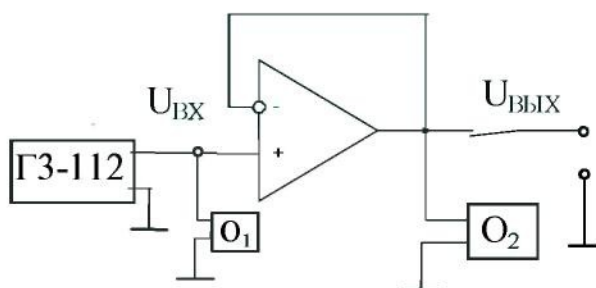


Рисунок 5.3 Повторитель на ОУ

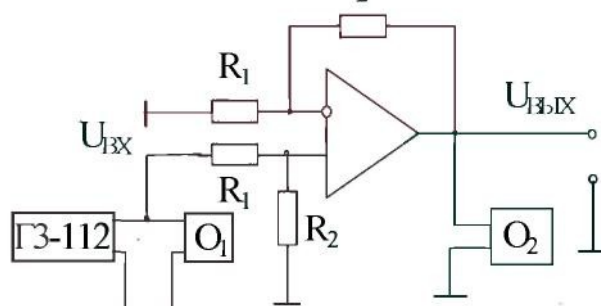


Рисунок 5.4 Дифференциальное включение ОУ

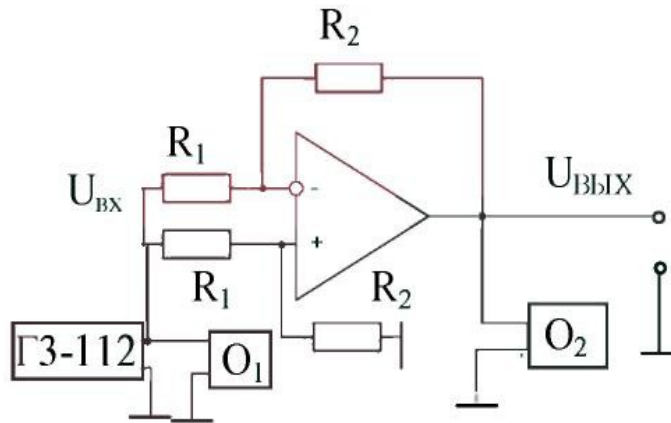


Рисунок 5.5 Синфазное включение ОУ

3. Измерения  $K_{U1}$ ,  $K_{U2}$ ,  $R_{ВХ}$  производить по методике, используемой в лабораторной работе №1 по курсу [9] при подаче на вход синусоидального сигнала в диапазоне частот от 1.0 до 10.0 кГц и амплитуде входного сигнала  $U_{ВХ} = 0,3 U_{ВХ.макс}$ .

4. Амплитудно-частотная характеристика измерения в диапазоне частот, когда неравномерность коэффициента усиления не менее 40 дБ при обязательном измерении частоты единичного усиления и при двух значениях амплитуды входного сигнала  $U_{ВХ} = 0,3 U_{ВХ.макс}$  және  $U_{ВХ.2} = 0,1 U_{ВХ.макс}$ .

На рисунок 5.6 приведена типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя на ОУ.

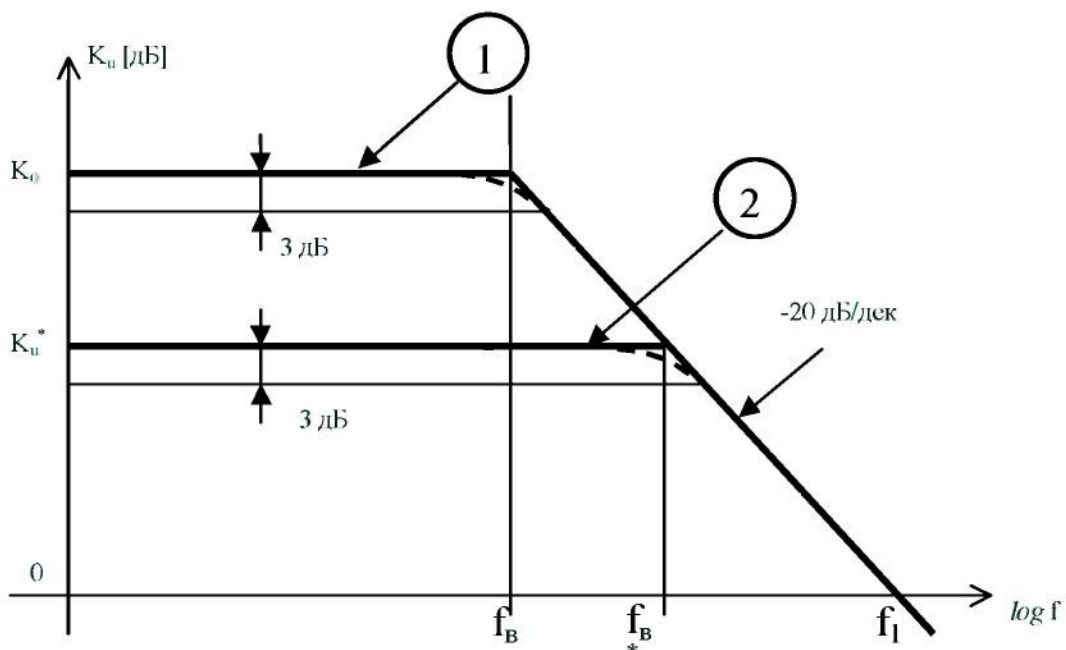


Рисунок 5.6 Типичная амплитудно-частотная характеристика усилителя

на ОУ: 1 - без ООС, 2 - е ООС

5. Время нарастания выходного напряжения  $t_{нар}$  и скорость нарастания выходного напряжения  $V_{U_{вых}}$  измеряются двумя способами.

а) При подаче на вход прямоугольных импульсов с генератора ГЗ-112 (режим "меандр")

На рис 5.7 иллюстрируется методика измерения времени нарастания выходного напряжения  $t_{нар}$  и скорости нарастания выходного напряжения  $V_{U_{вых}}$ . При этом  $t_{нар}$  определяем как время, за которое выходное напряжение изменяется от уровня 0.1 до уровня 0.9 установившегося значения, а  $V_{U_{вых}}$  - как отношение приращения выходного напряжения к времени нарастания  $t_{нар}$ , за которое произошло это нарастание.

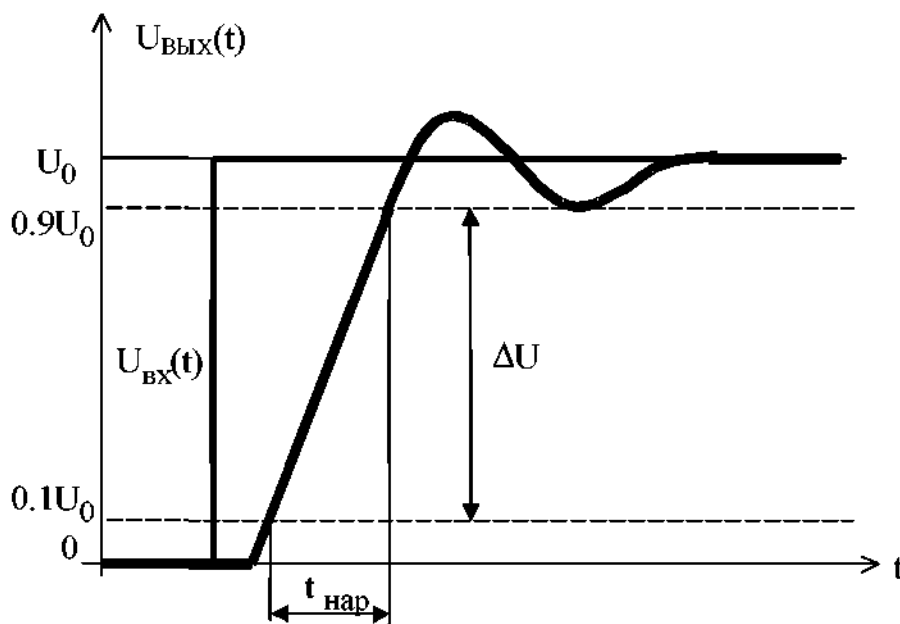


Рисунок 5.7 Время нарастания  $t_{нар}$  и скорость нарастания выходного напряжения

б) При подаче на вход синусоидального сигнала При подаче на вход усилителя с генератора ГЗ-112 синусоидального сигнала частоты, близкой к верхней граничной частоте  $f_B$  измеряется максимально достижимая крутизна изменения синусоидального выходного сигнала в момент пересечения среднего уровня при увеличении амплитуды входного сигнала (см. рисунок 1.12). Обязательным условием при этом является то, что амплитуда входного сигнала не должна превышать  $U_{вх}$

$$V_{U_{\text{вых}}} = \frac{\Delta U}{t_{\text{нар}}}$$

6. Измерение коэффициента ослабления синфазного сигнала Методика измерения  $K_{\text{сф}}$  сводится к подключению на оба входа некоторого напряжения и измерению вызванного им выходного напряжения [7]. Используется схема с дифференциальным сбалансированным входом, приведенная на рис. 5.5.

Коэффициент передачи схемы по дифференциальному сигналу для измерения должен быть большим (не менее тысячи), поскольку коэффициент усиления синфазного сигнала мал. Ввиду того, что к обоим входам усилителя приложено одно и то же напряжение, выходное напряжение окажется небольшим и будет определяться значением коэффициента усиления синфазного сигнала усилителя. Так как здесь нет дифференциального входного напряжения, то коэффициент передачи усилителя, изображенного

$$U_{\text{вых}} / U_{\text{вход}} = \left( \frac{K_0}{1 + K_0 \beta} \right) \quad \text{будет иметь вид}$$

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

$K_0$  - коэффициент усиления ОУ без ОС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1997. 320 с.
2. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. М.: Радио и связь, 1991. 304 с.
3. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985. 256 с.
4. Усилительные устройства на интегральных микросхемах/ А.В. Болтаев, В.И. Гадзиковский, В.Г. Важенин, А.А. Калмыков, Н.А. Нехонов. Свердловск: Изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1981. 112 с.
5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1988. 304 с.
6. Булычев А.Л. и др. Аналоговые интегральные схемы: Справочник/ А.Л. Булычев, В.И. Галкин, В.А. Прохоренко. 2 изд., перераб. и доп. Минск: Беларусь, 1993. 240 с.
7. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ. Мир, 1985. 572 с.
8. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. СПб.: Корона прист, 1998. 400 с.
9. А.В. Перебаскин, А.А. Бахметьев, С.О. Колосов, В.Ф. Исаев. Интегральные схемы: Операционные усилители. Т.1. М.: Физматлит, 1993. 240 с.
- Ю.Завадский В.А. Компьютерная электроника. Киев: ВЕК, 1996. 368 с.
- П.Свирид В.Л. Микросхемотехника аналоговых электронных устройств. Минск: Дизайн ПРО, 1998. 256 с.
12. Важенин В.Г. Исследование усилительных каскадов при различных схемах включения транзистора: Методические указания к лабораторным работам № 1 и 2 по курсу "Схемотехника аналоговых электронных устройств". Екатеринбург: УГТУ, 2000. 36 с.