

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра управления и информатики
в технических и экономических системах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОСНОВЫ МИКРОСХЕМОТЕХНИКИ»

Раздел «Операционные усилители. Основы»

Составители:
А.С. ГРИБАКИН
О.М. КОЧУРОВ
В.С. ГРИБАКИН

Владимир 2010

УДК 621.382
ББК 32.85
М54

Рецензент
Кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники и электроэнергетики
Владимирского государственного университета
Г.П. Колесник

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Основы микросхемотехники». Раздел «Операционные усилители. Основы» / Владим. гос. ун-т ; сост. А. С. Грибакин, О. М. Кочуров, В. С. Грибакин. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 84 с.

Содержат описание пяти лабораторных работ по разделу «Операционные усилители. Основы» дисциплины «Основы микросхемотехники», составленных в соответствии с рабочей программой. В каждой работе приведены цель, схемы эксперимента, рабочие задания, контрольные вопросы.

Предназначены для студентов 2, 3-го курсов дневной формы обучения специальности 220201 – управление и информатика в технических системах.

Ил. 26. Табл. 8. Библиогр.: 4 назв.

УДК 621.382
ББК 32.85

ВВЕДЕНИЕ

Усилительные устройства применяют не только для усиления маломощных сигналов, но и для выполнения таких операций, как сравнение и ограничение сигналов, умножение и деление, сложение и вычитание, интегрирование и дифференцирование и т.д. Усилители, предназначенные для реализации перечисленных и других операций, называют операционными (ОУ). В настоящее время ОУ – основная разновидность интегральных схем.

Один из признаков классификации усилительных устройств – тип связи между каскадами. Типовой интегральный ОУ занимает на полупроводниковой подложке не более нескольких квадратных миллиметров. На такой площади сосредоточены от нескольких десятков до нескольких сотен активных и пассивных элементов. Изготовление конденсаторов и индуктивностей даже небольших номиналов, которые по геометрическим размерам были бы совместимы с указанной площадью, пока затруднительно, поэтому типовой интегральный ОУ представляет собой усилитель с реостатной связью между каскадами, или усилитель постоянного тока (УПТ). Реостатная связь хорошо передает перепады напряжения, позволяет усиливать сигналы сколь угодно малой частоты и создает минимальный фазовый сдвиг между выходным и входным сигналами.

Типовой ОУ может быть построен по схеме двух или трехкаскадного УПТ (реже однокаскадного). На рис. 1 представлены блок-схема ОУ, схема замещения и упрощенное условно-графическое обозначение (УГО).

Блок-схема (рис. 1, а) в общих чертах указывает на состав принципиальной схемы. Первый каскад ОУ – дифференциальный (ДК) – имеет два входа. Один из входов называют инвертирующим, другой – неинвертирующим, или прямым. Свойства входного ДК во многом определяют свойства всего ОУ. Промежуточные и вспомогательные узлы обеспечивают необходимые значения коэффициентов усиления

по току и напряжению, температурную и временную стабильность параметров. Оконечный каскад, в первую очередь, должен иметь невысокое выходное сопротивление. Обычно этот каскад построен по схеме двухтактного эмиттерного (истокового) повторителя [1, 4].

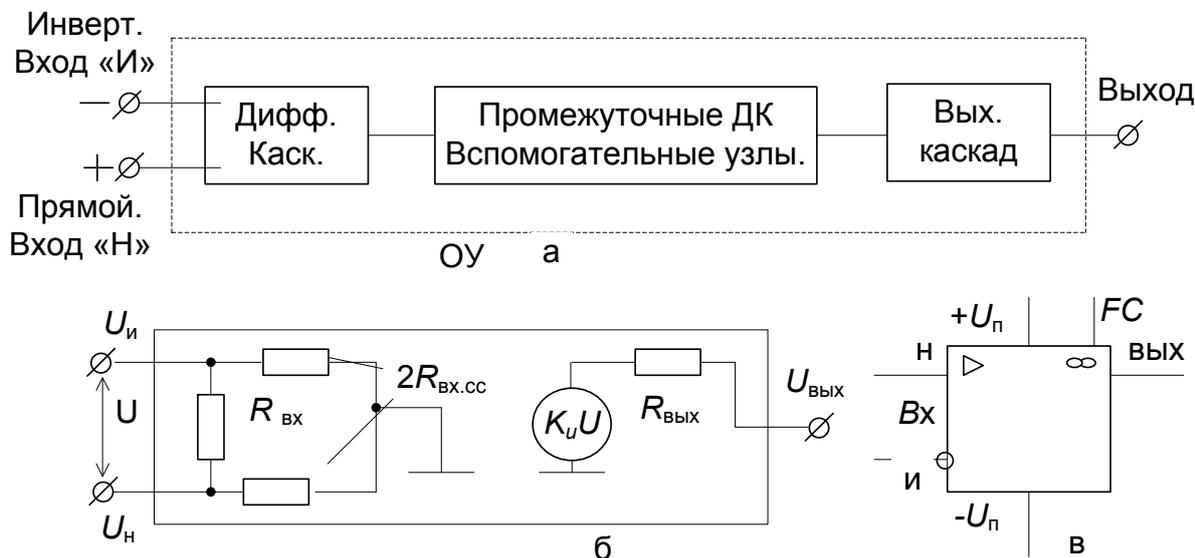


Рис. 1

Поскольку свойства ОУ со стороны входа определяются свойствами ДК, а со стороны выхода – повторителя, то и схема замещения (рис. 1, б) представлена только входной и выходной цепями. Промежуточные каскады и вспомогательные узлы не рассматриваются. На схеме замещения $R_{вх}$ – входное сопротивление току усиливаемого сигнала; $R_{вх.с.с.}$ – входное сопротивление току паразитного синфазного сигнала.

Величиной выходного сигнала $U_{вых}$ управляет разность напряжений, действующих на прямом и инвертирующем входах:

$$U = U_{н} - U_{и},$$

где $U_{н}$ – напряжение на неинвертирующем входе; $U_{и}$ – напряжение на инвертирующем входе.

Разностный, или дифференциальный, сигнал U – это тот полезный сигнал, который нужно усилить или каким-то образом преобразовать с помощью ОУ.

В реальных условиях на входах ОУ, помимо полезного, действует синфазный сигнал $E_{с.с.}$. Под синфазным понимают напряжение, действующее одновременно с одинаковой амплитудой и фазой на обоих входах ОУ. $E_{с.с.}$ определяется как полусумма

$$E_{с.с.} = 0,5(U_n + U_u).$$

Входной ДК – наиболее важная часть схемы ОУ. Именно в этом каскаде минимизируется чувствительность всего ОУ к $E_{с.с.}$. Кроме того, ДК должен иметь высокое входное сопротивление току любого сигнала – и дифференциального, и синфазного. Коэффициент усиления и входное сопротивление ДК связаны между собой обратной зависимостью (формулы здесь не приводятся), т.е. чем больше коэффициент усиления дифференциального сигнала, тем меньше входное сопротивление, и наоборот. Коэффициент усиления дифференциального сигнала K_u всего ОУ должен быть достаточно большим. У современных ОУ K_u находится в пределах десятков тысяч – сотен тысяч. Если представить, что ОУ – трехкаскадный, то K_u определяется как произведение $K_u = K_{u1}K_{u2}K_{u3}$.

Итак, входной ДК, воспринимающий сигнал, имеет большое входное сопротивление, поэтому K_{u1} невелик (например $K_{u1} = 10$). Доля второй ступени усиления в общем коэффициенте – наибольшая, $K_{u2} = 100 \dots 500$. Коэффициент усиления третьей ступени K_{u3} находится на уровне значений K_{u1} или несколько выше. Таким образом, K_u типовых ОУ общего применения

$$K_u = 10(100 \dots 500)20 = 20000 \dots 100000.$$

Выводы операционного усилителя. На рис. 1, в показаны выводы ОУ: $+U_{п}$, $-U_{п}$ – выводы для подключения напряжений источника питания. FC – выводы для подключения цепи частотной коррекции; они используются, если усилитель не имеет внутренней коррекции. Выход – вывод, с которого снимается усиленное напряжение. На рис. 1, в инвертирующий вход отмечен буквой «и», но может обозначаться знаком «-» или кружком. Неинвертирующий, или прямой, вход – «н», может обозначаться знаком «+».

Основные характеристики и параметры ОУ

Коэффициент усиления K_u . Амплитудная характеристика (АХ)

На рис. 2 представлены общая схема включения ОУ и амплитудная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. В состав схемы входят двуполярный источник питания $+U_{\text{П}}$, $-U_{\text{П}}$; нагрузка $R_{\text{Н}}$, источник входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$.

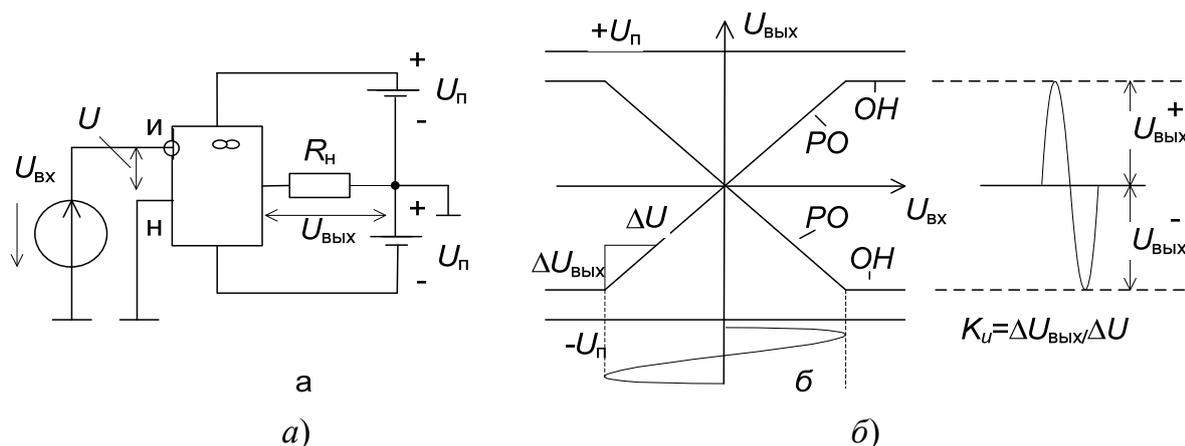


Рис. 2

При $U_{\text{ВХ}} = 0$ $U_{\text{ВЫХ}}$ также должно быть равно нулю. Это условие называют балансом. При появлении $U_{\text{ВХ}}$, в зависимости от знака последнего, $U_{\text{ВЫХ}}$ может изменяться в области положительных и отрицательных значений напряжения.

Различают два способа включения ОУ. Если инвертирующий вход заземлен, а входной сигнал подан на прямой вход, то включение называют неинвертирующим, ему соответствует АХ1 (см. рис. 2); в этом случае положительное приращение входного сигнала вызывает положительное приращение выходного. Если прямой вход заземлен, а входной сигнал подан на инвертирующий вход, то включение называют инвертирующим. Ему соответствует АХ2.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала определяют только на рабочей области (РО) АХ:

$$K_u = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U.$$

У современных ОУ коэффициент усиления K_u может достигать значений 100000 ... 1000000. Отсюда следует, что $U_{\text{ВЫХ}}$ и U несоиз-

меримы. Размах колебаний выходного напряжения ОУ приближается к $2U_{\text{П}}$. Разница между $[U_{\text{П}}]$ и $[U_{\text{ВЫХ.МАКС}}]$ составляет доли вольт.

Напряжение смещения (сдвига) нуля $U_{\text{см.0}}$. Балансировка

В реальном ОУ при $U_{\text{ВХ}} = 0$ обычно наблюдается выходной сигнал $\pm \Delta U_{\text{ВЫХ}} \neq 0$, т.е. разбаланс. АХ оказывается смещенной (рис. 3, а, характеристики 2 и 3).

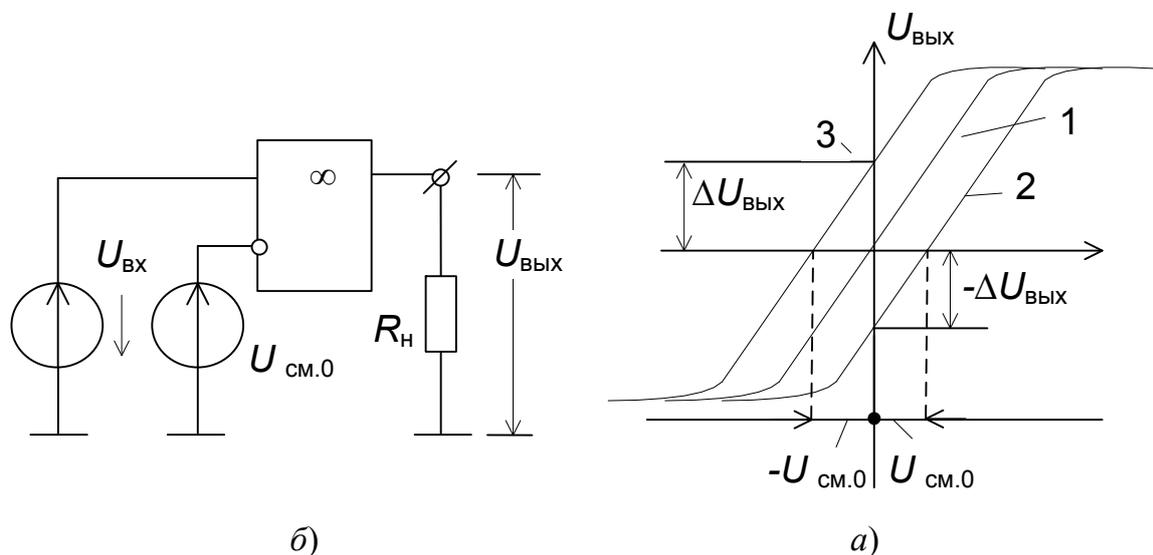


Рис. 3

Причины разбаланса могут быть различными, например неравенство эмиттерных напряжений триодов входного ДК. Напряжение разбаланса, пересчитанное на вход ОУ через дифференциальный коэффициент усиления K_u , определяет величину напряжения смещения нуля $U_{\text{см.0}}$. Чтобы сбалансировать ОУ, на один из его входов подается постоянное напряжение (рис. 3, б)

$$U_{\text{см.0}} = \pm \Delta U_{\text{ВЫХ}} / K_u.$$

Напомним, что балансировка ОУ может осуществляться с помощью специальных выводов, обозначаемых на УГО буквами «R» – регулировка. У ОУ на биполярных (БП) триодах типовые значения $U_{\text{см.0}} = 3 \dots 10$ мВ, на полевых триодах $U_{\text{см.0}} = 30 \dots 100$ мВ.

Средний входной ток смещения $I_{\text{см}}$. Разность токов смещения $\Delta I_{\text{см}}$

Исходный режим работы каждого из триодов входного ДК задан начальными токами смещения $I_{\text{см.н}}$ и $I_{\text{см.и}}$. На рис. 4 показаны внеш-

ние по отношению к ОУ цепи, по которым протекают токи смещения.

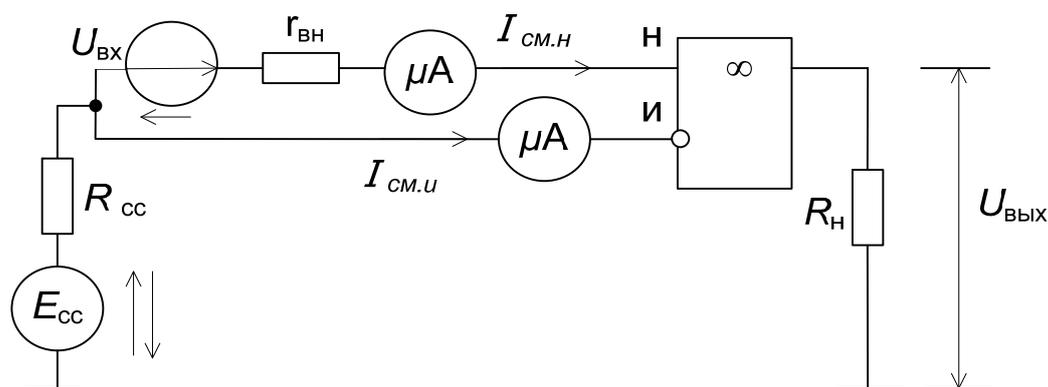


Рис. 4

Средний входной ток смещения определяется как полусумма начальных токов прямого и инвертирующего входов ОУ, измеренных после его балансировки, т.е. при $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ $I_{\text{см.ср}} = 0,5(I_{\text{см.и}} + I_{\text{см.н}})$.

Ток $I_{\text{см.ср}}$ создает на внутреннем сопротивлении источника синфазного сигнала $R_{\text{с.с}}$ падение напряжения, которое влияет на величину синфазной ошибки $\Delta U_{\text{син}}$ ОУ. Для операционных усилителей с входным ДК на БП триодах $I_{\text{см.ср}}$ находится в пределах 0,01 ... 1 мкА. Дальнейшее уменьшение $I_{\text{см.ср}}$ достигается за счет использования полевых триодов в схемах входных ДК операционных усилителей.

Под разностью $\Delta I_{\text{см}}$ понимают абсолютное значение разности начальных токов смещения прямого и инвертирующего входов после балансировки ОУ, т.е. при $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. $\Delta I_{\text{см}}$ создает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника входного сигнала, которое ОУ воспринимает как дополнительный дифференциальный сигнал. Обычно разность $\Delta I_{\text{см}}$ составляет $(0,2 - 0,5)I_{\text{см.ср}}$. На практике для снижения $\Delta I_{\text{см}}$ на величину $U_{\text{ВЫХ}}$ рекомендуется выравнивать величины проводимостей внешних цепей, подключенных к прямому и инвертирующему входам ОУ.

Синфазная ошибка. Относительное ослабление синфазного сигнала (ООСС)

Реальный входной сигнал может содержать помимо полезной, дифференциальной составляющей, и паразитную, синфазную — $E_{\text{с.с}}$, которая вызывает сдвиг уровня выходного напряжения на величину

$U_{\text{вых.син}}$. Это напряжение пересчитывается на вход через коэффициент усиления K_u . Таким образом определяется величина синфазной ошибки $\Delta U_{\text{син}}$. Чтобы скомпенсировать ошибку, между входами включают дополнительный источник смещения $U_{\text{см.0}}$ (рис. 5).

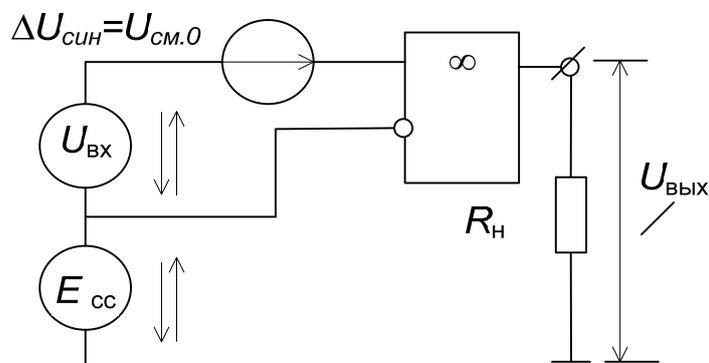


Рис. 5

Величину синфазной ошибки можно рассчитать по формуле

$$\Delta U_{\text{син}} = E_{\text{с.с}} K_{\text{с.с}} / K_u = E_{\text{с.с}} \cdot (\text{ООСС}),$$

где $K_{\text{с.с}}$ – коэффициент передачи синфазного сигнала; K_u – коэффициент усиления дифференциального сигнала.

ООСС – один из важнейших показателей качества ОУ. У современных ОУ ООСС находится в пределах 0,001 ... 0,00001, или –60 ... –100 дБ. На практике $\Delta U_{\text{син}}$ увеличивается с ростом уровня $E_{\text{с.с}}$ и зависит от частоты. Причем с ростом частоты K_u уменьшается, поэтому ослабление синфазного сигнала падает.

Входные сопротивления ОУ

На рис. 1 показано $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление ОУ току дифференциального сигнала, это сопротивление между входами ОУ или сопротивление со стороны одного входа, когда другой заземлен. У входного каскада ОУ, выполненного на составных БП триодах, $R_{\text{вх}}$ может быть достаточно велико. Для увеличения $R_{\text{вх}}$ входной ДК выполняют на полевых триодах. Типовые значения $R_{\text{вх}}$ находятся в пределах 100 кОм ... 1 МОм. $R_{\text{вх.с.с}}$ – сопротивление току синфазного сигнала. Обычно это сопротивление как минимум на 1 ... 2 порядка больше $R_{\text{вх}}$.

Выходное сопротивление ОУ

Для выходной цепи ОУ, согласно рис. 6, можно составить уравнение

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_u U - I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{ВЫХ}},$$

из которого следует, что с ростом тока, нагружающего выход ОУ, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ падает.

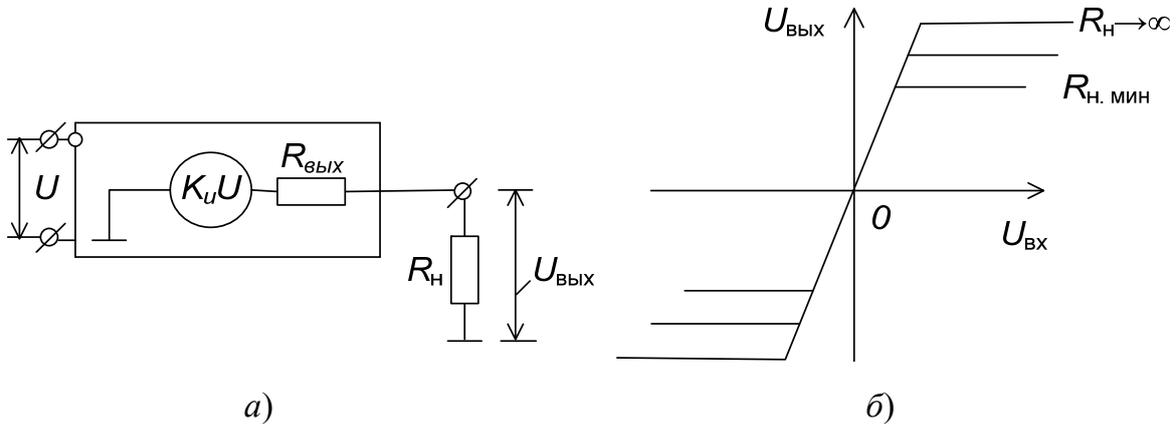


Рис. 6

Причина снижения $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление ОУ $R_{\text{ВЫХ}}$, величина которого может находиться в пределах: 100 Ом ... 1 кОм.

Влияние нестабильности источника питания на величину $U_{\text{см.0}}$

Нестабильность напряжений источника питания или разница напряжений $+U_{\text{П}}$ и $-U_{\text{П}}$ являются причинами разбаланса, смещения АХ и появления выходного напряжения при отсутствии входного сигнала. Для того чтобы сбалансировать ОУ приходится вводить дополнительный источник смещения. Устойчивость ОУ к нестабильности питания оценивается с помощью относительного ослабления влияния источника питания на напряжение смещения (ООВП):

$$\text{ООВП} = \Delta U_{\text{см.0}} / \Delta U_{\text{П}}.$$

ООВП определяется отдельно для $+U_{\text{П}}$ и для $-U_{\text{П}}$ и имеет размерность микровольт на вольт, может выражаться в децибелах. Значения ООВП обычно находятся в пределах 20 ... 200 мкв/В.

Частотные характеристики ОУ

Ход частотных характеристик (ЧХ) ОУ определяется, в первую очередь, типом связи между каскадами. Связь – гальваническая, что

характерно для усилителей постоянного тока. На рис. 7, а приведена упрощенная сигнальная схема замещения одного из каскадов ОУ (любого), например первого. Схема представлена выходной цепью: эквивалентным источником напряжения с э.д.с. $K_u \cdot U$ и выходным сопротивлением $R_{\text{ВЫХ}}$, паразитной емкостью C_0 . Выход каскада нагружает сопротивление $R_{\text{Н}}$. $R_{\text{Н}}$ может быть входным сопротивлением следующего каскада или нагрузкой всего ОУ, если каскад является окончательным.

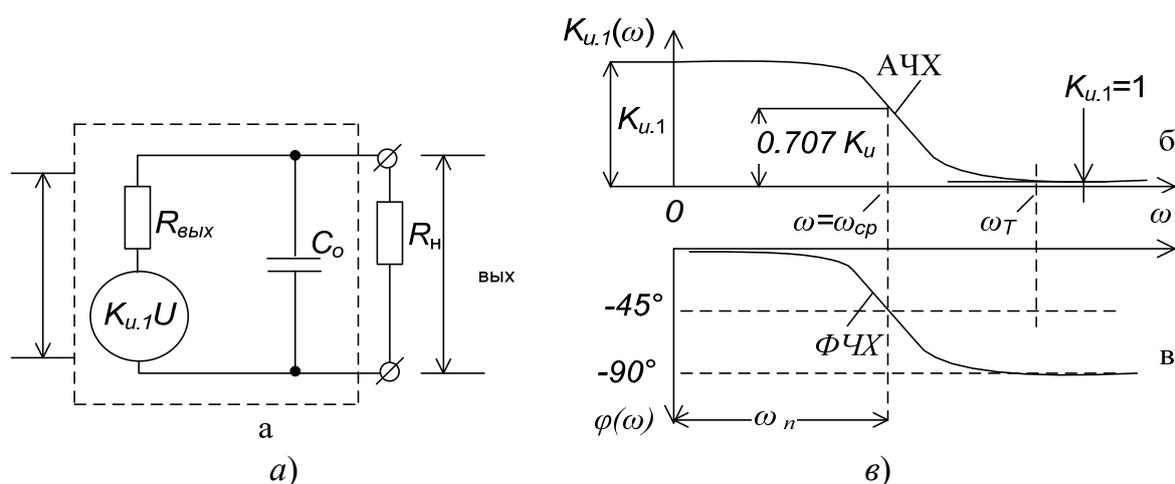


Рис. 7

Чтобы получить формулы ЧХ, необходимо составить уравнение для выходной цепи в операторной форме. При выполнении условия $R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ВЫХ}}$, что согласуется с практикой, уравнение имеет вид

$$K_{u1}U(s) = (T_1s + 1)U_{\text{ВЫХ}}(s),$$

где $T_1 = C_0 R_{\text{ВЫХ}}$ – постоянная времени каскада.

Отсюда находят передаточную функцию как отношение

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}(s)}{U_{\text{ВХ}}(s)} = K_u(s) = \frac{K_u}{T_1s + 1}.$$

Заменив оператор s на $j\omega$, получим формулы частотных характеристик

$$K_{u1}(j\omega) = \frac{K_{u1}}{j\omega T_1 + 1} = K_{u1}(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1a)$$

где $K_{u1}(j\omega)$ – комплексная частотная характеристика, $K_{u1}(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика:

$$K_u(\omega) = \frac{K_{u1}}{\sqrt{(\omega T_1)^2 + 1}}; \quad \varphi(\omega) = -\arctg \omega T_1. \quad (1б)$$

Как реагирует каскад на изменение частоты входного сигнала? При $\omega = 0$ и на низких частотах $K_{u1}(\omega)$ имеет максимальное значение – K_{u1} или значения, близкие к K_{u1} . С ростом частоты сопротивление паразитной емкости C_0 падает. В результате этого уменьшаются $U_{\text{вых}}$ и коэффициент усиления. На АЧХ наблюдается спад в области высоких частот (рис. 7, б).

Напряжение на емкости, а значит и $U_{\text{вых}}$, будет запаздывать по отношению к входному сигналу, т.е. отставать по фазе. С ростом частоты запаздывающий фазовый сдвиг увеличивается (рис. 7, в). На частоте $\omega = 1/T_1$, согласно выражениям (1а, 1б), $K_{u1}(\omega)$ снижается до уровня $0,707 K_{u1}$, фазовый сдвиг $\varphi = -45^\circ$. Это значение частоты называют частотой среза $\omega_{\text{ср}}$. Для каскада усиления постоянного тока $\omega_{\text{ср}}$ является верхней границей полосы пропускания $\omega_{\text{ср}} = \omega_{\text{в}}$; нижняя граница $\omega_{\text{н}} = 0$; таким образом, полоса пропускания $\omega_{\text{п}} = \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}}$. Если $\omega \rightarrow \infty$, то, как следует из (1а, 1б), $K_{u1}(\infty) \rightarrow 0$, $\varphi(\omega) \rightarrow -90^\circ$.

Введем еще один параметр, используемый для оценки частотных свойств ОУ, – частоту единичного усиления $\omega_{\text{т}}$.

$$K_{u1}(\omega) = \frac{K_{u1}}{\sqrt{(\omega T_1)^2 + 1}} = 1, \text{ тогда } K_{u1} = \sqrt{(\omega_{\text{т}} T_1)^2 + 1}.$$

На частоте $\omega_{\text{т}} (\omega_{\text{т}} T_1)^2 \gg 1$, из этого условия нетрудно найти соотношение между частотами среза и единичного усиления:

$$K_{u1} \approx \omega_{\text{т}} T_1 = \omega_{\text{т}} / \omega_{\text{ср}}; \quad \omega_{\text{т}} = K_{u1} \omega_{\text{ср}} = K_{u1} \omega_{\text{п}}$$

Таким образом, для усилителей с частотными характеристиками типа (1а, 1б) частота единичного усиления $\omega_{\text{т}}$ равна произведению коэффициента усиления на полосу пропускания.

Если ОУ состоит из двух каскадов усиления, то формулы частотных характеристик будут иметь вид

$$K_U(\omega) = K_{U.1}(\omega) \cdot K_{U.2}(\omega) = \frac{K_{U.1} \cdot K_{U.2}}{\sqrt{(\omega T_1)^2 + 1} \cdot \sqrt{(\omega T_2)^2 + 1}},$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \omega T_1 - \operatorname{arctg} \omega T_2.$$

Предельный фазовый сдвиг у такого ОУ $\varphi(\infty) \rightarrow -180^\circ$. У трехкаскадного ОУ предельный фазовый сдвиг достигает -270° . Форма АЧХ многокаскадных ОУ более сложная, чем однокаскадного. Для приближенной и быстрой оценки частотных свойств принято пользоваться логарифмическими ЧХ, которые строить значительно проще, чем обычные. ОУ, предназначенные для универсального применения (независимо от числа каскадов), из соображений устойчивой работы должны иметь частотные характеристики однокаскадного усилителя. У многокаскадных ОУ такие характеристики получают с помощью специальных RC-цепей коррекции.

Различают два вида коррекции частотных характеристик: внешнюю и внутреннюю. Для внешней коррекции предусматривают дополнительные выводы, к которым подключается корректирующая цепь. Главным достоинством этого вида коррекции является то, что частотные характеристики подбираются под конкретное устройство, реализуемое на данном ОУ. Недостаток – увеличивается количество навесных элементов при монтаже.

В настоящее время широко применяются ОУ с внутренней частотной коррекцией за счет RC-цепей схемы собственно ОУ. Если при этом частотные характеристики многокаскадного ОУ, вплоть до частоты единичного усиления, совпадают с характеристиками однокаскадного, то такую коррекцию называют полной внутренней частотной коррекцией. Схемы, использующие ОУ с полной внутренней коррекцией, содержат меньшее количество элементов и обладают более высокой помехоустойчивостью.

Логарифмические частотные характеристики

Рассмотрим построение логарифмических частотных характеристик: амплитудно-частотной (ЛАЧХ) и фазово-частотной (ЛФЧХ). При построении ЛАЧХ по оси ординат откладывают значения коэф-

фициента в особых логарифмических единицах – децибелах, $K_{дБ} = 20\lg K$.

Представим ряд значений коэффициента усиления в абсолютных единицах, отличающихся на порядок: $K = 10, 100, 1000, 10000$ и т.д. Этому ряду будут соответствовать значения коэффициента усиления, выраженные в децибелах: $K_{дБ} = 20\lg 10 = 20$ дБ; $20\lg 100 = 40$ дБ; далее 60 дБ, 80 дБ и т.д.

Ось абсцисс, по которой откладывают частоту, делят на декады, например 10, 100, 1000, 10000 и т.д. Каждую декаду разбивают делениями на десять частей от 0 до 1,0: 0; 0,1; 0,2; 0,3; ... 0,9; 1,0 (рис. 8). Чтобы найти деление, соответствующее частоте $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$, надо взять $\lg 10 = 1,000$ и отложить его мантиссу. Ясно, что это будет нулевое деление декады. Чтобы найти деление для частоты $\omega = 20 \text{ с}^{-1}$, надо взять $\lg 20 = 1,301$ и отложить его мантиссу в пределах декады: 0,301. Затем то же самое следует проделать с числовыми значениями других частот: $\lg 30 = 1,478$; $\lg 40 = 1,6$ и т.д. Аналогично разбивают делениями и другие декады, т.к. значения мантиссы не зависят от порядка чисел. Ось ординат может быть проведена через любое деление оси частот. Привычного центра координат здесь нет, поскольку $\lg(\omega = 0)$ не существует.

Использование логарифмических масштабов по осям позволяет упростить построение ЛАЧХ. Поясним сказанное примером.

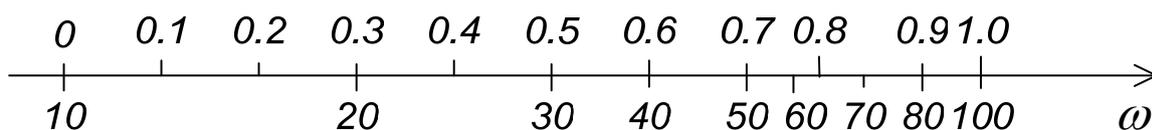


Рис. 8

Задача. Постройте логарифмические характеристики полностью скорректированного ОУ КР140 УД20, имеющего следующие данные:

$$K_u = 20000, T_{o,y} = 0,01 \text{ с.}$$

Исходными являются формулы частотных характеристик (1б).

Запишем выражение для ЛАЧХ:

$$20\lg K_u(\omega) = 20\lg(K_u / \sqrt{(\omega T_{o,y})^2 + 1}) = 20\lg K_u - 20\lg \sqrt{(\omega T_{o,y})^2 + 1}.$$

Чтобы упростить запись, левую часть выражения обозначим $L(K_u)$. С учетом данных ОУ

$$L(K_u) = 20\lg 20000 - 20\lg \sqrt{(\omega \cdot 0,01)^2 + 1}. \quad (2)$$

Формула ЛФЧХ не меняется: $\varphi(\omega) = -\arctg \omega \cdot 0,01$.

Построение ЛАЧХ показано на рис. 9. Первое слагаемое ЛАЧХ не зависит от частоты и имеет вид прямой, проведенной на уровне $20\lg 20000 = 86$ дБ (на рис. 9 линия 1).

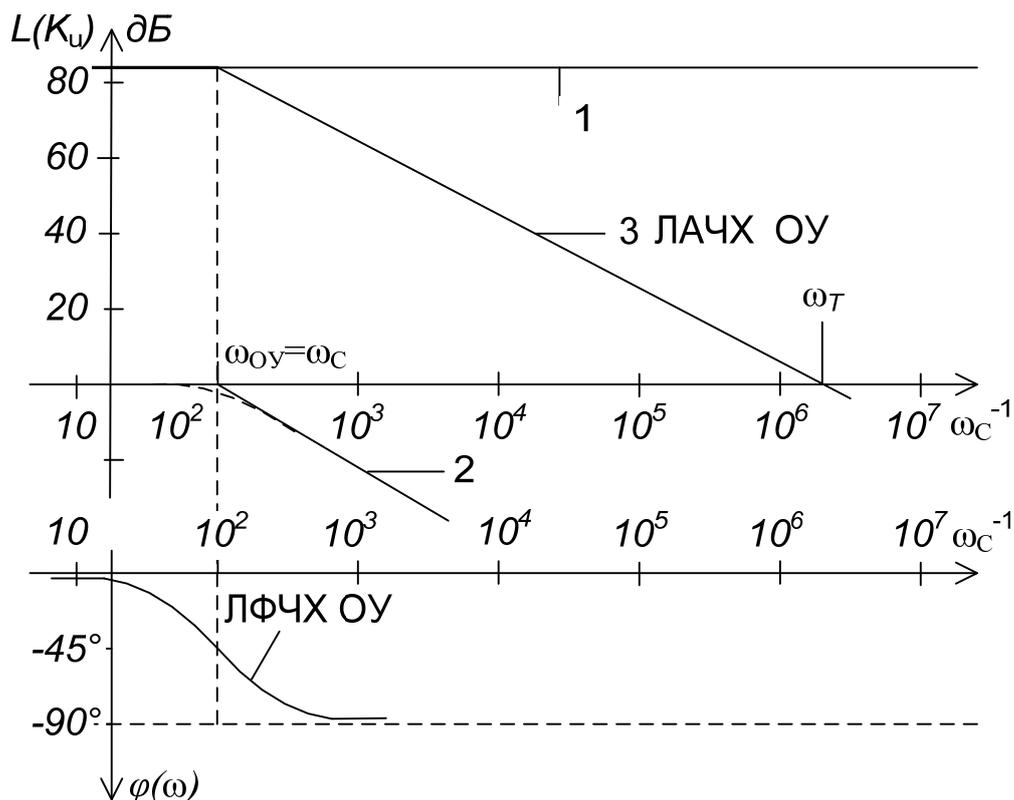


Рис. 9

Значения второго слагаемого, зависящие от частоты, приведены в табл. 1. График второго слагаемого упрощенно можно представить ломанной линией (2), составленной из двух прямых, которые пересекаются (сопрягаются) на частоте $\omega_{o,y} = 1/T_{o,y}$. $\omega_{o,y}$ называют также частотой сопряжения и обозначают ω_c . Суммируя графики 1 и 2, получим аппроксимированную ЛАЧХ операционного усилителя (линия 3). Наибольшая погрешность аппроксимированной ЛАЧХ имеет место на частоте сопряжения ω_c , составляет -3 дБ и при необходимости легко учитывается.

Итак, до частоты сопряжения ω_c график характеристики идет параллельно оси абсцисс на уровне 86 дБ; при $\omega > \omega_c$ – имеет вид прямой с наклоном -20 дБ/дек. На частоте единичного усиления ω_T характеристика пересекает ось абсцисс, т.к. $20\lg 1 = 0$. По существу для построения ЛАЧХ полностью скорректированного ОУ достаточно иметь числовые значения K_u и $T_{o,y}$.

Данные для построения ЛФЧХ приведены в четвертой строке табл. 1. ЛФЧХ (также как и ФЧХ) представляет собой арктангенсоиду с перегибом на частоте $\omega_{o,y} = \omega_c$ и фазовом сдвиге $\varphi = -45^\circ$. С ростом ω фазовый сдвиг увеличивается и достигает -90° на частоте $\approx \omega_T$.

Таблица 1

ω, c^{-1}	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
$20\lg K_u, \text{ дБ}$	86	86	86	86	86	86	86	86
$20\lg \sqrt{(\omega T_1)^2 + 1}, \text{ дБ}$	0	-3	-20	-40	-60	-80	-100	-120
$20\lg K_u(\omega), \text{ дБ}$	86	83	66	46	26	6	-14	-34

При дальнейшем увеличении частоты скорость падения коэффициента усиления ОУ может быть и -40 дБ/дек, и -60 дБ/дек, а фазовый сдвиг резко возрастает. Смысл полной внутренней коррекции ОУ заключается в том, чтобы в полосе частот $0 \dots \omega_T$ скорость падения K_u не превышала -20 дБ/дек, а фазовый сдвиг -90° .

Скорость нарастания выходного сигнала

Ответить мгновенно на изменения входного напряжения усилитель не может из-за своих внутренних емкостей, которые должны успевать заряжаться и разряжаться. Скорость их заряда (разряда) ограничена, следовательно, ограничена и скорость изменения выходного напряжения, что может привести к искажениям формы $U_{\text{вых}}$.

Ограничения по скорости нарастания $U_{\text{вых}}$ и по частоте (амплитудно-частотные искажения) следует различать. Верхняя граница полосы пропускания, или частота среза, $\omega_{\text{ср}}$ – это ограничение по усилению малого сигнала, в то время как скорость нарастания – это

способность ОУ обрабатывать без искажений большие сигналы с амплитудой меньше $U_{\text{вых.макс}}$ и частотой, не превышающей $\omega_{\text{ср}}$. Искажения, вносимые в выходной сигнал, когда скорость его изменения превышает допустимое значение, выглядят также, как нелинейные.

Чтобы избежать превышения скорости нарастания при данной частоте усиливаемого сигнала приходится ограничивать величину $U_{\text{вых}}$ или при выбранном $U_{\text{вых}}$ снижать его частоту. Найдем связь между частотой усиливаемого сигнала и скоростью нарастания.

Мгновенное значение напряжения синусоидального сигнала $u = U_m \sin \omega t$, где U_m и ω – соответственно, амплитуда и частота сигнала. Скорость изменения определяют как производную du/dt , поэтому

$$du/dt = \omega U_m \cos \omega t.$$

Нас интересует максимальная скорость нарастания $(du/dt)_{\text{макс}} \approx \approx (\Delta U/\Delta t)_{\text{макс}}$, которая имеет место в момент перехода синусоиды через нуль, когда $\cos \omega t = 1$. Таким образом, связь между скоростью нарастания и частотой усиливаемого сигнала устанавливается соотношением

$$V = (\Delta U_{\text{вых}}/\Delta t)_{\text{макс}} = \omega U_m = 2\pi f U_m. \quad (3)$$

Пример. У операционного усилителя скорость нарастания $V = 20 \text{ В/мкс} = 20 \cdot 10^6 \text{ В/с}$. Рассчитайте максимальную амплитуду сигнала $U_{\text{вых}}$, который можно усиливать без искажений, если частота сигнала

$$f = 1 \text{ МГц, или } \omega = 6,28 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}.$$

Решение. Разрешая соотношение (3) относительно U_m , получим

$$U_m = V/\omega = 20 \cdot 10^6 / 6,28 \cdot 10^6 = 3,18 \text{ В}.$$

Расчет показывает, что если надо получить неискаженный сигнал на частоте $\omega = 6,28 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ($f = 1 \text{ МГц}$), то для данного ОУ придется ограничить амплитуду $U_{\text{вых}}$ значением 3,18 В.

Классификация ОУ

На современном этапе развития аналоговой электроники выделяют следующие группы операционных усилителей [2, 3, 4].

1. *ОУ общего применения* используются для построения узлов электронной аппаратуры, к которой не предъявляются жесткие требования по точности, стабильности, быстродействию. Типовые характеристики: напряжение смещения – 1 ... 10 мВ; коэффициент усиления – 80 ... 100 дБ; скорость нарастания выходного напряжения – 0,1 ... 10 В/мкс.

2. *Быстродействующие ОУ* имеют скорость нарастания выходного напряжения более 30 В/мкс. Обычно характеризуются высокими значениями напряжения смещения нуля и начальных входных токов смещения, небольшим коэффициентом усиления. Предназначены, прежде всего, для усиления быстроизменяющихся или импульсных сигналов. Сверхбыстродействующие ОУ могут иметь скорость нарастания порядка нескольких тысяч вольт в микросекунду.

3. *Широкополосные ОУ* обладают частотой единичного усиления более 10 МГц. Чаще всего являются быстродействующими и имеют те же недостатки. Предназначены для усиления высокочастотных сигналов. Частота единичного усиления современных ОУ может превышать 1 ГГц.

4. *Прецизионные ОУ* характеризуются малыми значениями напряжения смещения нуля и входных токов, высокими значениями коэффициента усиления и ООСС, большим входным сопротивлением и низким уровнем шума. Как правило, имеют низкое быстродействие. Типовые значения параметров: $U_{см} < 250$ мкВ, $K_u > 100$ дБ; $ООСС > |-100|$ дБ.

Предназначены для применения в измерительных цепях, чаще всего для усиления сигналов постоянного напряжения, так как являются сравнительно узкополосными.

5. *ОУ с малыми входными токами* – усилители с входными каскадами на полевых триодах. Как правило, имеют входные токи не более 100 пА.

6. *Инструментальные ОУ* представляют собой несколько операционных усилителей, соединенных особым образом, и (иногда) схему управления. Часто имеют фиксированный набор коэффициентов усиления, для выбора которых не требуется подключение внешних резисторов. Обладают всеми преимуществами и недостатками прецизи-

онных ОУ, обычно имеют лучшие параметры. Характеризуются очень большими коэффициентами усиления (до 140 дБ) и ООСС до –130 дБ, входным сопротивлением до единиц гигаом и малым напряжением смещения нуля (десятки микровольт).

7. *ОУ с компенсацией напряжения смещения нуля* оснащены специальным устройством, которое периодически переводит ОУ в режим измерения напряжения смещения и учитывает его, когда ОУ находится в рабочем режиме. Характеризуется очень низким напряжением смещения (до единиц микро-вольт). Имеют все достоинства и недостатки прецизионных.

8. *Микромощные ОУ* – усилители с током потребления менее 1мА. Другой признак – потребляемая мощность менее 100 мкВт. Чаще всего не обладают высокими характеристиками.

9. *Многоканальные усилители* содержат несколько ОУ в одном корпусе, служат для улучшения массогабаритных показателей и снижения энергопотребления аппаратуры.

10. *Высоковольтные ОУ* обладают размахом выходного напряжения более 30 В.

11. *Мощные ОУ* характеризуются большими значениями выходного тока (более 100 мА), часто являются высоковольтными. Выпускаются ОУ с выходным током, превышающим 10 А. Могут применяться для управления исполнительными механизмами мощностью несколько десятков ватт.

Идеальный операционный усилитель

Опираясь на приведенную информацию о параметрах и характеристиках (свойствах) операционных усилителей, дадим следующее определение [1]: ОУ – это, как правило, многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, по своим свойствам приближающийся к воображаемому «идеальному». Идеальным считается ОУ, у которого: 1) бесконечно большой коэффициент усиления ($K_u \rightarrow \infty$); 2) бесконечно большое входное сопротивление ($R_{вх} \rightarrow \infty$); 3) бесконечно малое выходное сопротивление ($R_{вых} \rightarrow 0$); 4) идеальное подавление

синфазного сигнала ($\text{ООСС} \rightarrow -\infty$); 5) бесконечная ширина полосы пропускания ($\omega_{\text{п}} \rightarrow \infty$). Реальный ОУ может лишь приближаться к идеалу с достаточной для многих приложений точностью.

Напомним, что K_u имеет большую величину только на рабочей области АХ, в области же насыщения (ОН) $K_u \rightarrow 0$, так как выходное напряжение уже практически не меняется (см. рис. 2, б). Пусть напряжение питания ОУ $\pm U_{\text{п}} = \pm 15$ В. Очевидно, $\pm U_{\text{вых.макс}} < \pm 15$ В. При коэффициенте усиления, например, $K_u = 50000$ наибольшее значение дифференциального сигнала $U_{\text{ни}} = |U_{\text{ин}}| = U_{\text{макс}}$, соответствующее рабочей области, находится из соотношений $U_{\text{вых.макс}} = K_u U_{\text{макс}}$; $U_{\text{макс}} = U_{\text{вых.макс}} / K_u \approx 15 / 50000 = 0,3$ мВ.

Из расчетов следует, что напряжение дифференциального сигнала пренебрежимо мало. При столь малом напряжении и большом $R_{\text{вх}}$ можно считать, что и входной ток дифференциального сигнала $I \rightarrow 0$. Таким образом, перечень свойств идеального ОУ можно дополнить еще двумя: $U_{\text{ни}} = |U_{\text{ин}}| \rightarrow 0$, $I \rightarrow 0$.

Свойства идеального ОУ называют «замечательными», или полезными. С учетом полезных свойств, существенно упрощаются выводы формул, по которым рассчитывают параметры схем, построенных на ОУ.

Описание стенда

Стенд выполнен в виде открытого макета. На лицевой панели размещены схемы стенда, гнезда для набора исследуемого усилителя. Чертеж панели приведен на рис. 10. Схемы эксперимента набираются с помощью перемычек и контактов с кольцевыми наконечниками. Перемычкой можно замкнуть электрическую цепь между соседними гнездами. Например, если поставить перемычку, соединяющую гнезда 12 и 13, а также 7 и 10, то будет замкнута цепь обратной связи между инвертирующим входом и выходом операционного усилителя DA1 (цепь ОС представлена резисторами $R2'$ и $R2''$). Далее, соединив перемычками гнезда 5 и 2, 6 и 2, 8 и 11, получим схему балансировки ОУ с помощью переменного резистора $R5$ «установка нуля».

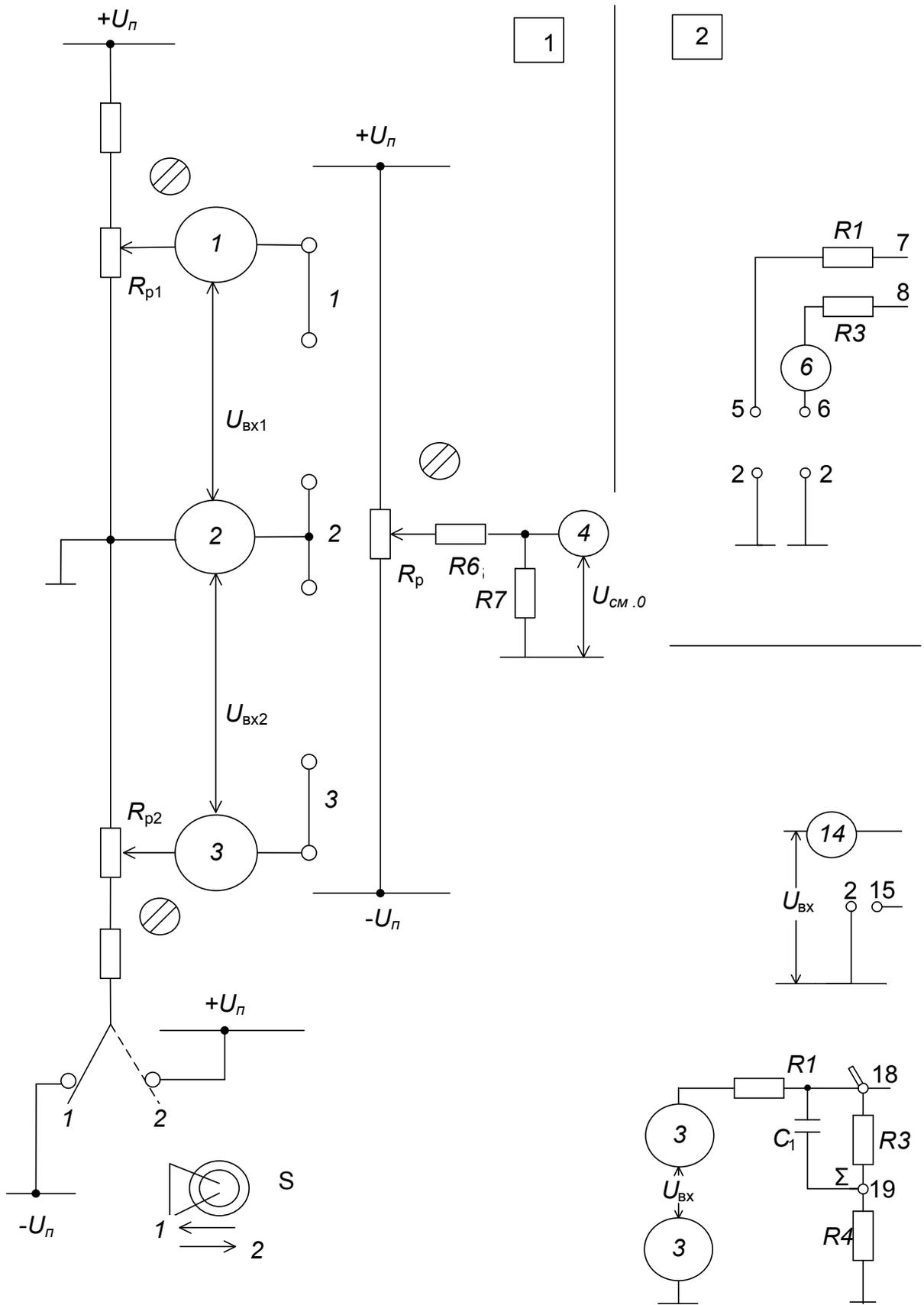


Рис. 10

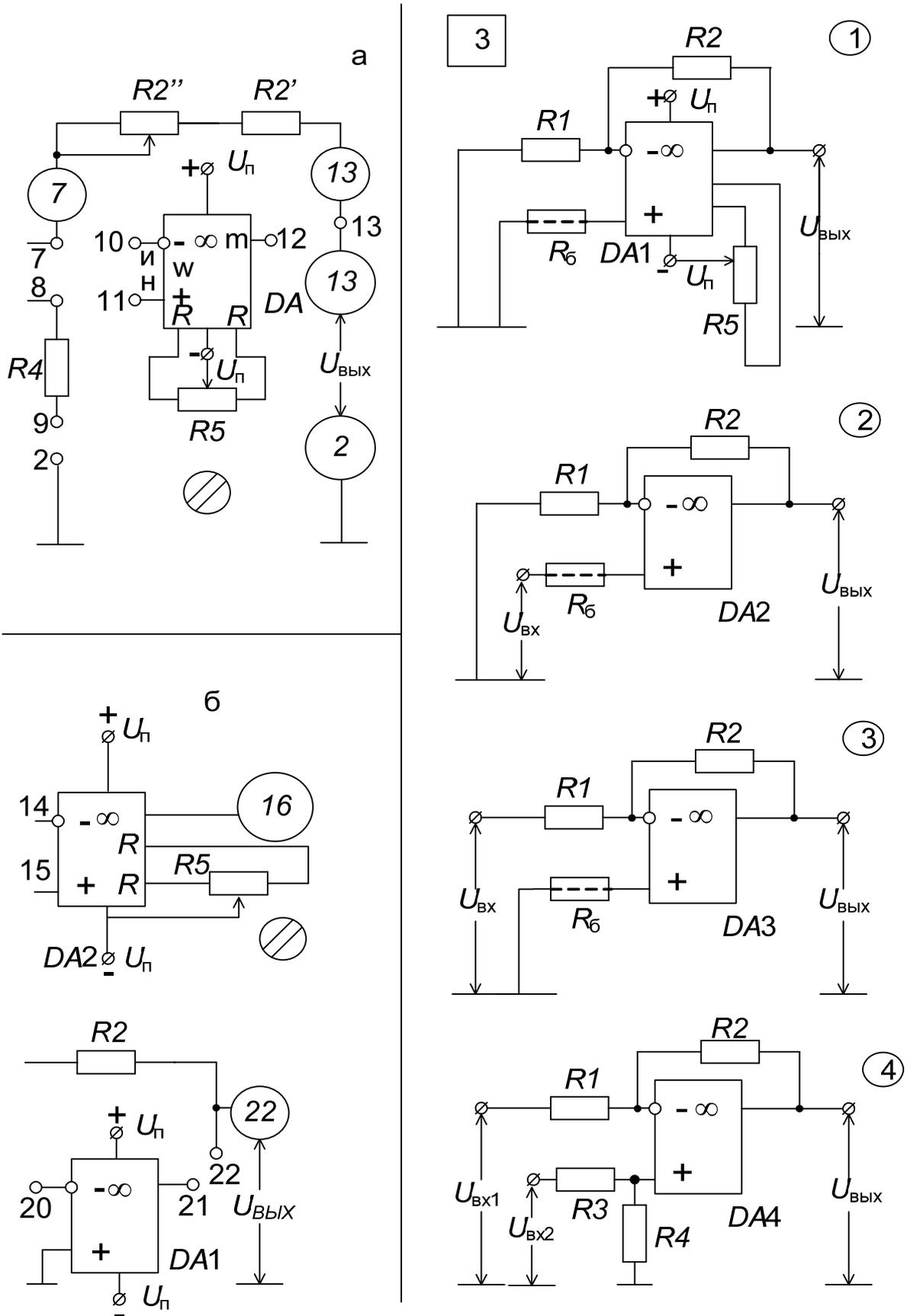


Рис. 10. Окончание

Контакты с кольцевыми наконечниками вставляются в гнезда более крупного диаметра, чем ранее перечисленные (7, 8, 9, 10, 11, 12), например 17 и 2, и необходимы для подключения измерительных приборов. В частности, при балансировке к гнездам 13 и 2 через кольцевые наконечники подключается вольтметр. Поворачивая штокпеременного резистора R_5 , добиваются нулевого или минимального показания вольтметра. Более подробное описание подготовки и проведения эксперимента будет дано при выполнении конкретной лабораторной работы.

Лицевая панель стенда разделена на три сектора, отмеченные цифрами 1, 2, 3. В первом секторе размещены источники напряжения сигнала и смещения нуля; во втором – условные графические обозначения ОУ резисторов и гнезда для набора исследуемых схем; в третьем – некоторые варианты схем включения ОУ, которые будут исследованы в ходе выполнения лабораторных работ.

Источник сигнала представляет собой делитель напряжения, собранный на двух резисторах, один из них – переменное сопротивление (потенциометр) R_p . Напряжение сигнала снимается с движка потенциометра и выводится на гнезда. Поворот штока потенциометра R_p соответствует перемещению движка (см. обозначение R_p на схеме).

Таким образом можно устанавливать требуемое значение U_{ex} . На стенде имеются два регулируемых источника входного сигнала: $U_{ex.1}$ и $U_{ex.2}$. Знак $U_{ex.1}$ всегда положительный относительно общей шины. Знак $U_{ex.2}$ может быть отрицательным, если переключатель S находится в положении «1», и положительным, когда переключатель – в положении «2». Напряжения обоих источников сигнала не превышают уровня 6В по модулю. Сведения об источнике напряжения $U_{см0}$ будут изложены позднее.

В качестве источника питания стенда используется блок питания (БП) с набором напряжений $\pm 15В$. Стенд подключается к БП с помощью шнура с цветовой маркировкой проводов. При подключении к БП следует строго соблюдать полярность, красный провод шнура питания подключается к клемме «+», синий провод – к клемме «-», черный провод – к средней точке (общая шина, или местная земля).

Для выполнения лабораторных работ потребуются приборы: универсальный вольтметр, например В7-38, который может работать в

режимах измерения постоянного и переменного напряжений, а также измерения сопротивления; генератор напряжения синусоидальной формы в качестве источника сигнала с частотой от 20 Гц до 20 кГц и выше; такие источники иногда называют генераторами колебаний звуковой частоты (ЗГ); осциллограф для наблюдения формы входного и усиленного сигналов.

В табл. 2 приведены сведения об элементах, которые использованы в схемах стендов.

Таблица 2

Элементы схемы	Стенд № 1	Стенд № 2	Стенд № 3	Стенд № 4	Стенд № 5
<i>DA</i>	КР140 УД8Б	КР140 УД17А	КР140 УД1408Б	КР140 УД708	КР140 УД8Б
<i>R1</i>	10 кОм	10 кОм	10 кОм	20 кОм	10 кОм
<i>R2'</i>	84,5 кОм	150 кОм	150 кОм	105 кОм	105 кОм
<i>R2'</i>	1 МОм	1 МОм	1 МОм	1 МОм	1 МОм
<i>R2'</i>	10 кОм	10 кОм	10 кОм	10 кОм	10 кОм
<i>R2''</i>	220 кОм	220 кОм	220 кОм	220 кОм	220 кОм
<i>R3</i>	10 кОм	10 кОм	10 кОм	10 кОм	10 кОм.
<i>R4</i>	84,5 кОм	150 кОм	150 кОм	105 кОм	105 кОм
<i>R5</i>	15 кОм	15 кОм	33 кОм	15 кОм	15 кОм
<i>R1',R3'</i>	100 Ом	100 Ом	100 Ом	100 Ом	100 Ом
<i>C_к</i>			75 пФ		
<i>DA1</i>	КР140 УД20	КР140 УД20	КР140 УД20	КР140 УД8Б	КР140 УД20
<i>R1</i>	51 кОм	51 кОм	51 кОм	51 кОм	43,2 кОм
<i>R2</i>	51 кОм	51 кОм	51 кОм	51 кОм	43,2 кОм
<i>R3</i>	100 кОм	100 кОм	100 кОм	100 кОм	100 кОм
<i>R4</i>	1,0 кОм	1,0 кОм	1,0 кОм	1,0 кОм	1,0 кОм

В табл. 3 приведены паспортные данные некоторых операционных усилителей, которые могут потребоваться при выполнении расчетного задания лабораторных работ [2, 3].

Таблица 3

Параметры	Тип ОУ					
	КР 140 УД8Б	КР140 УД17А	КР140 УД20	КР140 УД408Б	КР140 УД708	КР140 УД22
$\pm U_{п}$, В	6 ... 15	13,5...16,5	8 ... 19,5	5 ... 20	5 ... 16,5	13 ... 16,5
$I_{потр}$, мА	5	5	3,3	1	2,5	10
$I_{вых}$ мА	...	6	9	1,8
K_u	50000	200000	50000	25000	50000	100000
$U_{см,0}$, мВ	100	< 135	4,5	5 9	10	...
$I_{см}$, нА	0,2	5	80	5	400	1000
$\Delta I_{см}$, нА	0,1	4	30	1	200	500
ООСС, дБ	-70	-160	-80	-80	-70	-80
f_1 , МГц	1	0,4	0,5	0,5	0,8	1
V , В/мкс	2	0,1	0,3	0.05	0,3(20)	7,5
$U_{вых.макс}$, В	± 10	$\pm 10,5$	$\pm 10,5$	± 12	$\pm 10,5$	± 12
$R_{вх}$, МОм	10	30	0,4	10	0,4	...
$U_{диф.макс}$, В	6	5	7	13	7	20
$E_{сс мкс}$, В	± 10	± 10	± 14	± 13	± 12	± 10
$R_{н.мин}$, кОм	2	2	1	1	2	2
$C_{н.мин}$, пФ	100	100	100	...

Контрольные вопросы

1. Какие усилители называются операционными? Количество и тип связи между каскадами в схемах ОУ.
2. Изобразите блок-схему типового ОУ и расскажите о назначении и свойствах каскадов.
3. Расскажите о сигналах, действующих на входах ОУ. Какой из сигналов управляет ОУ и считается полезным, а какой – паразитным? Как определяются сигналы?
4. Как называются выводы на условном графическом обозначении ОУ? Приведите пример.
5. Изобразите общую схему включения ОУ. Что такое амплитудная характеристика? Как она выглядит для прямого и инвертирующего включений ОУ и почему? Как определить коэффициент усиления K_u по АХ?

6. Расскажите о напряжении смещения нуля $U_{см.0}$, балансировке ОУ или схемы, построенной на ОУ. Как определить $U_{см.0}$ через дифференциальный коэффициент усиления K_u ? Типовые значения $U_{см.0}$.

7. Расскажите о входных токах смещения ОУ (среднем и разности). Как они влияют на работу ОУ? Приведите схему, иллюстрирующую протекание токов смещения во входной цепи.

8. Расскажите о синфазной ошибке и параметре ООСС. Как определяется ООСС? Назовите типовые значения ООСС у современных ОУ.

9. Расскажите о входных и выходных сопротивлениях ОУ. Приведите эквивалентную схему ОУ с учетом $R_{вх}$ и $R_{вых}$. Как влияют эти параметры на работу ОУ? Типовые значения $R_{вх}$ и $R_{вых}$.

10. Как влияет нестабильность напряжений источника питания на характеристики ОУ? Параметр ООВП.

11. Частотные характеристики ОУ. Изобразите схему замещения одного каскада ОУ. Найдите формулы, по которым строят частотные характеристики и расскажите, как реагирует каскад на изменение (увеличение) частоты?

12. Что такое частота среза, полоса пропускания, частота единичного усиления и как они определяются на частотных характеристиках?

13. Каков предельный фазовый сдвиг у одно-, двух-, трехкаскадного ОУ? Виды частотной коррекции. Чем они отличаются? Достоинства и недостатки.

14. Что понимают под максимальной скоростью нарастания выходного сигнала? Как объяснить искажения сигнала, если скорость нарастания сигнала превышает допустимую?

15. Как определить предельно допустимую скорость нарастания $U_{вых}$ при известной частоте усиливаемого сигнала?

16. Классификация ОУ. Приведите три-четыре группы операционных усилителей, которые применяют в схемотехнике. Укажите их отличительные особенности.

17. Расскажите подробно о параметрах идеального ОУ. Как называют свойства идеального ОУ?

18. Как градуируются оси координатной системы для построения логарифмических характеристик? Покажите на примере.

19. Покажите пример построения логарифмических ЧХ ОУ и схем на ОУ. В чем главные отличия ЛАЧХ и ЛФЧХ от АЧХ и ФЧХ?

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ ПРЯМОГО И ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЙ ОУ

Цель работы. Ознакомиться с характеристиками прямой и инвертирующей схем включений ОУ.

1.1. Теоретические сведения

Неинвертирующий усилитель

На рис. 11 приведена прямая схема включения ОУ, или неинвертирующий усилитель. Для упрощения выкладок будем исходить из условия, что ОУ близок по свойствам к идеальному, т.е. $K_u \rightarrow \infty$, $U \rightarrow 0$, $R_{вх} \rightarrow \infty$.

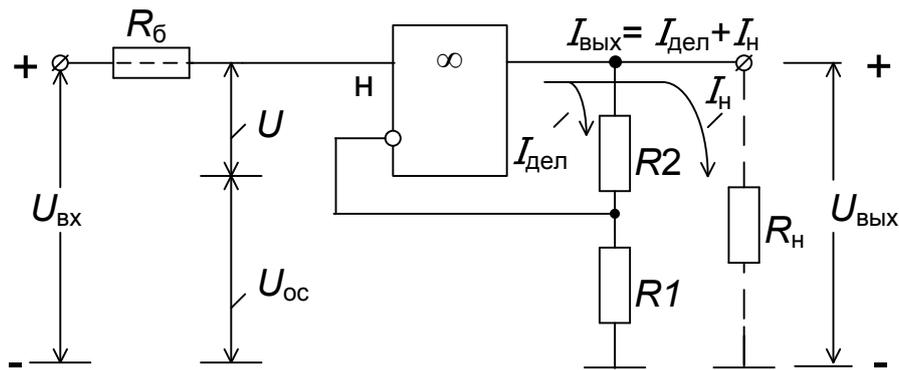


Рис. 11

В состав схемы входят операционный усилитель DA ; делитель выходного напряжения на резисторах R_1 , R_2 , подключенный к выходу ОУ; сопротивления баланса R_6 и нагрузки R_H . Сопротивление R_6 служит для выравнивания начальных токов смещения по входам ОУ. На практике R_6 выбирают равным или соизмеримым с сопротивлением параллельного соединения резисторов $R_1 \parallel R_2$ ($R_6 = R_1 \parallel R_2$). Входное сопротивление собственно ОУ $R_{вх} \gg R_6$, поэтому в расчетах сигнальных параметров схемы не учитывается.

Входной сигнал $U_{вх}$ подается на прямой вход ОУ, а напряжение, снимаемое со средней точки делителя, – на инвертирующий вход. Его

называют сигналом обратной связи и обозначают $U_{o.c.}$. Сигнал обратной связи пропорционален выходному напряжению $U_{o.c.} = \gamma U_{\text{ВЫХ}}$, где $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2)$ – коэффициент деления делителя, или коэффициент обратной связи. Обходя входную цепь по контуру, составим уравнение согласно второму закону Кирхгоффа:

$$U_{\text{ВХ}} = U + U_{o.c.} = U + \gamma U_{\text{ВЫХ}}.$$

Дифференциальное напряжение, действующее между входами ОУ,

$$U = U_{\text{ВХ}} - \gamma U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / K_u, \text{ или } U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} (\gamma + 1 / K_u). \quad (4)$$

Эти выражения являются исходными для получения упрощенной и точной формулы коэффициента усиления неинвертирующего усилителя.

Упрощенная формула. Воспользуемся полезными свойствами ОУ $K_u \rightarrow \infty$, $U \rightarrow 0$, тогда приближенно можно записать $U_{\text{ВХ}} \approx \gamma U_{\text{ВЫХ}}$, отсюда коэффициент усиления

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 1 / \gamma = (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + R_2 / R_1. \quad (5)$$

Пусть, например $R_2 = 90$ кОм, $R_1 = 10$ кОм, тогда $K = 1 + 90 / 10 = 10$.

Как видим, коэффициент усиления по напряжению жестко задан сопротивлениями резисторов делителя, т.е. цепи обратной связи. Меняя соотношение между R_1 и R_2 , можно устанавливать требуемое значение (регулировать) K .

Точная формула. Здесь предлагается все-таки учесть величину дифференциального сигнала $U = U_{\text{ВЫХ}} / K_u$. Приводя обе части выражения (4) к общему знаменателю, найдем: $U_{\text{ВХ}} K_u = U_{\text{ВЫХ}} (1 + \gamma K_u)$,

$$K = K_u / (1 + \gamma K_u) = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}. \quad (6)$$

Чтобы оценить разницу между двумя формами записи коэффициента усиления, преобразуем (6), поделив числитель и знаменатель на γK_u :

$$K = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 + 1/\gamma K_u} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{1 + (\gamma K_u)^{-1}}.$$

Рассмотрим числовой пример.

Пусть $R_2 = 90$ кОм, $R_1 = 10$ кОм, $K_u = 10^5$, $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2) = 0,1$, $\gamma K_u = 0,1 \cdot 10^5 = 10^4$.

$$K = \left(1 + \frac{90}{10}\right) \cdot \frac{1}{1 + 10^{-4}} \approx 10 \cdot (1 - 10^{-4}) = 9,999 \approx 10.$$

При $K_u = 10^4$, $\gamma K_u = 10^3$. $K = 10 \cdot (1 - 10^{-3}) = 9,99 \approx 10$. Разница между значениями K , вычисленными по упрощенной и точной формулам, составила в первом случае 0,001, во втором – 0,01.

Значение $(\gamma K_u)^{-1}$ называют погрешностью, или ошибкой неинвертирующей схемы включения ОУ. Очевидно, чем больше K_u , тем меньше ошибка $(\gamma K_u)^{-1}$. В большинстве практических случаев для расчета K достаточно применения упрощенной формулы.

Выбор сопротивлений R_1 , R_2 . К выходу ОУ в рассматриваемой схеме подключены сопротивления нагрузки R_n и делителя $(R_1 + R_2)$. Если R_n – это входное сопротивление следующего ОУ, то $I_n \approx 0$ или достаточно мало. Таким образом, можно считать делитель – единственной нагрузкой ОУ, а $I_{\text{вых}} \approx I_{\text{дел}}$ (см. рис. 11).

Минимально допустимое значение суммы $(R_1 + R_2)$ не должно приводить к перегрузке ОУ, когда выходной ток больше номинального справочного значения. Исходя из условия $I_{\text{вых.ном}} > I_{\text{вых}}$

$$(R_1 + R_2)_{\text{мин}} > U_{\text{вых}} / I_{\text{вых.ном}}.$$

Максимально допустимое значение суммы $(R_1 + R_2)$ определяется током смещения $I_{\text{см}}$ ОУ [1]. Разумный способ вычислить $(R_1 + R_2)_{\text{макс}}$ состоит в том, чтобы положить ток делителя $I_{\text{дел}} \approx I_{\text{вых}}$ равным $20 \cdot I_{\text{см}}$ при $U_{\text{вых}} = \pm U_{\text{п}} / 2$, тогда

$$(R_1 + R_2)_{\text{макс}} \leq 0,5 U_{\text{п}} / (20 \cdot I_{\text{см}}).$$

Пример. Дан ОУ типа К140 УД20. Напряжение питания $\pm U_{\text{п}} = \pm 15$ В; $U_{\text{вых.макс}} = \pm 12$ В; $I_{\text{вых.ном}} = 3$ мА; $I_{\text{см}} = 100$ нА.

Рассчитать минимальное и максимальное значения суммы $(R_1 + R_2)$, полагая, что сопротивление нагрузки R_n очень велико и $I_{\text{вых}} \approx I_{\text{дел}}$.

$$(R_1 + R_2)_{\text{мин}} > 12 / 3 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^3 = 4 \text{ кОм}.$$

$$(R_1 + R_2)_{\text{макс}} = 0,5 \cdot 15 / 20 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 7,5 / 2 \cdot 10^{-6} = 3,75 \text{ МОм.}$$

Диапазон допустимых значений сопротивления суммы $(R_1 + R_2)$ 4 кОм ... 3,75 МОм. Напомним, что соотношение между сопротивлениями резисторов R_2 и R_1 жестко определяет значение коэффициента усиления схемы $K = 1 + R_2/R_1$. Из практических соображений минимальное значение $(R_1 + R_2)$ выбирают в несколько раз больше рассчитанного.

Обратная связь. Под обратной связью в усилительных устройствах понимают передачу части выходного сигнала во входную цепь. В этой схеме $U_{o.c}$ пропорционально $U_{\text{вых}}$, действует во входной цепи последовательно с напряжениями $U_{\text{вх}}$ и U . Согласно (4) дифференциальное напряжение U меньше входного $U_{\text{вх}}$ на величину $U_{o.c}$. Такую обратную связь называют последовательной, по напряжению (т.к. она пропорциональна $U_{\text{вых}}$) и отрицательной (т.к. $U_{o.c}$ вычитается из $U_{\text{вх}}$).

Если ограничиться приведенными здесь рассуждениями и выкладками, то действие отрицательной обратной связи (ООС) сводится к снижению коэффициента усиления до значения K и возможности его регулирования. В действительности с применением ООС схема приобретает много полезных свойств, которые пока не рассматриваются.

О термине «неинвертирующий усилитель». Входной сигнал подается на прямой вход, а инвертирующий через резистор R_1 соединен с общей шиной. Положительному или отрицательному приращению входного сигнала соответствует положительное или отрицательное приращение выходного сигнала. Иначе говоря, фазы (знаки) входного и выходного сигналов совпадают. У неинвертирующего усилителя амплитудная характеристика имеет вид АХ1 (см. рис. 2).

Оценка некоторых свойств прямой схемы усиления. Как следует из выражения (4), для прямой схемы включения ОУ характерна большая величина входного синфазного сигнала. Действительно, при $U \rightarrow 0$ $U_{\text{вх}} \approx U_{o.c}$. Если $U_{\text{вх}}$, действующее на входе «н», равно, например 2 В, то и $U_{o.c}$, действующее на входе «и», также практически равно 2 В. В этом случае $E_{c.c} = 2$ В и следует ожидать заметной доли $U_{\text{вых.син}}$, т.е. ошибки, в составе напряжения выходного сигнала $U_{\text{вых}}$. Это свойство является недостатком неинвертирующего усилителя.

К достоинствам же относятся следующие свойства : а) очень большое входное сопротивление схемы благодаря действию последовательной отрицательной ОС; б) отсутствие влияния источника входного сигнала на коэффициент усиления K .

Дадим объяснение сказанному, для чего найдем формулу, определяющую входное сопротивление схемы. Обозначим его $R_{вх.ос}$ (сопротивление усилителя с обратной связью, в отличие от $R_{вх}$ – входного сопротивления собственно ОУ).

Напомним: $U = U_{ни}$ – дифференциальное напряжение между входами ОУ; $U = IR_{вх}$, где I – сигнальный входной ток ОУ; $U_{вых} = K_u U$; $U_{ос} = \gamma U_{вых}$. Запишем и преобразуем известное уравнение входной цепи схемы:

$$U_{вх} = U + \gamma U_{вых} = U + \gamma K_u U = U(1 + \gamma K_u) = IR_{вх}(1 + \gamma K_u).$$

Поделив обе части последнего выражения на I , получим

$$R_{вх.ос} = R_{вх}(1 + \gamma K_u).$$

Входное сопротивление ОУ велико – сотни килоом – единицы мегаом, но очевидно, $R_{вх.ос}$ во много раз больше, т.к. $\gamma K_u \gg 1$. Как показывает практика, в большинстве случаев внутреннее сопротивление источника входного сигнала оказывается пренебрежимо малым по сравнению с $R_{вх.ос}$ и поэтому не влияет на свойства усилителя. В то же время большое $R_{вх.ос}$, являясь нагрузкой для источника сигнала, обеспечивает последнему благоприятный режим работы, близкий к режиму холостого хода, что также относится к достоинствам неинвертирующего усилителя.

Инвертирующий усилитель

На рис.12 приведена схема инвертирующего включения ОУ, или инвертирующий усилитель.

Как и в предыдущем случае, для упрощения выкладок будем считать, что ОУ близок по свойствам к идеальному, т.е. $K_u \rightarrow \infty$, $U = U_{и} = U_{\Sigma} \rightarrow 0$, $R_{вх} \rightarrow \infty$, $I_{вх} \rightarrow 0$. Состав схемы остается таким же, как и у неинвертирующего усилителя, но изменяется конфигурация. Условимся, что внутреннее сопротивление источника входного сигнала $r_{вн}$ и выходное сопротивление ОУ $R_{вых}$ равны нулю.

Пара сопротивлений $R1$, $R2$ передает воздействие входного сигнала схемы $U_{вх}$ и выходного сигнала $U_{вых}$ на инвертирующий вход ОУ.

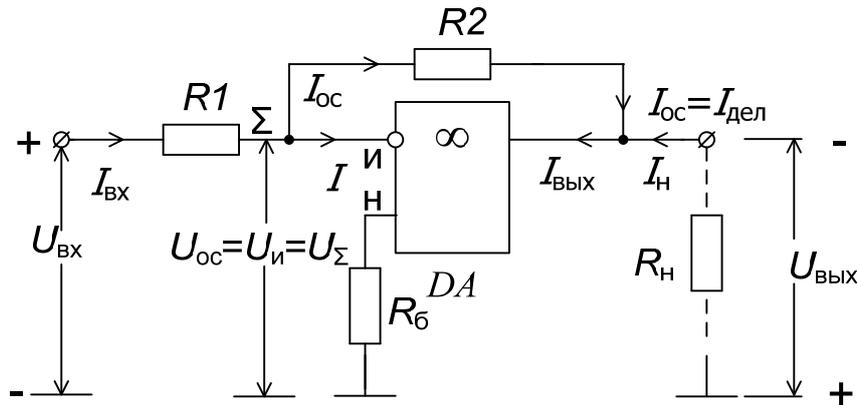


Рис. 12

В результате взаимодействия в точке суммирования Σ формируется некоторое результирующее дифференциальное напряжение $U_{\Sigma} = U_{и} = U_{о.с.}$, которое и управляет состоянием ОУ. Остановимся подробнее на этом рассуждении. Рассмотрим отдельно действия сигналов $U_{вх}$ и $U_{вых}$ на вход «и».

1. Положим, что появилось $U_{вх}$ положительного знака (см. рис. 12). На вход «и» попадает лишь часть $U_{вх}$, так как сопротивления $R1$, $R2$ образуют делитель напряжения. При этом правый вывод резистора $R2$ для сигнального тока считается заземленным, тогда

$$U_{и} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{вх} = \mu U_{вх},$$

где μ – коэффициент прямой передачи.

2. Поскольку положительный входной сигнал воздействует на инвертирующий вход, то на выходе ОУ появляется отрицательное напряжение $-U_{вых}$. Это напряжение через резистор $R2$ также будет воздействовать на вход «и», но в противофазе с воздействием от $U_{вх}$. На вход «и» попадает лишь часть напряжения $-U_{вых}$; его называют напряжением обратной связи:

$$U_{ос} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{вых} = \gamma U_{вых},$$

где γ — коэффициент обратной связи.

Напряжения U_{Σ} , $U_{о.с.}$, $U_{и} = U$ в установившемся режиме действуют между одними и теми же точками схемы, поэтому равны. Воздейст-

вие выходного напряжения $-U_{\text{ВЫХ}}$ частично компенсирует воздействие $+U_{\text{ВХ}}$ на инвертирующий вход ОУ.

Если представить, что резистор R_2 отключен, то исчезнет компенсирующее воздействие со стороны выхода. $U_{\text{и}} = U$ окажется равным $U_{\text{ВХ}}$. При отсутствии обратной связи ОУ перейдет в состояние насыщения и будет неуправляемым.

В точке (узле) суммирования алгебраически складываются токи $I_{\text{ВХ}}, I, I_{\text{о.с.}}$. Согласно первому закону Кирхгоффа

$$I_{\text{ВХ}} = I + I_{\text{о.с.}}, \text{ или } \frac{U_{\text{ВХ}} - U}{R_1} = I + \frac{U - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}.$$

Воспользуемся одним из замечательных свойств ОУ $I \rightarrow 0$; после приведения к общему знаменателю получим

$$U_{\text{ВХ}}R_2 = -U_{\text{ВЫХ}}R_1 + (R_1 + R_2)U. \quad (7)$$

Это выражение является исходным для получения упрощенной и точной формулы коэффициента усиления инвертирующего усилителя.

Упрощенная формула. С учетом $U \rightarrow 0$ выражение (7) можно записать в виде $U_{\text{ВХ}}R_2 \approx -U_{\text{ВЫХ}}R_1$, отсюда коэффициент усиления

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Пусть, например $R_2 = 100$ кОм, $R_1 = 10$ кОм, тогда $K = -100/10 = -10$. И в этой схеме коэффициент усиления жестко задан сопротивлениями резисторов R_2, R_1 ; меняя соотношение между ними, можно устанавливать требуемое значение K .

Точная формула. Здесь предлагается учесть величину дифференциального напряжения $U = -U_{\text{ВЫХ}}/K_u$. Проведем несложные преобразования: поделим обе части выражения (7) на $(R_1 + R_2)$, введем коэффициенты μ и γ :

$$U_{\text{ВХ}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = -U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_U}, \text{ или } \mu K_U U_{\text{ВХ}} = -(1 + \gamma K_U) U_{\text{ВЫХ}};$$

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{\mu K_U}{1 + \gamma K_U}. \quad (8)$$

Оценим разницу между двумя формулами коэффициента усиления, поделив числитель и знаменатель на γK_U :

$$K = -\frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 + (\gamma K_u)^{-1}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + (\gamma K_u)^{-1}}.$$

Рассмотрим пример. Пусть $K_u = 10^5$, $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 100$ кОм, $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2) = 0,091$, $\gamma K_u = 10^5 = 0,91 \cdot 10^4$.

$$K = -\frac{100}{10} \cdot \frac{1}{1 + 0,91 \cdot 10^{-4}} \approx -10 \cdot (1 - 0,91 \cdot 10^{-4}) = -9,999 \approx 10.$$

При $K_u = 10^4$ $\gamma K_u = 0,91 \cdot 10^3$ $K_u = -10(1 - 10^{-3}) = -9,99$.

Числовые значения $(\gamma K_u)^{-1}$ – это ошибка инвертирующей схемы включения ОУ. С ростом K_u разница между значениями коэффициента усиления, рассчитанными по упрощенной и точной формулам, уменьшается.

Обратная связь. В инвертирующей схеме действует отрицательная обратная связь, т.к. воздействия напряжений $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ на инвертирующий вход ОУ находятся в противофазе; обратная связь по напряжению, т.к. $U_{\text{о.с.}} = \gamma U_{\text{вых}}$; параллельная, поскольку в точке суммирования алгебраически складываются токи: $I_{\text{вх}} = I + I_{\text{о.с.}}$.

О выборе сопротивлений R_1 , R_2 . Допустимые пределы сопротивлений рассчитываются точно так же, как и для неинвертирующей схемы включения.

О термине «инвертирующий усилитель». В этой схеме входной сигнал через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, а неинвертирующий – заземлен. Положительному или отрицательному приращению входного сигнала соответствует отрицательное или положительное приращение выходного. Иначе говоря, фазы (знаки) входного и выходного сигналов противоположны. У инвертирующего усилителя амплитудная характеристика имеет вид АХ2 (см. рис. 2).

Оценка некоторых свойств инвертирующей схемы усиления. В инвертирующем усилителе прямой вход соединен с общей шиной либо непосредственно, либо через сопротивление R_6 . Поскольку входной ток ОУ $I \rightarrow 0$, то можно принять $U_{\text{н}} = IR_6 \approx 0$. Напряжение в точке суммирования Σ (оно же – напряжение на инвертирующем входе «и»), согласно свойству ОУ $U_{\Sigma} = U_{\text{ин}} \rightarrow 0$. Из приведенных рассуждений следует, что в инвертирующем усилителе величина синфазного сигнала $E_{\text{с.с.}} = 0,5(U_{\text{н}} + U_{\text{и}}) \approx 0$, а значит и синфазная

ошибка в составе выходного сигнала отсутствует. Это – достоинство схемы.

Формула, определяющая коэффициент усиления, $K = -R_2/R_1$, получена из предположения, что внутреннее сопротивление источника входного сигнала $r_{вн} = 0$. На практике $r_{вн}$ не только отличается от нуля, но и может значительно меняться. С учетом $r_{вн}$ $K = -R_2/(R_1 + r_{вн})$. Это свойство относится к недостаткам, т.к. в процессе работы сложно учитывать произвольные изменения $r_{вн}$, а значит и коэффициента усиления.

Входное сопротивление инвертирующей схемы ограничивается сопротивлением R_1 . Действительно, для входной цепи справедливо уравнение, составленное согласно второму закону Кирхгоффа:

$$U_{вх} = I_{вх}R_1 + U_{\Sigma} \approx I_{вх}R_1,$$

отсюда следует формула

$$R_{вх.о.с} \approx U_{вх}/I_{вх} \approx R_1.$$

Входное сопротивление данной схемы, в отличие от прямой, относительно невелико, что является недостатком.

1.2. Расчетное задание

В работе используется операционный усилитель DA , который обозначен в верхней половине сектора 2 лицевой панели стенда. Исследуемые схемы набираются с помощью резисторов R_1 , R_2 (R_2' и R_2''), R_3 . Потенциометр R_5 служит для балансировки (компенсация напряжения смещения нуля $U_{см.0}$).

1. Рассчитать коэффициенты обратной связи γ и усиления K неинвертирующего усилителя. Оценить погрешность прямой схемы включения $(\gamma K_u)^{-1}$. В расчетах использовать справочное значение K_u .

2. Рассчитать коэффициенты прямой передачи μ , обратной связи γ и усиления K инвертирующего усилителя. Оцените погрешность инвертирующей схемы $(\gamma K_u)^{-1}$.

3. Построить амплитудные характеристики прямой и инвертирующей схем включения ОУ. При построении графиков АХ руководствуются следующими соображениями: напряжения питания ОУ $\pm U_{п} = \pm 15$ В, максимальные значения выходного напряжения ОУ $\pm U_{вых.макс}$ отличаются от $\pm U_{п}$ на доли, в худшем случае на 1 – 2 В. Следует самостоя-

тельно задать значения $\pm U_{\text{вых.макс}}$ и рассчитать $\pm U_{\text{вх.макс}} = \pm U_{\text{вых.макс}}/K$. Полученные значения напряжений $\pm U_{\text{вх.макс}}$ и $\pm U_{\text{вых.макс}}$ являются координатами точек на графиках АХ, ограничивающих рабочие области. Примерная форма АХ приведена на рис. 2, б.

Расчеты коэффициентов и построения АХ должны быть подготовлены ко дню проведения лабораторной работы. Графики АХ выполняются на миллиметровой бумаге формата А4.

1.3. Рабочее задание

1. Ознакомиться или прочитать заново описание лабораторного стенда. При выполнении работы потребуются следующие приборы и оборудование: блок питания с напряжениями ± 15 В; вольтметр В7–38; соединительные перемычки и штекеры с кольцевыми наконечниками.

Подключите БП и вольтметр к сети 220 В, 50 Гц. Соедините шнур питания стенда с клеммами БП, соблюдая полярность: красный провод шнура к клемме «+»; синий провод – к клемме «–»; черный – к средней точке (общая шина, или местная земля).

2. Соедините проводниками измерительные клеммы вольтметра В7 – 38 с гнездами 7 и 13 стенда. Переключите вольтметр в режим измерения сопротивлений. Поворачивая движок потенциометра $R2''$, уменьшите его сопротивление до нуля. Теперь общее сопротивление резисторов, включенных между гнездами 7 и 13, равно $R2'$. Переключите вольтметр в режим измерения напряжения. Переведите выключатель S на передней панели БП вверх. Напряжения питания ± 15 В поданы на схемы стенда.

3. Балансировка, или компенсация $U_{\text{см.0}}$. Соберите схему 1, изображенную в секторе 3 лицевой панели стенда. Для этого следует соединить перемычками гнезда 5 и 2; 6 и 2; 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13. Подключите вольтметр к гнездам 13 и 2.

Медленно поворачивая движок потенциометра $R5$ «уст. нуля», добиваются нулевого или минимально достижимого показания вольтметра, подключенного к выходу DA . Такой способ компенсации $U_{\text{см.0}}$ через специальные выводы микросхемы $R - R$ предусмотрен у многих интегральных ОУ, но не является единственным. Заметим,

что при балансировке заземляется вход схемы усилителя, а не входы собственно ОУ.

4. Соберите схему неинвертирующего усилителя (схема 2, изображенная в секторе 3 лицевой панели стенда). Для этого нужно снять перемычку, соединяющую гнезда 6 и 2, и поставить новую перемычку между гнездами 6 и 3. Гнездо 3 соединено с движком потенциометра $R_{p,2}$, который будет выполнять функцию управляемого источника входного сигнала $U_{вх}$.

Поворачивая движок потенциометра $R_{p,2}$ и фиксируя значения $U_{вх}$ и $U_{вых}$, снимите амплитудную характеристику усилителя, т.е. зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ (не менее десяти точек). Отметьте значения $U_{вых}$ и $U_{вх}$, при которых начинается область насыщения АХ.

Поменяйте положение переключателя S на стенде; при этом изменится знак $U_{вх}$. Повторите эксперимент. По окончании измерений установите с помощью потенциометра $R_{p,2}$ напряжение $U_{вх} = 0$.

5. Поверните движок потенциометра $R5$ против или по часовой стрелке до упора таким образом искусственно вводится $U_{см.0}$. Снимите амплитудную характеристику схемы при положительном и отрицательном знаках $U_{вх}$. По окончании измерений установите $U_{вх} = 0$. Сбалансируйте схему, действуя согласно п. 3.

6. Соберите поочередно две схемы, изображенные на рис. 13. Обе схемы называют неинвертирующими повторителями напряжения.

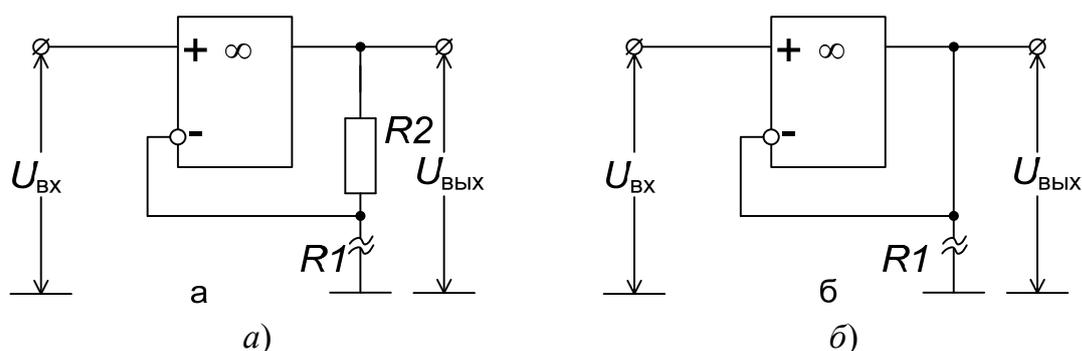


Рис. 13

Вариант А. Чтобы собрать схему, надо снять перемычки, соединяющие гнезда 5 и 2; 6 и 2; 8 и 11, и поставить перемычки между гнездами 7 и 10; 3 и 11. Можно и оставить соединенными гнезда 8 и 11, а входной сигнал подать на гнездо 6. Снимите амплитудную характеристику повторителя (не менее пяти точек).

Вариант Б. Поставьте перемычку между гнездами 7 и 13. Повторите измерения при тех же значениях входного сигнала.

7. Выключите блок питания стенда. Соберите схему инвертирующего усилителя (схема 3 в секторе 3 на лицевой панели стенда) самостоятельно, используя полученные ранее навыки. После проверки преподавателем, ведущим занятие, включите БП.

В качестве источника сигнала используйте напряжение, снимаемое с движка потенциометра $R_{p.2}$. Поворачивая движок и фиксируя значения $U_{вх}$ и $U_{вых}$, снимите амплитудную характеристику усилителя $U_{вых} = f(U_{вх})$ (не менее десяти точек). Отметьте значения $U_{вых}$ и $U_{вх}$, при которых начинается область насыщения.

Измените полярность сигнала. Повторите эксперимент.

8. Поверните движок потенциометра $R5$ против или по часовой стрелке до упора. Таким образом искусственно вводится $U_{см.0}$. Снимите амплитудную характеристику при положительном и отрицательном знаках $U_{вх}$. По окончании измерений установите $U_{вх} = 0$. Сбалансируйте схему, действуя согласно п. 3.

9. Выключите блок питания стенда. Установите резистор $R2'$ с сопротивлением, равным $R1$. Собранную схему называют инвертирующим повторителем. Включите блок питания. Снимите АХ повторителя при различных знаках входного сигнала.

По окончании измерений выключите БП и вольтметр; снимите перемычки и штекеры с лицевой панели стенда; отсоедините шнур питания стенда от клемм БП; приведите рабочее место в порядок.

1.4. Методические указания по оформлению отчета

1. Расчетные и экспериментальные данные должны быть сведены в таблицы.

2. Амплитудные характеристики схем усиления, полученные в ходе эксперимента, строят в одних координатах с расчетными.

3. Рассчитайте коэффициенты усиления прямой и инвертирующей схем включения ОУ по амплитудным характеристикам, полученным экспериментально; сравните с теоретическими.

4. Постройте АХ неинвертирующих повторителей (два варианта) и инвертирующего. Рассчитайте по АХ коэффициенты передачи повторителей.

5. При проведении анализа результатов проделанной работы ответьте на следующие вопросы:

а) как объяснить разницу между теоретическими и экспериментальными значениями K ?

б) почему коэффициент передачи неинвертирующего повторителя $K \rightarrow 1$? (Обратите внимание на формулу, определяющую коэффициент усиления прямой схемы включения).

в) как рассчитать напряжение $U_{см.0}$, если известны коэффициент усиления схемы и величина $U_{вых}$ при $U_{вх} = 0$?

г) какими должны быть сопротивления резисторов R_2 и R_1 , чтобы инвертирующий усилитель стал повторителем?

1.5. Содержание отчета

Отчет выполняется каждым участником работы.

1. Название и цель работы.
2. Схемы усилителей и повторителей, исследуемых в работе.
3. Расчеты, таблицы расчетных и экспериментальных данных, графики характеристик.
4. Анализ результатов проделанной работы.

1.6. Контрольные вопросы

1. Изобразите схему неинвертирующего усилителя на ОУ с указанием обозначений элементов, действующих напряжений и протекающих токов. Как составить уравнение, являющееся исходным для получения упрощенной и точной формул коэффициента усиления?

2. Приведите упрощенную и точную формулы расчета коэффициента усиления прямой схемы. Задайтесь значениями R_2 и R_1 и рассчитайте ошибку, которая получается при использовании упрощенной формулы.

3. Как определяют предельные значения $R1$ и $R2$? Приведите числовой пример расчета $(R1 + R2)_{\text{мин}}$ и $(R1 + R2)_{\text{макс}}$.

4. Дайте определение некоторых признаков обратной связи в прямой схеме включения ОУ. Почему ее называют отрицательной, последовательной, по напряжению?

5. Как объяснить термин «неинвертирующий усилитель»? Изобразите АХ схемы.

6. Расскажите о достоинствах и недостатках прямой схемы усиления. Как объяснить большое значение входного синфазного сигнала? Это достоинство или недостаток?

7. Объясните, почему входное сопротивление прямой схемы включения велико?

8. Изобразите схему инвертирующего усилителя. Объясните действие обратной связи в схеме.

9. Как определяют коэффициенты прямой и обратной связей?

10. Составьте уравнение входной цепи схемы инвертирующего усилителя, являющееся исходным для получения упрощенной и точной формул коэффициента усиления?

11. Приведите упрощенную формулу расчета коэффициента усиления инвертирующей схемы и конкретный числовой пример.

12. Приведите точную формулу расчета K и конкретный числовой пример. Оцените ошибку инвертирующей схемы включения ОУ.

13. Дайте определение некоторых признаков ОС в инвертирующем усилителе. Почему ОС называют отрицательной, параллельной, по напряжению?

14. Как определяют предельные значения $R1$ и $R2$? Приведите числовой пример расчета $(R1 + R2)_{\text{мин}}$ и $(R1 + R2)_{\text{макс}}$ для одного из усилителей стенда.

15. Как объяснить термин «инвертирующий усилитель»? Изобразите АХ схемы.

16. Расскажите о достоинствах и недостатках инвертирующей схемы. Объясните отсутствие (практическое) синфазного сигнала на входах инвертирующего усилителя.

17. Объясните, почему входное сопротивление инвертирующей схемы относительно невелико?

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ

Цель работы. Ознакомиться с приемами компенсации напряжения смещения нуля ($U_{см.0}$); изучить методику расчета напряжения внешней балансировки ОУ.

2.1. Краткие теоретические сведения

Внешняя компенсация напряжения смещения нуля

Причины смещения амплитудных характеристик ОУ (т.е. причины напряжения смещения нуля $U_{см.0}$) могут быть разными. К основным относят неравенство начальных токов смещения и неравенство исходных напряжений на переходах триодов входного каскада ОУ.

Сначала рассмотрим влияние начальных токов смещения $I_{см.н}$ и $I_{см.и}$ на $U_{см.0}$. Даже при использовании сбалансированного ОУ может появиться сдвиг амплитудной характеристики, если схема построена без учета токов смещения. Обратимся к рис. 14, а, на котором изображена схема инвертирующего усилителя при $U_{вх} = 0$.

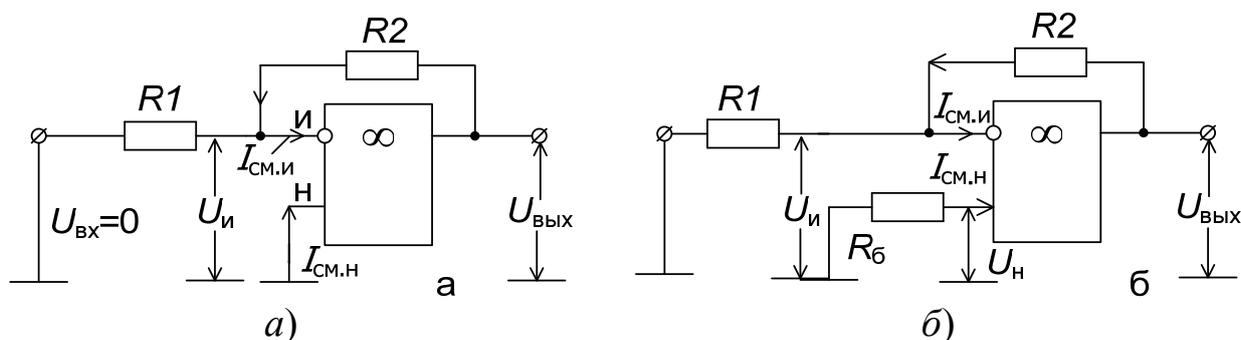


Рис. 14

Прямой вход ОУ заземлен (соединен с общей шиной), имеет нулевой потенциал. Ток смещения $I_{см.и}$, протекая через параллельно соединенные сопротивления R_1 и R_2 , создает падение напряжения $I_{см.и}(R_1 \parallel R_2)$, которое действует на инвертирующем входе «И», воспринимается операционным усилителем как напряжение смещения $U_{см.0}$ и вызывает появление $U_{ввых}$ при $U_{вх} = 0$.

Как скомпенсировать сдвиг АХ? Будем исходить из условия, что $I_{см.и} \approx I_{см.н}$. Подключив к прямому входу сопротивление $R_6 = R_1 \parallel R_2$, получим на этом входе напряжение $U_n = I_{см.н} R_6$, которое скомпенсирует действие U_i на другом входе (рис.14, б). Напомним, что дифференциальный сигнал, управляющий усилителем, $U_{ин} = U_i - U_n$. После компенсации $U_{ин} \approx 0$, значит и $U_{вых} = 0$.

Для того чтобы скомпенсировать $U_{см.0}$, вызванное неравенством исходных напряжений на переходах входных триодов ОУ, схему прямого или инвертирующего усилителя дополняют внешним источником небольшого постоянного напряжения – напряжением балансировки $U_{бал}$. Схемы усилителей с внешней балансировкой приведены на рис. 15.

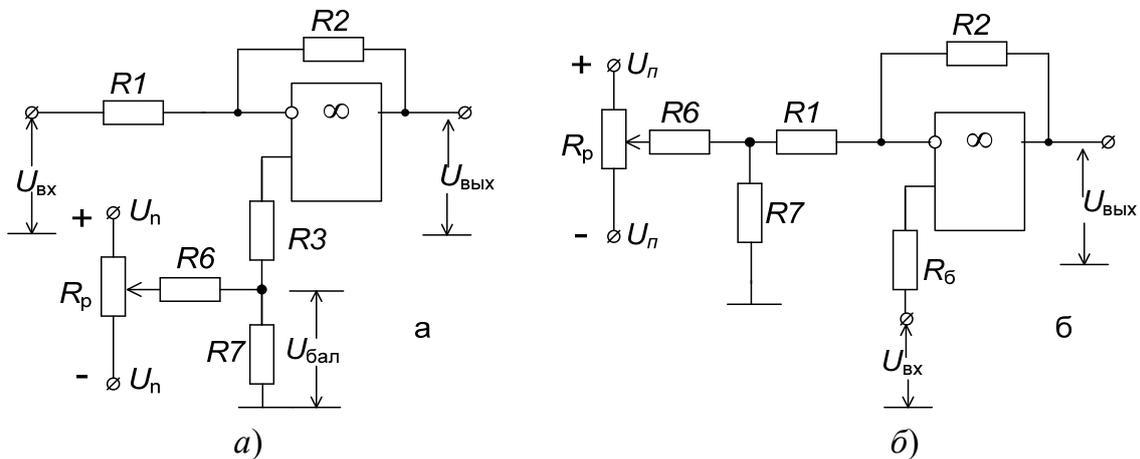


Рис. 15

Роль источника напряжения $U_{бал}$ выполняет высокоомный потенциометр R_p и делитель, собранный на резисторах R_6, R_7 . Потенциометр своими внешними выводами подключен к полюсам источника питания ОУ: $+U_{п}$ и $-U_{п}$. Какими соображениями руководствуются при выборе параметров балансировки?

Сопротивления R_2 и R_1 определены коэффициентом усиления: $K = -R_2/R_1$; $K = 1 + R_2/R_1$, т.е. они известны. В инвертирующем усилителе (рис. 15, а) сопротивление резисторов, подключенных к прямому входу, должно быть равно $R_6 = R_1 \parallel R_2$, чтобы обеспечить компенсацию $U_{см.0}$ от начальных токов смещения. R_6 составляют из двух последовательно соединенных сопротивлений R_3 и R_7 : $R_6 = R_3 + R_7$, причем $R_3 \gg R_7$.

Напряжение внешней балансировки подается в точку «а» от потенциометра R_p через высокоомный резистор R_6 . Резисторы R_6 и R_7 образуют делитель. Если движок потенциометра R_p находится в крайних верхнем или нижнем положениях, то напряжения балансировки будут максимальными ($U_{см.0.макс}$):

$$U_{см.0.макс} = U_{бал} = |U_n| \frac{R_7}{R_7 + R_6}.$$

Напряжения питания операционных усилителей общего применения обычно равны $\pm 12,6$; ± 15 ; ± 20 В, а напряжения смещения $U_{см.0}$ десятки милливольт, в худшем случае – сотни милливольт, поэтому $R_6 \gg R_7$, отсюда приближенно можно считать, что

$$U_{см.0.макс} \approx U_{п}(R_7/R_6). \quad (9)$$

Рекомендации и пример расчета резисторов внешней балансировки. Ток через потенциометр R_p должен быть, как минимум, в 20 ... 40 раз больше начальных токов смещения $I_{см}$ [1]. Аналогично максимальный ток через резистор R_6 должен быть равен (20...40) $I_{см}$, чтобы с гарантией обеспечить $U_{см.0.макс}$.

Пример. Начальные токи смещения ОУ $I_{см.н} = I_{см.и} = 0,75$ мкА. Напряжение смещения нуля $U_{см.0.макс} = 30$ мВ; напряжения питания ОУ $\pm U_{п} = \pm 15$ В. Положим, что коэффициент усиления усилителя задан и сопротивления резисторов R_1 и R_2 выбраны: $K = 10$; $R_1 = 10$ кОм; $R_2 = 100$ кОм. Сопротивление R_6 , балансирующее ОУ по начальным токам смещения

$$R_6 = R_3 + R_7 = R_1 \parallel R_2 \approx 9,1 \text{ кОм}.$$

Зададим ток через сопротивления потенциометра R_p и резистора R_6 : $40 \cdot I_{см} = 40 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} = 30 \cdot 10^{-6} = 30$ мкА.

Потенциометр находится под действием разности напряжений $+U_{п} - (-U_{п}) = 15 - (-15) = 30$ В. Сопротивление потенциометра $R_p = 2U_{п} / 30 \cdot 10^{-6} = 1$ МОм. Потенциометр с большим сопротивлением не будет нагружать источник питания ОУ, поэтому для более мягкой и точной балансировки целесообразно уменьшить R_p в 2 ... 3 раза. Выберем R_p равным, например 330 кОм. Сопротивление резистора $R_6 = U_{п} / 30 \cdot 10^{-6} = 15 / 30 \cdot 10^{-6} = 500$ кОм.

Теперь из формулы (9) найдем выражение для расчета резистора R_7 :

$$R_7 = R_6(U_{см.0.макс} / U_{п}) = 500 \cdot 10^3 \cdot (30 \cdot 10^{-3} / 15) = 1 \text{ кОм}.$$

Сумма сопротивлений $R_3 + R_7 = 9,1$ кОм, отсюда следует, что $R_3 = 9,1 - 1 = 8,1$ кОм.

В практических схемах рассчитанные значения сопротивлений резисторов приходится округлять до ближайших стандартных номиналов.

Балансировка в неинвертирующем усилителе (рис. 14, б) осуществляется аналогично. В чем заключается особенность? Делитель напряжения на резисторах R_6, R_7 находится в цепи отрицательной ОС, так что очень важно, чтобы R_6 было бы много больше R_7 . Если это условие выполняется, то коэффициент усиления рассчитывается по формуле

$$K = 1 + R_2 / (R'_1 + R_7) = 1 + R_2 / R_1,$$

где $R'_1 + R_7 = R_1$.

В остальном расчет и выбор сопротивлений резисторов выполняется так же, как и для инвертирующего усилителя.

2.2. Рабочее задание

1. Подключите вольтметр и БП к сети 220 В, 50 Гц; подключите стенд к выходным клеммам БП, соблюдая полярность: красный провод шнура – к клемме «+», синий провод шнура – к клемме «-», черный провод – к средней точке (общей шине).

2. Переведите вольтметр В7-38 в режим измерения сопротивления и подключите к гнездам 7 и 13; поворачивая движок потенциометра R_2'' , уменьшите общее сопротивление резисторов $R_2'' + R_2' = R_2$ до величины сопротивления R_2' . Переведите вольтметр в режим измерения напряжения и подключите его к гнездам 13 и 2.

3. Соберите схему 1, изображенную в секторе 3 (для этого следует соединить перемычками гнезда 7 и 10, 8 и 11, 12 и 13, 5 и 2, 6 и 2, 9 и 2). В собранной схеме $R_6 = R_3 \parallel R_4 = R_1 \parallel R_2'$.

Переведите выключатель S на передней панели БП вверх; напряжения питания ± 15 В поданы на схемы стенда.

С помощью потенциометра R_5 «уст. нуля» сбалансируйте схему. Для этого, медленно поворачивая движок потенциометра R_5 , добей-

тесь минимального значения $U_{\text{ВЫХ}}$; в лучшем случае $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. Схема сбалансирована.

4. Измерьте напряжение $U_{\text{ВХ.2}}$ между гнездами 3 и 2. Поворачивая движок потенциометра $R_{\text{р2}}$, уменьшите $U_{\text{ВХ.2}}$ до нуля. Снимите перемычку между гнездами 5 и 2 и поставьте новую между гнездами 5 и 3. Измерьте напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ и, если оно не равно 0, добейтесь минимально возможного с помощью потенциометра R_5 .

Снимите амплитудную характеристику схемы $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ (не менее пяти точек). Последняя точка измерений соответствует максимальному значению $U_{\text{ВЫХ}}$, которое должно быть известно из предыдущей работы.

Уменьшите $U_{\text{ВХ.2}}$ до нуля. Переведите выключатель S на панели стенда в другое положение; снимите АХ (не менее пяти точек) при измененной полярности $U_{\text{ВХ}}$. Занесите данные измерений в табл. 4.

Таблица 4

$+U_{\text{ВХ}}$						$-U_{\text{ВХ}}$					
$-U_{\text{ВЫХ}}$						$+U_{\text{ВЫХ}}$					

5. Уменьшите $U_{\text{ВХ}}$ до нуля. Снимите перемычки, соединяющие гнезда 8 и 11, 9 и 2, поставьте перемычку между гнездами 11 и 2. Теперь в схеме усилителя $R_6 = 0$. Отсутствует компенсация сдвига АХ по начальным токам смещения. Далее следует снять АХ. Общее количество измерений может быть уменьшено, например два измерения (точки) для $+U_{\text{ВХ}}$ и два измерения для $-U_{\text{ВХ}}$. Результаты измерений занесите в табл. 5.

Таблица 5

$+U_{\text{ВХ}}$			$-U_{\text{ВХ}}$		
$-U_{\text{ВЫХ}}$			$U_{\text{ВЫХ}}$		

6. Подключите вольтметр к гнездам схемы внешней балансировки 4 и 2. Повернув движок потенциометра $R_{\text{р}}$ до упора против часовой стрелки, а затем по часовой, измерьте и запишите максимальные значения напряжений смещения $\pm U_{\text{см.0макс}} = U_{\text{бал}}$.

Подключите гнездо 4 к нижнему выводу сопротивления R_6 (см. рис. 14, а). Роль R_6 на стенде будут выполнять параллельно соединенные резисторы R_3 и R_4 , причем $R_3 \parallel R_4 = R_2 \parallel R_2'$. Для этого следует снять перемычки между гнездами 11 и 2; 6 и 2; соединить перемычками гнезда 8 и 11; 6 и 9; 6 и 4.

Подключите вольтметр к выходу усилителя. Поворачивая движок потенциометра R_p , сбалансируйте схему. Убедитесь, что усилитель может быть сбалансирован.

Измерьте $\pm U_{\text{вых}}$ при напряжениях смещения нуля $\pm U_{\text{см.0.макс}}$. Зная коэффициент усиления усилителя, рассчитайте реальное значение $\pm U_{\text{см.0}} = \pm U_{\text{вых}} / K$; сравните с $\pm U_{\text{см.0.макс}}$. Запишите результаты измерений.

7. По окончании измерений выключите БП и вольтметр; снимите перемычки и штекеры с лицевой панели стенда; отсоедините шнур питания стенда от клемм БП; приведите рабочее место в порядок.

2.3. Методические указания по оформлению отчета

1. Построить графики АХ по результатам измерений п. 4 рабочего задания. Определите значения $\pm U_{\text{вых.макс}}$ (обозначьте на графиках).

2. Построить графики АХ по результатам измерения п. 5 рабочего задания.

3. Оцените, достаточно ли напряжение смещения нуля, которое можно снять с точки «а» (гнездо 4) для балансировки схемы, собранной на ОУ?

4. Приведите в отчете результаты расчетов согласно п. 6 рабочего задания.

2.4. Содержание отчета

Отчет выполняется каждым участником работы.

1. Название и цель работы.
2. Схемы балансировки инвертирующего и прямого усилителей.
3. Таблицы, расчеты, графики характеристик.
4. Анализ результатов работы.

2.5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные причины появления $U_{см.0}$.
2. Можно ли применять схемы включения ОУ (прямую и инвертирующую) без резистора R_6 ?
3. Если предполагается применение резистора R_6 , то из каких соображений выбирается его сопротивление?
4. Приведите пример расчета сопротивлений резисторов, образующих цепь внешней компенсации $U_{см.0}$ для инвертирующей схемы включения ОУ.
5. Приведите пример расчета сопротивлений резисторов, образующих цепь внешней компенсации $U_{см.0}$ для прямой схемы включения ОУ.
6. Из каких соображений выбираются сопротивления резисторов внешней компенсации $U_{см.0}$?

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ СИНФАЗНОГО СИГНАЛА

Цель работы. Изучить схемы и способы измерения коэффициентов, характеризующих усилительные свойства ОУ.

3.1. Краткие теоретические сведения

Измерение коэффициента усиления дифференциального сигнала K_u . Описание эксперимента

На рис. 16, *а* изображена схема эксперимента, представляющая собой инвертирующий повторитель с некоторыми изменениями, которые введены для удобства измерений. В обычном инвертирующем повторителе (рис. 16, *б*) точка деления сигнала обратной связи соединена непосредственно с инвертирующим входом ОУ. В схеме экспе-

римента эта же точка выведена на внешний контакт «к» (18). Обозначим напряжение на контакте U_k .

Напряжение U_i поступает на инвертирующий вход ОУ с делителя, собранного на резисторах R_3, R_4 . Сопротивления резисторов подобраны так, чтобы коэффициент деления делителя R_3, R_4 был равен 100.

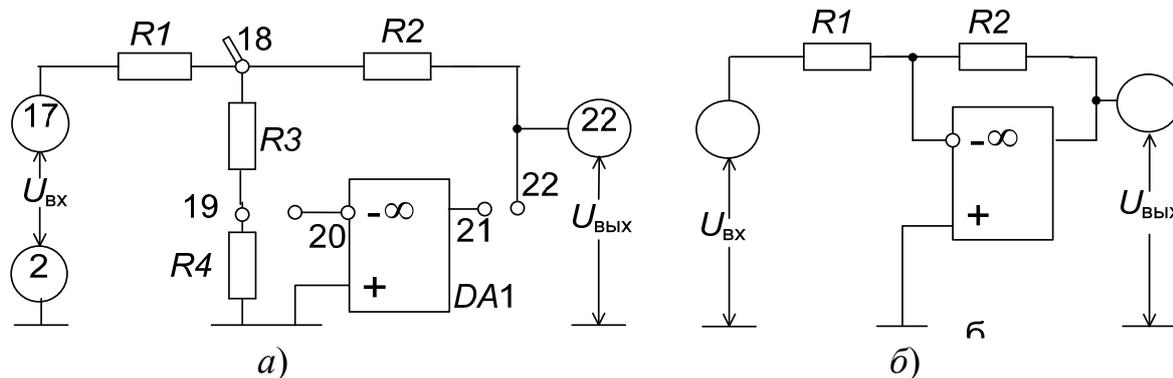


Рис. 16

Например, сопротивления резисторов $R_3 = 99 \text{ кОм}$, $R_4 = 1 \text{ кОм}$; в этом случае

$$U_i = U_k R_4 / (R_3 + R_4) = U_k / 100,$$

отсюда $U_k = 100U_i$.

Если на вход схемы подать сигнал $U_{\text{ВХ}}$ невысокой частоты или сигнал, постоянный по роду тока, то на выходе повторителя появится сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$, практически равный входному. Измеряя напряжение на контакте U_k , при известном коэффициенте деления делителя R_3, R_4 , нетрудно рассчитать коэффициент усиления ОУ в области низких частот:

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_i = 100 \cdot U_{\text{ВЫХ}} / U_k.$$

С какой целью в схему вводится делитель R_3, R_4 ? Дело в том, что коэффициент усиления собственно операционного усилителя на частотах, близких к нулевой, может быть большим (сотни тысяч и более), тогда дифференциальное напряжение U_i между входами ОУ оказывается очень малым. Точно измерить такое напряжение затруднительно. Применение делителя позволяет использовать в расчетах

K_u напряжение U_k , которое на два порядка больше U_{in} и может быть измерено с большей точностью. Еще раз отметим: чем меньше частота входного сигнала в эксперименте, тем ближе полученное значение K_u к истинному.

Коэффициент передачи синфазного сигнала $K_{c.c.}$

Относительное ослабление синфазного сигнала

Если два сигнала одинаковой величины и знака действуют на прямом и инвертирующем входах идеального ОУ ($U_{in} - U_{in} = U_{ин} = U = 0$), то и величина выходного сигнала должна быть равна нулю (рис. 17, а). В реальных усилителях это условие не выполняется, т.е. при равенстве U_{in} и U_{in} всегда есть выходной сигнал, хотя и небольшой.

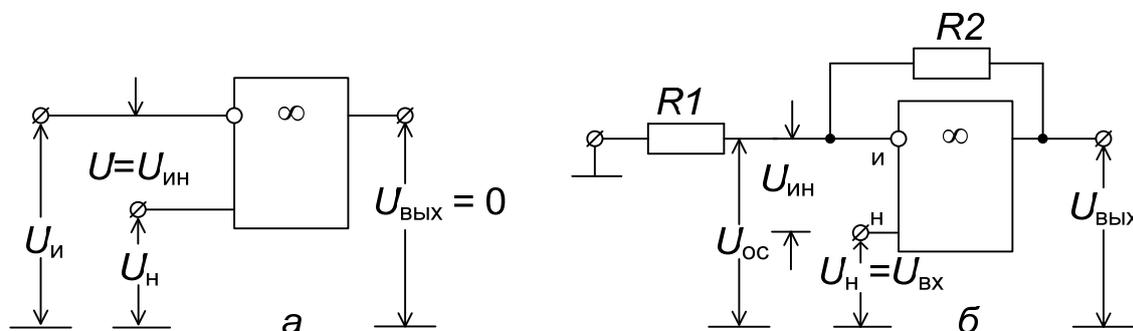


Рис. 17

Напомним, что, по определению, под синфазным сигналом $E_{c.c.}$ понимают напряжение, действующее одновременно с одинаковой амплитудой и фазой на обоих входах ОУ.

В инвертирующем усилителе величина синфазного сигнала практически равна нулю, поэтому обсуждать вопросы о реакции схемы на действие $E_{c.c.} \approx 0$ не имеет смысла.

В неинвертирующем усилителе (рис. 17, б) входной сигнал подается на прямой вход ОУ $U_{вх} = U_{in}$; на инвертирующем входе «и» устанавливается напряжение обратной связи $U_{o.c} = U_{in} = \gamma U_{вх}$. Разница между этими напряжениями $U_{in} - U_{in} = U_{ин}$ при большом значении K_u очень мала. Если измерить U_{in} и U_{in} относительно общей шины, то они будут практически одинаковы. Отсюда следует, что в неинвертирующем усилителе на входах действует синфазный сигнал $E_{c.c} = 0,5(U_{in} + U_{in}) \approx U_{вх}$, величина которого может быть достаточно велика. Выходной сигнал будет содержать не только полезную состав-

ляющую (от усиленного дифференциального сигнала), но и паразитную $U_{\text{вых.син}}$, являющуюся реакцией на действие $E_{\text{с.с}}$. $U_{\text{вых.син}}$ расценивается как ошибка.

В дифференциальном усилителе два одинаковых по знаку сигнала сравниваются на разных входах (см. рис. 17, а). Здесь также напряжения $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{и}}$ мало отличаются друг от друга, следовательно на входах действует синфазный входной сигнал $E_{\text{с.с}} = 0,5(U_{\text{н}} + U_{\text{и}})$, а на выходе в составе $U_{\text{вых}}$ появляется сигнал ошибки $U_{\text{вых.син}}$.

Коэффициент усиления (точнее коэффициент передачи) синфазного сигнала определяется выражением

$$K_{\text{с.с}} = U_{\text{вых.син}} / E_{\text{с.с}}. \quad (10)$$

Чем меньше $K_{\text{с.с}}$, тем выше качество ОУ. Другим параметром для оценки реакции ОУ на синфазный сигнал является ООСС – относительное ослабление синфазного сигнала. Как вычисляется этот параметр?

Из (10) следует, что $U_{\text{вых.син}} = K_{\text{с.с}} E_{\text{с.с}}$. Поделив обе части последнего выражения на коэффициент усиления дифференциального сигнала $K_{\text{и}}$, получим

$$\frac{U_{\text{вых.син}}}{K_{\text{и}}} = \Delta U_{\text{син}} = \frac{K_{\text{с.с}}}{K_{\text{и}}} E_{\text{с.с}} = \text{ООСС} \cdot E_{\text{с.с}},$$

где $\Delta U_{\text{син}}$ – приведенное ко входу напряжение ошибки в составе выходного; (синфазная ошибка); $\text{ООСС} = K_{\text{с.с}} / K_{\text{и}}$ – относительное ослабление синфазного сигнала.

У современных ОУ ООСС находится в пределах 0,001 ... 0,00001, или –60 ... –100 дБ. В технической литературе используют также показатель КОСС = $(\text{ООСС})^{-1}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала, соответственно значения КОСС составляют 1000 ... 100000, или 60 ... 100 дБ.

В ряде измерительных схем, где по условиям работы приходится использовать дифференциальные усилители, параметр ООСС (КОСС) является весьма важным. Необходимо уметь рассчитывать ошибку, вызванную конечной величиной ООСС. Проведем анализ сначала неинвертирующего усилителя с целью определения $U_{\text{вых.син}}$, а затем дифференциального усилителя, в котором сигналы сравниваются на разных входах.

Определение сигнала ошибки в неинвертирующем усилителе

Известно, что коэффициент усиления и выходной сигнал неинвертирующего усилителя определяются выражениями

$$K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = K_u/(1 + \gamma K_u), \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}[K_u/(1 + \gamma K_u)].$$

Однако эта формула выведена в предположении, что коэффициент передачи синфазного сигнала равен нулю, т.е. без учета действия $E_{\text{с.с}}$. Теперь надо получить формулу, которая будет учитывать действие и полезного, дифференциального, сигнала, и паразитного, синфазного.

Очевидно,

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_u U_{\text{НИ}} + K_{\text{с.с}} E_{\text{с.с}} = K_u (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{о.с}}) + K_{\text{с.с}} E_{\text{с.с}},$$

где $U_{\text{НИ}}$ заменено разностью $U_{\text{ВХ}} - U_{\text{о.с}}$, а $E_{\text{с.с}}$ принимается равным $U_{\text{ВХ}}$.

Далее подставим $U_{\text{о.с}} = \gamma U_{\text{ВЫХ}}$ и проведем несложные преобразования:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_u U_{\text{ВХ}} - \gamma K_u U_{\text{ВЫХ}} + K_{\text{с.с}} E_{\text{с.с}}; \quad U_{\text{ВЫХ}}(1 + \gamma K_u) = K_u U_{\text{ВХ}} + K_{\text{с.с}} E_{\text{с.с}};$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} [K_u/(1 + \gamma K_u)] + E_{\text{с.с}} [K_{\text{с.с}}/(1 + \gamma K_u)],$$

ИЛИ

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} [K_u/(1 + \gamma K_u)] + E_{\text{с.с}} \text{ООСС} [K_u/(1 + \gamma K_u)]. \quad (11)$$

полезная составляющая ошибка в составе выходного сигнала

$$K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = \underbrace{K_u/(1 + \gamma K_u)}_{\text{коэффициент усиления дифференциального сигнала}} + \underbrace{K_{\text{с.с}}/(1 + \gamma K_u)}_{\text{коэффициент усиления синфазного сигнала}} =$$

$$= (1 + \text{ООСС}) K_u / (1 + \gamma K_u). \quad (12)$$

полный коэффициент усиления

Пример 1. Исходные данные: коэффициент усиления ОУ $K_u = 1000$; ООСС = 0,001 или -60 дБ.

Задача: определить выходной сигнал неинвертирующего усилителя (см. рис. 17, б), полезную составляющую $U_{\text{ВЫХ.диф}}$ и ошибку $U_{\text{ВЫХ.син}}$; коэффициент усиления дифференциального сигнала, синфазного (ошибки), полный коэффициент усиления схемы.

Пусть $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_2 = 100 \text{ кОм}$; $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2) = 0,091$; $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$; $E_{\text{с.с}} = 0,5(U_{\text{н}} + U_{\text{и}}) = 0,5(1 + 1) \approx 1 \text{ В}$.

Расчет.

1. Определим коэффициент усиления дифференциального сигнала

$$K = K_u / (1 + \gamma K_u) = 10^3 / (1 + 0,091 \cdot 10^3) = 10,869.$$

2. Определим выходное напряжение согласно (11):

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} [K_u / (1 + \gamma K_u)] + \text{ООСС} \cdot E_{\text{с.с}} [K_u / (1 + \gamma K_u)] = 10,88 \text{ В}.$$

$$= 10,869 \text{ В} + 10,869 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

дифференциальная напряжение ошибки
составляющая выходного $U_{\text{вых.син}}$
сигнала выходной сигнал

Поскольку значение $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, то и значения коэффициентов усиления численно будут равны напряжениям: коэффициент усиления дифференциального (полезного) сигнала равен 10,869; коэффициент усиления синфазного сигнала равен 0,010869; полный коэффициент усиления схемы – 10,88.

Из расчетов следует, что синфазная ошибка невелика, около 10,87 мВ. Если принять $U_{\text{вых.син}}$ за абсолютную погрешность $\Delta = U_{\text{вых.син}} = U_{\text{вых}} - U_{\text{вых.диф}}$, то относительная погрешность

$$\delta = (\Delta / U_{\text{вых}}) 100 = (0,010869 / 10,88) \cdot 100 = 0,0998 \% \approx 0,1 \%$$

Определение сигнала ошибки в дифференциальном усилителе

Схема усилителя с обозначением сигналов представлена на рис. 18, а. Предполагается работа ОУ в линейном режиме, следовательно, для анализа применим принцип суперпозиции (наложения), т.е. выходной сигнал можно рассматривать как реакцию на совместное действие входных сигналов по двум входам: инвертирующему и неинвертирующему. Оговорим также условие: $R_3 = R_1$; $R_4 = R_2$.

Пусть сначала $U_{\text{вх.1}} = 0$; найдем составляющую выходного напряжения как реакцию на $U_{\text{вх.2}}$. При этом точка 1 мысленно заземляется; получаем прямую схему включения ОУ (неинвертирующий усилитель, рис. 18, б). Составляющая выходного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ.Н}} = K_u(U_H - U_{\text{и}}) + K_{\text{с.с}}E_{\text{с.с}} = K_u(U_H - U_{\text{о.с}}) + K_{\text{с.с}}E_{\text{с.с}},$$

где $U_H = U_{\text{ВХ.2}}R_2 / (R_1 + R_2) = \mu U_{\text{ВХ.2}}$; $U_{\text{о.с}} = \gamma U_{\text{ВЫХ.Н}}$.

Отсюда, после подстановок U_H и $U_{\text{о.с}}$ в выражение для $U_{\text{ВЫХ.Н}}$, находим $U_{\text{ВЫХ.Н}}(1 + \gamma K_u) = \mu K_u U_{\text{ВХ.2}} + K_{\text{с.с}}E_{\text{с.с}}$, наконец

$$U_{\text{ВЫХ.Н}} = \frac{\mu K_u}{1 + \gamma K_u} \cdot U_{\text{ВХ.2}} + \frac{K_{\text{с.с}}}{1 + \gamma K_u} \cdot E_{\text{с.с}} \approx \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ.2}} + \frac{K_u}{1 + \gamma K_u} \cdot \frac{K_{\text{с.с}}}{K_u} \cdot E_{\text{с.с}}.$$

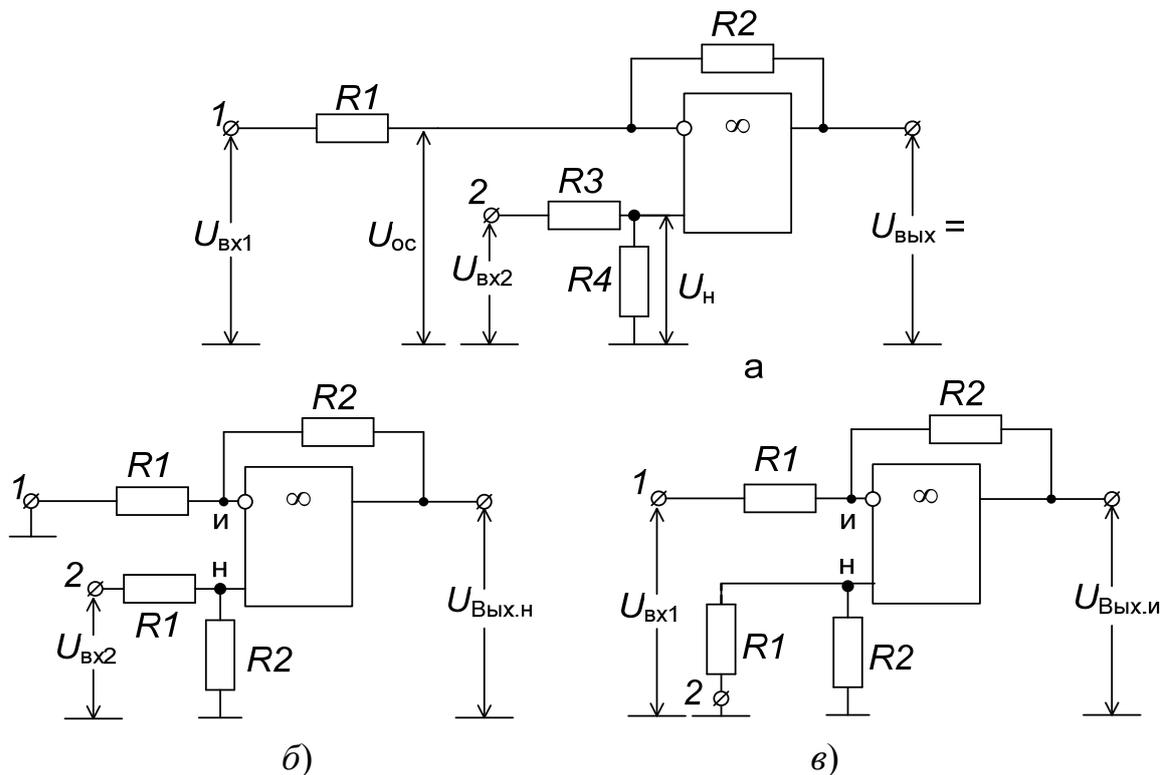


Рис. 18

Теперь положим $U_{\text{ВХ.2}} = 0$ и найдем составляющую выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ.И}}$ от действия $U_{\text{ВХ.1}}$. При этом точка 2 мысленно заземляется; получим инвертирующий усилитель (рис. 18, в). Составляющая выходного напряжения по инвертирующему каналу ОУ

$$U_{\text{ВЫХ.И}} = -\frac{\mu K_u}{1 + \gamma K_u} \cdot U_{\text{ВХ.1}} \approx -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ.1}}.$$

Выходной сигнал дифференциального усилителя находят как алгебраическую сумму $U_{\text{ВЫХ.Н}}$ и $U_{\text{ВЫХ.И}}$:

включен датчик, изменяющий свое сопротивление под действием, например, температуры или усилия (сжатие-растяжение).

В исходном состоянии мост сбалансирован, напряжения $U_{\text{вх.1}}$ и $U_{\text{вх.2}}$ равны, соответственно и $U_{\text{вых}}$, также должно быть равно нулю. При изменении температуры появляется приращение ΔR , возникает сигнал разбаланса $U_{\text{раз}} = U_{\text{вх.2}} - U_{\text{вх.1}}$. На практике $U_{\text{раз}}$ обычно невелико по сравнению с синфазным напряжением. На схеме (см. рис. 19) напряжение питания моста $U_{\text{п}} = 10$ В. Если мост сбалансирован, сопротивления его плеч равны, тогда $U_{\text{вх.2}} = U_{\text{вх.1}} = 5$ В = $U_{\text{сф}}$. Рассчитаем синфазную ошибку $U_{\text{вых.син}}$ при напряжении разбаланса: $U_{\text{вх.2}} - U_{\text{вх.1}} = 1$ мВ.

Исходные данные: коэффициент усиления ОУ $K_u = 10^4$; ООСС = 10^{-4} , или -80 дБ; $R_2 = 100$ кОм, $R_1 = 10$ кОм.

Определить полезную составляющую выходного сигнала $U_{\text{вых.диф}}$ и ошибку $U_{\text{вых.син}}$, согласно (14):

$$U_{\text{вых}} = [100/10] \cdot (1 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 10 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Таким образом, $U_{\text{вых.диф}} = 10$ мВ, $U_{\text{вых.син}} = 5$ мВ, $U_{\text{вых}} = 15$ мВ. Относительная погрешность

$$\delta = (U_{\text{вых.син}} / U_{\text{вых}}) \cdot 100 = (5 / 15) \cdot 100 \approx 33,33\%.$$

Положим, что сопротивления R_2 выбраны равными 1 МОм, тогда $R_2/R_1 = 100$; $\gamma = 0,099$. При прежних параметрах ОУ получим

$$U_{\text{вых}} = 100 \cdot (1 \cdot 10^{-3}) + 100 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \approx 100 \text{ мВ} + 50 \text{ мВ.}$$

Как следует из расчетов, с увеличением коэффициента усиления схемы возрастают и $U_{\text{вых.диф}}$, и напряжение ошибки $U_{\text{вых.син}}$. Очевидно, для снижения ошибки, а значит и погрешности, необходимо выбрать ОУ с существенно бóльшим подавлением синфазного сигнала (ООСС).

3.2. Рабочее задание

Ознакомьтесь или прочитайте заново описание лабораторного стенда. При выполнении работы потребуются следующие приборы и оборудование: блок питания с набором напряжений ± 15 В; вольтметр (напри-

мер В7-38), звуковой генератор, осциллограф, соединительные перемычки и проводники, штекеры с кольцевыми наконечниками.

Подключите БП, вольтметр, осциллограф и звуковой генератор к питающей сети 220 В, 50 Гц.

Установите на выходных клеммах ЗГ напряжение, равное примерно 2 В с частотой 20 ... 30 Гц. Контроль выходного напряжения ЗГ осуществляется с помощью вольтметра.

Подключите шнур питания стенда к выходным клеммам БП, соблюдая полярность: красный провод шнура питания – к клемме «+»; синий провод – к клемме «-»; черный провод – к средней (общей) точке.

Измерение коэффициента усиления ОУ K_u

1. Сначала проводятся измерения коэффициента усиления ОУ $DA1$, размещенного в нижнем отделе сектора 2. Здесь же обозначены элементы схемы повторителя, которую следует собрать на ОУ $DA1$.

Соедините перемычками гнезда 19 и 20, 21 и 22; соедините выходные клеммы ЗГ с входными гнездами повторителя 17 и 2. Переведите выключатель S на передней панели БП в верхнее положение. Напряжения питания поданы на схемы стенда.

Подключая осциллограф поочередно ко входу (17 и 2) и выходу (22 и 2) повторителя, убедитесь в том, что форма $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ синусоидальная. Схема готова к измерениям.

2. С помощью ЗГ (регулировкой) установите входное напряжение таким, чтобы выходное напряжение повторителя было равно 2 В.

Тщательно измерьте и запишите в табл. 6 $U_{\text{вых}}$, $U_{\text{к}}$ на контакте 18 и $U_{\text{вх}}$.

Таблица 6

Элемент	Напряжения, В			
	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{к}}$	K_u
$DA 1$	2			
	4			
	6			
$DA 2$	2			
	4			
	6			
DA	2			
	4			
	6			

Установите напряжение $U_{\text{вх}}$ таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 4 В. Повторите измерения напряжений $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{вых}}$. Запишите результаты измерений в табл. 6.

Установите напряжение $U_{\text{вых}}$, равным 6 В. Повторите измерения напряжений $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{вых}}$. Запишите результаты измерений в табл. 6. Напомним, что форма напряжений $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ должна быть синусоидальной, а значения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ практически равны.

Уменьшите напряжение на входе повторителя до нуля. Выключите источник питания стенда ± 15 В (выключатель S на передней панели БП перевести в нижнее положение).

3. Далее необходимо собрать схему повторителя на ОУ $DA2$. Для этого надо выполнить следующие операции: снять перемычки, соединяющие гнезда 19 и 20, 21 и 22; поставить новые перемычки между гнездами 2 и 15; 19 и 14; 22 и 16.

По существу, цепь, состоящая из элементов $R1$, $R2$, $C1$, $R3$, $R4$ и формирующая схему повторителя, подключена теперь к выводам ОУ $DA2$. Включите напряжения питания стенда ± 15 В (ключ S на передней панели БП перевести в верхнее положение).

Установите напряжение на входе повторителя $U_{\text{вх}}$ таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 2 В. Подключая осциллограф ко входу и выходу схемы, убедитесь в том, что форма $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ синусоидальная. Тщательно измерьте и запишите в табл. 6 значения напряжений $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{к}}$, $U_{\text{вых}}$.

Проведите аналогичные измерения при $U_{\text{вых}} = 4$ В и 6 В. Запишите результаты измерений в табл. 6.

Уменьшите напряжение на входе повторителя до нуля. Выключите источник питания стенда ± 15 В (ключ S на передней панели БП перевести в нижнее положение).

4. Соберите схему повторителя на ОУ DA , размещенном в верхнем отделе сектора 2. Для этого необходимо снять перемычки, соединяющие гнезда 2 и 15; 19 и 14; 22 и 16; поставить новые перемычки между гнездами 11 и 2; 19 и 10; 22 и 12. Цепь, формирующая схему повторителя, подключена к выводам ОУ DA .

Включите напряжения питания стенда ± 15 В (ключ S на передней панели БП перевести в верхнее положение).

Установите напряжение на входе повторителя $U_{\text{вх}}$ таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 2 В. Подключая осциллограф к входу и выходу схемы, убедитесь, что форма сигналов синусоидальная. Тщательно измерьте и запишите в табл. 6 значения напряжений $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{вых}}$.

Проведите аналогичные измерения при $U_{\text{ВЫХ}} = 4 \text{ В}$ и 6 В . Запишите результаты измерений в табл. 6.

Уменьшите напряжение на входе повторителя до нуля. Снимите проводники, соединяющие выход ЗГ и гнезда 17 и 2. Выключите источник питания стенда $\pm 15 \text{ В}$. Снимите перемычки, соединяющие гнезда 11 и 2; 19 и 10; 22 и 12.

Измерение коэффициента передачи $K_{c.c.}$ Относительное ослабление синфазного сигнала

Схема эксперимента изображена на рис. 20. Входы схемы объединены. Методика измерения ООСС (или величины обратной ООСС – КОСС) сводится к подключению на объединенный вход некоторого напряжения $U_{\text{сф}}$ и измерению вызванного им выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ.СИН}}$.

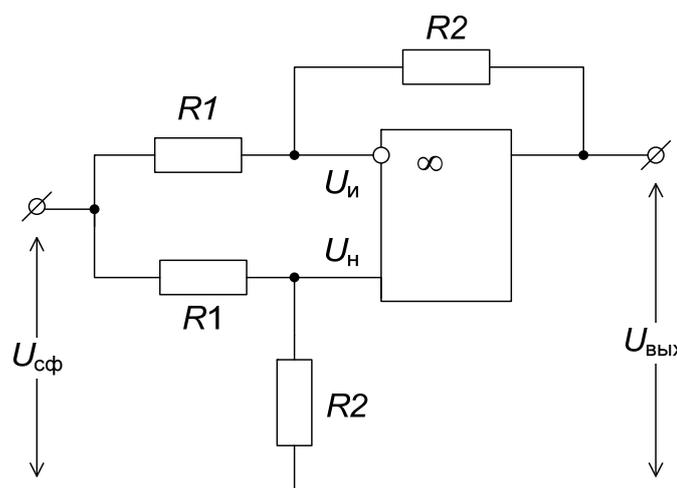


Рис. 20

В разделе теоретических сведений дан анализ работы дифференциального усилителя, получена формула (14) расчета выходного сигнала, причем предполагается, что на входах схемы действует реальный входной сигнал, содержащий и дифференциальную $U_{\text{диф}} = U_{\text{вх.2}} - U_{\text{вх.1}}$, и синфазную $U_{\text{сф}}$ составляющие. Схема эксперимента исключает действие дифференциального сигнала, поэтому формула (13) упрощается и принимает вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.СИН}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \cdot \text{ООСС} \cdot E_{\text{сс}} = U_{\text{сф}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \text{ООСС}, \quad (15a)$$

или

$$U_{\text{ВЫХ.СИН}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \cdot \frac{1}{\text{КОСС}} \cdot E_{\text{СС}} = U_{\text{СФ}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\text{КОСС}}, \quad (156)$$

где $\text{ООСС} = K_{\text{с.с}}/K_u$, $\text{КОСС} = K_u/K_{\text{с.с}}$.

Для расчета ООСС и $K_{\text{с.с}}$ потребуется знать K_u , сопротивления резисторов R_1, R_2 ; задать $U_{\text{сф}}$ и измерить $U_{\text{ВЫХ.СИН}}$.

1. Сначала проводятся измерения параметров ОУ DA , размещенного в верхнем отделе сектора 2. При выполнении эксперимента должно соблюдаться условие $R_1 = R_3, R_4 = R_2$. Пояснение: на стенде $R_2 = R_2' + R_2''$; сопротивление резистора R_2' подобрано равным R_4 ; R_2'' – потенциометр (переменный резистор) – это дополнительное сопротивление, которое при необходимости выводится на нулевое значение перед измерениями, чтобы выполнялось условие $R_2' = R_4$.

Переведите вольтметр (например В7-38) в режим измерения сопротивления; подключите к гнездам 7 и 13; поворачивайте движок потенциометра R_2'' , пока общее сопротивление цепи не окажется минимальным и равным R_2' . Измерьте и запишите сопротивления резисторов R_1, R_3, R_4 . Убедитесь в том, что сопротивления $R_1 = R_3, R_4 = R_2'$. Напомним: на схеме рис. 19 R_3 обозначено как R_1 ; R_4 – как R_2 .

Переведите вольтметр в режим измерения напряжения и используйте его в дальнейшем для контроля $U_{\text{сф}}$ и $U_{\text{ВЫХ.СИН}}$.

2. Соедините перемычками гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13; 9 и 2; 5 и 6. Соедините проводниками выходные клеммы ЗГ с входными гнездами схемы 6 и 2.

Переведите выключатель S на передней панели БП в верхнее положение. Напряжения питания ± 15 В поданы на стенд.

Регулировкой выхода ЗГ установите напряжение на входе схемы $U_{\text{сф}} = 5$ В с частотой 20 ... 30 Гц. Измерьте напряжение на выходе $-U_{\text{ВЫХ.СИН}}$ (гнезда 13 и 2).

Запишите данные, необходимые для расчета ООСС , КОСС , $K_{\text{с.с}}$: K_u ; $R_1, R_3, (R_1 = R_3)$; $R_2', R_4 (R_2' = R_4 = R_2)$; $\gamma = R_1/(R_1 + R_2)$.

Уменьшите входное напряжение схемы до нуля; выключите напряжение питания стенда. Снимите перемычки, соединяющие гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13.

3. Соберите схему для измерения (расчета) ООСС , КОСС , $K_{\text{с.с}}$ операционного усилителя $DA2$. Соедините перемычками гнезда 7 и 14; 8 и 15; 13 и 16. Включите напряжение питания стенда.

Регулировкой выхода 3Г установите напряжение на входе схемы $U_{\text{сф}} = 5 \text{ В}$ с частотой 20 ... 30 Гц. Измерьте напряжение на выходе $-U_{\text{вых.син}}$ (гнезда 13 и 2). Запишите данные, необходимые для расчетов, по аналогии с п. 2.

Во введении отмечено, что синфазная ошибка и ООСС зависят от уровня $U_{\text{сф}}$ и частоты. Проведем измерения при измененных значениях $U_{\text{сф}}$ и частоты.

4. Уменьшите уровень входного синфазного напряжения до уровня 3 В при прежнем значении частоты. Измерьте и запишите данные, необходимые для расчетов.

Уменьшите уровень $U_{\text{сф}}$ до нуля. Увеличьте частоту до 2000 Гц; восстановите напряжение $U_{\text{сф}} = 3 \text{ В}$; измерьте и запишите $U_{\text{вых.син}}$.

5. Уменьшите входной сигнал до нуля. Выключите напряжение питания стенда $\pm 15 \text{ В}$ (выключатель S на передней панели БП перевести в нижнее положение). Снимите перемычки, проводники и штекеры. Выключите приборы, отсоедините шнуры питания от сети 220 В, 50 Гц. Приведите рабочее место в порядок.

3.3. Расчетное задание

Измерение K_u

1. По данным, приведенным в табл. 2, 3 для стенда, на котором выполняется работа, рассчитать точное значение коэффициента деления напряжения U_k (делитель на резисторах $R3, R4$) в схеме инвертирующего повторителя.

Используя результаты измерений, рассчитать коэффициенты усиления K_u ОУ $DA, DA1, DA2$. Для каждого из ОУ измерения проводились при трех значениях $U_{\text{вх}}$. Значение K_u находят как среднее арифметическое.

2. По результатам расчетов построить амплитудные характеристики ОУ, полагая, что в пределах рабочей области $K_u = \text{const}$. Уровни напряжений насыщения $\pm U_{\text{вых.макс}}$ заимствовать из лабораторной работы № 1.

Измерение ООСС, КОСС, $K_{c.c}$

1. По данным, приведенным в табл. 2, 3 и результатам измерений, рассчитать γ , ООСС, КОСС, $K_{c.c}$ операционных усилителей DA и $DA2$ (синфазный сигнал $U_{\text{сф}} = 5 \text{ В}$ с частотой 20 ... 30 Гц).

2. Рассчитать ООСС, КОСС, $K_{с.с}$ для ОУ DA2 при напряжении $U_{сф} = 3В$ с частотой 20 ... 30 Гц. Приведите данные измерения $U_{вых.син}$ на частоте 2000 Гц.

3.4. Методические указания по оформлению отчета

1. Отчет должен содержать результаты измерений, расчетов, графики характеристик и схемы эксперимента.
2. Амплитудные характеристики разных ОУ строят в одной координатной системе.
3. Расчеты должны сопровождаться пояснениями.
4. Анализ (выводы) проделанной работы предполагает сравнение измеренных или рассчитанных значений параметров и справочных (паспортных); оценку (выше, ниже, в пределах допустимого); умение пользоваться теоретическими материалами лабораторной работы.

3.5. Контрольные вопросы

1. Изобразите схему эксперимента по определению K_u операционного усилителя. Опишите принцип действия.
2. Объясните, почему частота входного сигнала при выполнении эксперимента выбирается невысокой? Как изменится значение K_u , если частота будет на один-два порядка выше?
3. Какие сигналы, действующие на входах ОУ, называют дифференциальным, синфазным, реальным?
4. Как определяются коэффициенты усиления дифференциального сигнала, передачи синфазного сигнала, ООСС, КОСС? Каков порядок K_u , ООСС, КОСС, $K_{с.с}$?
5. Приведите пример расчета выходного сигнала, сигнала ошибки в неинвертирующем усилителе. В расчетах используйте данные одного из ОУ стенда, на котором выполнялась работа.
6. Приведите вывод формул для расчета составляющих выходного напряжения дифференциального усилителя.
7. Приведите пример расчета $U_{вых}$, $U_{вых.диф}$ и $U_{вых.син}$ дифференциального усилителя. В примере используйте данные ОУ DA2 стенда, на котором выполнялась работа. Оцените относительную погрешность измерения.
8. Приведите пример расчета согласно п. 7. В примере использовать данные ОУ DA.

Лабораторная работа № 4

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Цель работы. Ознакомиться с частотными характеристиками ОУ и основных схем включения ОУ.

4.1. Краткие теоретические сведения

Напомним, что частотные характеристики представляют собой зависимости коэффициента усиления и фазового сдвига между $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ от частоты. По ЧХ оценивают частотные свойства ОУ и схем усиления, построенных на их основе. Проведем анализ частотных характеристик. Для определенности условимся о следующем:

- а) рассматривается неинвертирующая схема включения (см. рис. 11);
- б) используется ОУ с полной внутренней коррекцией.

На низких частотах коэффициенты усиления ОУ и схемы определяются выражениями

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}}/U, K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = K_u/(1 + \gamma K_u) \approx 1 + R_2/R_1.$$

С ростом частоты появляются фазовые сдвиги между сигналами на выходе и входах ОУ и схемы. Коэффициенты усиления становятся комплексными величинами, поэтому их называют комплексными частотными характеристиками.

Комплексные частотные характеристики собственно ОУ и прямой схемы включения на основании известных формул записывается в виде:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{K_u}{1 + j\omega T_{\text{ОУ}}}, \quad K(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{K_u(j\omega)}{1 + \gamma K_u(j\omega)},$$

где $T_{\text{О.У}}$ – постоянная времени операционного усилителя.

Подставляя первое выражение во второе, найдем

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{K_u}{(1 + \gamma K_u) + j\omega T_{\text{О.У}}} = \frac{K_u/(1 + \gamma K_u)}{1 + j\omega T_{\text{О.У}}/(1 + \gamma K_u)}.$$

Введем обозначения:

$$\frac{K_u}{1 + \gamma K_u} = K, \quad \frac{T_{o,y}}{1 + \gamma K_u} = T_{1.o.c}, \quad \omega_{1.o.c} = \omega_{o,y} (1 + \gamma K_u). \quad (16)$$

Здесь K – коэффициент усиления схемы с отрицательной обратной связью на низких частотах; $T_{1.o.c}$ – постоянная времени схемы с ОС; $\omega_{1.o.c} = 1/T_{1.o.c} = \omega_{o,y}(1 + \gamma K_u)$ – частота среза схемы с ОС; $\omega_{o,y} = 1/T_{o,y}$ – частота среза ОУ без обратной связи.

Теперь, с учетом обозначений комплексная форма записи коэффициента усиления неинвертирующего усилителя принимает вид

$$K(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T_{1.o.c}} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (17a)$$

где

$$K(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T_{1.o.c})^2}}; \quad \varphi(\omega) = -\arctg \omega T_{1.o.c}. \quad (17b)$$

Величина $\omega_{1.o.c}$ определяет и частоту среза, и верхнюю границу полосы пропускания схемы, построенной на ОУ. Полоса пропускания схемы $\omega_{1.o.c} = \omega_{o,y}(1 + \gamma K_u)$, т.е. больше, чем у операционного усилителя.

Задача. По известным исходным данным рассчитать параметры K , $T_{1.o.c}$, $\omega_{1.o.c}$; построить логарифмические характеристики неинвертирующего усилителя в одних координатах с ЛАЧХ и ЛФЧХ ОУ.

Исходные данные: $K_u = 20000$; $T_{o,y} = 0,01\text{с}$; $\omega_{o,y} = 100 \text{ с}^{-1}$; $R_2 = 100 \text{ кОм}$; $R_1 = 2 \text{ кОм}$.

Решение:

1. Коэффициент обратной связи

$$\gamma = R_1 / (R_1 + R_2) = 2 / (2 + 100) = 0,0196078 \approx 0,0196.$$

2. Коэффициент усиления в области низких частот

$$K = 1/\gamma = 1 + R_2/R_1 = 1 + 100/2 = 51.$$

3. Постоянная времени в области высоких частот

$$T_{1.o.c} = T_{o,y} / (1 + \gamma K_u) = 10^{-2} / (1 + 0,0196 \cdot 20000) = 2,5435 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

4. Верхняя граница полосы пропускания (частота среза усилителя с обратной связью)

$$\omega_{1.o.c} = 1/T_{1.o.c} = 1/2,5435 \cdot 10^{-5} = 39316 \text{ с}^{-1} \approx 3,93 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Логарифмические характеристики, построенные по формулам (176) с использованием рассчитанных значений K , $T_{1.0.c}$ и $\omega_{1.0.c}$, приведены на рис. 21.

$$20\lg K(\omega) = 20\lg 51 - 20\lg \sqrt{1 + (\omega \cdot 2,54 \cdot 10^{-5})^2},$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega / 3,93 \cdot 10^4).$$

До частоты $\omega_{1.0.c} = 3,93 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ЛАЧХ представляет собой прямую, проведенную на уровне $20\lg 51 = 34 \text{ дБ}$ параллельно оси абсцисс.

На частотах $\omega > \omega_{1.0.c}$ ЛАЧХ – прямая с наклоном -20 дБ/дек. к оси абсцисс. На этом участке ЛАЧХ схемы и ОУ практически совпадают. Так и должно быть, поскольку коэффициент усиления схемы с обратной связью, собранной на ОУ, не может быть больше коэффициента усиления ОУ на любой частоте.

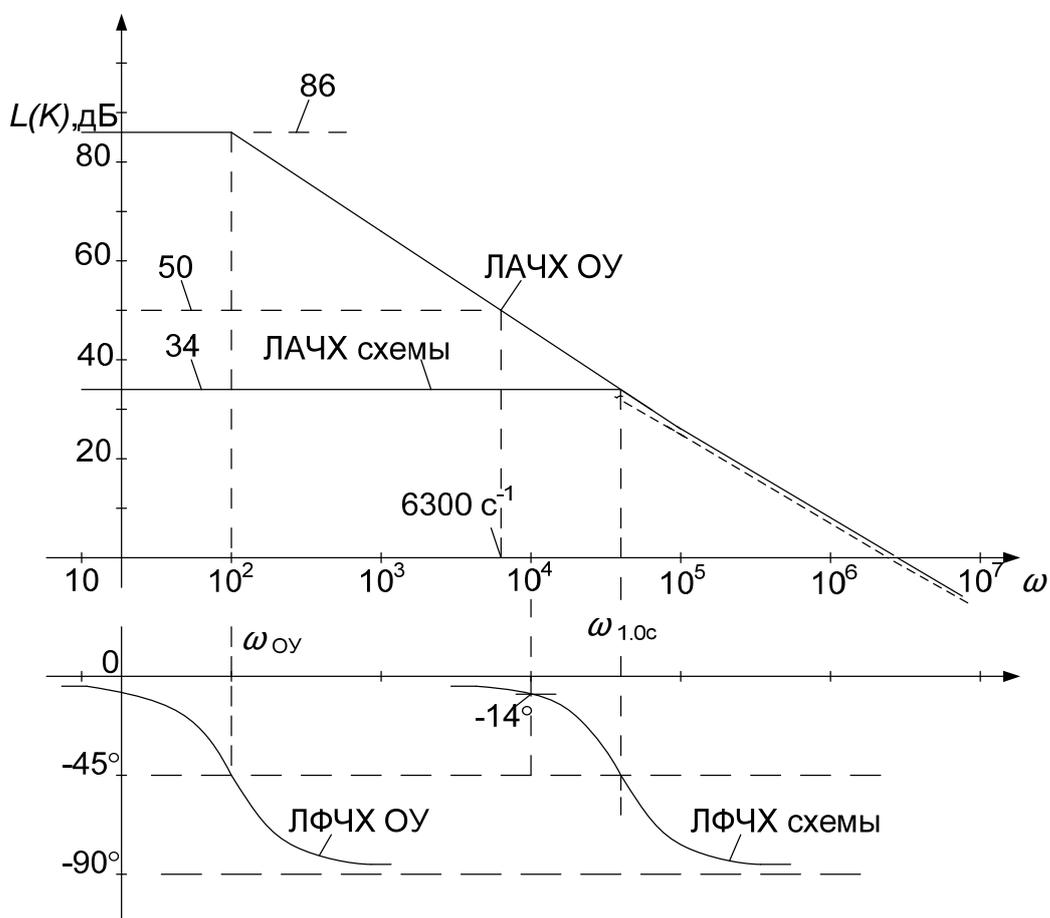


Рис. 21

Как следует из формул, расчетов и характеристик, коэффициент усиления схемы меньше K_u в $(1 + \gamma K_u)$ раз, а полоса пропускания $\omega_{1.0.c}$ во столько же раз больше. Таким образом, произведение коэффици-

ента усиления на полосу пропускания для собственно ОУ и схемы – величина постоянная:

$$K \omega_{1.0.c} = K_u \omega_{0.y} = \text{const.} \quad (18)$$

В электронной технике для комплексной оценки усилительных и частотных свойств ОУ используется показатель ПУЧ – произведение усиления на частоту. В качестве примера использования ПУЧ рассчитаем максимально возможный коэффициент усиления схемы (см. рис. 21), если верхняя граница полосы пропускания $\omega_{1.0.c}$ должна быть равна 6300 с^{-1} . Из (18) находим

$$K = K_u(\omega_{0.y} / \omega_{1.0.c}) = 20000 \cdot (100 / 6300) = 317 = 50 \text{ дБ.}$$

Тот же результат можно получить с помощью ЛАЧХ. Для этого достаточно провести вертикаль к оси абсцисс на частоте $\omega_{1.0.c} = 6300 \text{ с}^{-1}$ до пересечения с ЛАЧХ, как сделано на рис. 21. Точка пересечения будет располагаться на уровне 50 дБ, что соответствует $K = 317$.

Если задаваться коэффициентом усиления K , то, действуя в обратном, порядке, по ЛАЧХ ОУ нетрудно найти полосу пропускания схемы. Важно запомнить, что правило постоянства ПУЧ справедливо только для ОУ, имеющих полностью скорректированные частотные характеристики.

ЛФЧХ схемы по форме не отличается от ЛФЧХ ОУ, но сдвинута относительно последней в область высоких частот. Это значит, что отрицательная ОС уменьшает фазовые сдвиги. В частности, на частоте $\omega = 10^4 \text{ с}^{-1}$ фазовый сдвиг, вносимый собственно ОУ, равен -90° , тогда как фазовый сдвиг схемы -14° на той же частоте.

Выражения частотных характеристик инвертирующего усилителя (см. рис. 12) в целом мало отличаются от аналогичных выражений для прямой схемы. Чтобы убедиться в этом, повторим выкладки.

На низких частотах коэффициенты усиления ОУ и инвертирующего усилителя записываются в следующем виде:

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U, \quad K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = -\mu K_u / (1 + \gamma K_u) \approx -R_2 / R_1.$$

С ростом частоты K_u и K становятся комплексными величинами:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{K_u}{1 + j\omega T_{o,y}}, \quad K(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{-\mu K_u(j\omega)}{1 + \gamma K_u(j\omega)}.$$

Подставляя первую формулу во вторую, найдем

$$K(j\omega) = \frac{-\mu K_u}{(1 + j\omega T_{o,y})(1 + \frac{\gamma K_u}{1 + j\omega T_{o,y}})} = \frac{-\mu K_u / (1 + \gamma K_u)}{1 + j\omega T_{o,y} / (1 + \gamma K_u)} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)}.$$

Введем обозначения:

$$\frac{\mu K_u}{1 + \gamma K_u} = K, \quad \frac{T_{o,y}}{1 + \gamma K_u} = T_{1.o,y}, \quad \omega_{1.o,c} = \omega_{o,y}(1 + \gamma K_u). \quad (20)$$

Здесь K – коэффициент усиления схемы с отрицательной ОС на низких частотах; $T_{1.o,c}$ – постоянная времени схемы с ОС; $\omega_{1.o,c} = 1/T_{o,c} = \omega_{o,y}(1 + \gamma K_u)$ – частота среза схемы с ОС.

С учетом обозначений комплексная форма записи коэффициента усиления инвертирующего усилителя принимает вид

$$K(j\omega) = \frac{-K}{1 + j\omega T_{1.o,c}} = -K(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где

$$K(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T_{1.o,c})^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg \omega T_{1.o,c}.$$

Выражения для построения частотных характеристик у обеих схем включения совпадают и не должны вызывать затруднений.

Произведение усиления на частоту ПУЧ у инвертирующей схемы

$$\frac{\mu K_u}{1 + \gamma K_u} \omega_{o,y} (1 + \gamma K_u) = K \omega_{1.o,c} = \mu K_u \omega_{o,c}$$

несколько отличается от аналогичного выражения для прямой схемы. Однако значения коэффициентов прямой передачи μ в схемах усилителей весьма близки к 1, поэтому можно считать, что правило постоянства ПУЧ приближенно соблюдается

$$K \omega_{1.o,c} = \mu K_u \omega_{o,y} \approx K_u \omega_{o,y} = \text{const.}$$

Итак, ЛАЧХ усилителей, изображенных на рис. 11 и 12, построить нетрудно, если эти характеристики не выходят за пределы, огра-

ниченные контуром ЛАЧХ ОУ. Достаточно, вычислив коэффициент усиления схемы на частоте, близкой к нулю, и выразив его в децибелах, провести в координатах $L(K)$, ω прямую линию, параллельную оси частот на уровне K дБ. Сложнее определиться с полосой пропускания усилителя. Нижняя граница полосы известна ($\omega_n = 0$). Верхняя же граница может быть определена по точке пересечения с ЛАЧХ ОУ. Но для того чтобы построить ЛАЧХ ОУ, надо знать коэффициент усиления K_u и постоянную времени ОУ $T_{o,y}$ (а значит $\omega_{o,y} = 1/T_{o,y}$).

Снять непосредственно частотные характеристики ОУ затруднительно. Коэффициент усиления ОУ настолько велик, что полезный испытательный сигнал, с помощью которого проводится исследование, пришлось бы уменьшить до долей милливольт. При этом уровень помехи может оказаться (и оказывается) соизмеримым или больше полезного сигнала. Выходной сигнал ОУ получается сильно искаженным, достоверность результатов измерений падает. Поэтому приходится искусственно снижать коэффициент усиления, вводя в схему с ОУ отрицательную обратную связь, и путем косвенных измерений и расчетов получать необходимые данные для оценки частотных характеристик ОУ.

4.2. Рабочее задание

Для выполнения работы потребуются приборы и оборудование: вольтметр, например В7-38 или В3-38; звуковой генератор, в качестве источника сигнала синусоидальной формы; осциллограф; блок питания стенда с напряжением ± 15 В; перемычки, штекеры и соединительные проводники для набора исследуемой схемы, подключения ЗГ и вольтметра.

1. Подключите вольтметр, осциллограф, ЗГ и БП к питающей сети 220 В, 50 Гц. Включите осциллограф и ЗГ. Подключите шнур питания стенда к клеммам ± 15 В БП, соблюдая полярность: красный провод шнура – к клемме «+», синий провод – к клемме «-», черный провод – к средней точке (общая шина).

Подключите вольтметр к выходным клеммам ЗГ и регулировкой выхода ЗГ установите напряжение не более 50 мВ; установите частоту

ту выходного напряжения в пределах 20 ... 30 Гц. На рис. 22 приведены схемы эксперимента.

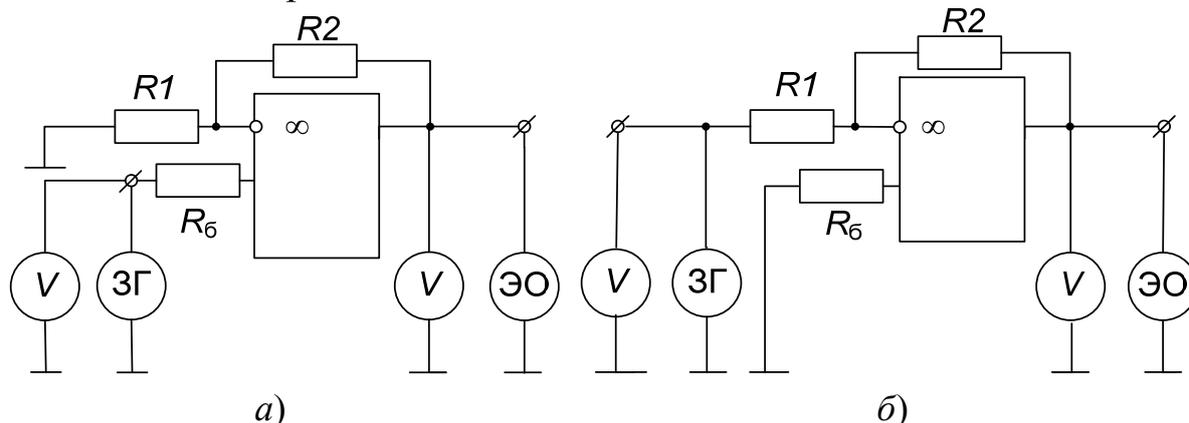


Рис. 21

2. Соберите схему эксперимента с неинвертирующим усилителем на ОУ *DA* (рис. 22, *а*). Для этого надо выполнить следующие операции: соедините перемычками гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13; 5 и 2; вставьте штекеры в гнезда 2, 6 и 13.

Соедините проводниками выход 3Г и входные гнезда усилителя 6 и 2. Подключите вольтметр и осциллограф к выходным гнездам усилителя 13 и 2. Вольтметр необходим для контроля уровня $U_{\text{вых}}$, а осциллограф для контроля формы (форма $U_{\text{вых}}$ должна быть синусоидальной).

Переведите выключатель *S* на передней панели БП в верхнее положение. На стенд поданы напряжения питания ± 15 В. Схема готова к измерениям.

3. Регулировкой выхода 3Г установите входной сигнал таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 1 В. Переключите вольтметр на вход усилителя, измерьте и запишите $U_{\text{вх}}$, при котором $U_{\text{вых}} = 1$ В.

Увеличивая частоту входного сигнала при сохранении его уровня, необходимо измерять $U_{\text{вых}}$ (всего не менее пяти измерений). Особенно важно зафиксировать то значение частоты, при котором $U_{\text{вых}}$ снизится до уровня 0,707 В. Это и будет частота среза $\omega_{\text{ср}} = \omega_{\text{л.с}}$, или верхняя граница полосы пропускания $\omega_{\text{в}}$ усилителя, собранного на ОУ.

Следует учесть, что частотная шкала 3Г градуируется в герцах f (Гц), поэтому при построении частотных характеристик потребует-

ся пересчет f в значения круговой частоты $\omega = 2\pi f$. Результаты измерений заносятся в табл. 7.

По окончании измерений уменьшить входной сигнал до нуля; выключите напряжения питания стенда 15 В (выключатель S на передней панели БП перевести в нижнее положение).

Таблица 7

$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$U_{\text{вых.макс}} = 1$					0,707
$f, \text{Гц}$	$f_{\text{мин}} =$					$f_{\text{loc}} = f_{\text{в}} =$
$\omega, \text{с}^{-1}$	$\omega_{\text{мин}} =$					$\omega_{\text{loc}} = \omega_{\text{в}} =$
$K(\omega)$	$K_{\text{макс}} =$					$0,707 \cdot K_{\text{макс}} =$

4. Изменить коэффициент усиления схемы. Для этого под наблюдением преподавателя, ведущего занятие, установите резистор $R2$ с другим сопротивлением. Например, было сопротивление $R2 = 100 \text{ кОм}$; новое значение $R2 = 1 \text{ МОм}$.

Включите напряжения питания стенда $\pm 15 \text{ В}$. Установите частоту выходного сигнала ЗГ 20 ... 30 Гц. Регулировкой выхода ЗГ установите входной сигнал таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 1 В. Переключите вольтметр на вход усилителя, измерьте и запишите $U_{\text{вх}}$, при котором $U_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$. Повторите измерения согласно п. 3.

По окончании измерений уменьшите входной сигнал до нуля; выключите напряжения питания стенда $\pm 15 \text{ В}$.

5. Если необходимо получить данные о частотных характеристиках ОУ $DA2$ и неинвертирующего усилителя, построенного на его основе, то достаточно выполнить следующие операции.

Снимите перемычки, соединяющие гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13. Поставьте новые перемычки, соединяющие гнезда 7 и 14; 8 и 15; 13 и 16. Схема собрана. Измерения проводятся согласно пп. 3, 4.

По окончании работы уменьшите $U_{\text{вх}}$ до нуля, выключите напряжения питания стенда $\pm 15 \text{ В}$, ЗГ и осциллограф. Отключите приборы и БП от сети 220 В, 50 Гц. Снимите перемычки, соединяющие проводники и штекеры. Приведите рабочее место в порядок.

6. Соберите схему эксперимента с инвертирующим усилителем на ОУ DA (рис. 22, б). Предварительно выполнить п. 1 настоящего рабочего задания.

Соедините перемычками гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13; 6 и 2. Подключите вольтметр и осциллограф к выходным гнездам усилителя 13 и 2. Переведите выключатель S на передней панели БП в верхнее положение. На стенд поданы напряжения питания ± 15 В. Схема готова к измерениям.

7. Регулировкой выхода ЗГ установите входной сигнал таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 1 В. Переключите вольтметр на вход усилителя, измерьте и запишите $U_{\text{вх}}$, при котором $U_{\text{вых}} = 1$ В.

Увеличивая частоту входного сигнала при сохранении его уровня, необходимо измерять $U_{\text{вых}}$ (всего не менее пяти измерений). Особенно важно зафиксировать то значение частоты, при котором $U_{\text{вых}}$ снизится до уровня 0,707 В. Это и будет частота среза $\omega_{\text{ср}} = \omega_{10.с}$, или верхняя граница полосы пропускания $\omega_{\text{в}}$ усилителя, собранного на ОУ.

Следует учесть, что частотная шкала ЗГ градуируется герцах, поэтому при построении частотных характеристик потребуются пересчет f в значения круговой частоты $\omega = 2\pi f$. Результаты измерений заносятся в табл. 8.

Таблица 8

$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$U_{\text{вых.макс}} = 1$					0,707
$f, \text{Гц}$	$f_{\text{мин}} =$					$f_{10с} = f_{\text{в}} =$
$\omega, \text{с}^{-1}$	$\omega_{\text{мин}} =$					$\omega_{10с} = \omega_{\text{в}} =$
$K(\omega)$	$K_{\text{макс}} =$					$0,707 \cdot K_{\text{макс}} =$

8. Измерение коэффициента усиления схемы. Для этого под наблюдением преподавателя, ведущего занятие, установите резистор $R2$ с другим сопротивлением. Например, было сопротивление $R2 = 100$ кОм; новое значение $R2 = 1$ МОм.

Включите напряжения питания стенда ± 15 В. Установите частоту выходного сигнала ЗГ 20 ... 30 Гц. Регулировкой выхода ЗГ установите входной сигнал таким, чтобы $U_{\text{вых}}$ было равно 1 В. Переключите вольтметр на вход усилителя, измерьте и запишите $U_{\text{вх}}$, при котором $U_{\text{вых}} = 1$ В. Повторите измерения согласно п. 7.

По окончании измерений уменьшите входной сигнал до нуля, выключите напряжение питания стенда ± 15 В.

9. Если необходимо получить данные о частотных характеристиках ОУ DA2 и инвертирующего усилителя, построенного на его основе, то достаточно выполнить следующие операции.

Снимите перемычки, соединяющие гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13. Поставьте новые перемычки, соединяющие гнезда 7 и 14; 8 и 15; 13 и 16. Схема собрана. Измерения проводят согласно пп. 7, 8.

По окончании работы уменьшите $U_{\text{вх}}$ до нуля, выключите напряжения питания стенда ± 15 В, ЗГ, осциллограф. Отключите приборы и БП от сети 220 В, 50 Гц. Снимите перемычки, соединительные проводники и штекеры. Приведите рабочее место в порядок.

4.3 Расчетное задание. Порядок оформления отчета

1. По результатам измерений необходимо построить графики АЧХ исследованной схемы при двух значениях $K = K_{\text{макс}}$.

Значения $K(\omega)$ на графике откладываются по оси ординат в абсолютных единицах, частота – по оси абсцисс в логарифмическом масштабе.

Цены делений по осям при построении графиков: по оси ординат – 10 единиц $K(\omega)$ в 1 см; по оси абсцисс – на одну декаду 5 см.

На графике обязательно должны быть указаны точки с координатами $0,707K_{\text{макс}}$ и $\omega_{1.0.c}$. Характеристики строят на миллиметровой бумаге формата А4.

2. Для ОУ с полной внутренней коррекцией справедлива формула постоянства ПУЧ (18):

$$\omega_{1.0.c}K = \omega_{0.y}(1 + \gamma K_u) \frac{K_u}{1 + \gamma K_u} = \omega_{0.y}K_u.$$

Зная $\omega_{1.0.c}$, K_u , γ , K , можно рассчитать $\omega_{0.y}$ и $T_{0.y} = 1 / \omega_{0.y}$. Из (18) находим

$$\omega_{0.y} = \frac{\omega_{1.0.c}K}{K_u} = \frac{\omega_{1.0.c}}{1 + \gamma K_u}.$$

Следует рассчитать $\omega_{0.y}$ (и $T_{0.y}$) для двух значений K исследованной схемы усилителя. В расчетах принять $K = K_{\text{макс}}$.

3. Построить ЛАЧХ ОУ и ЛАЧХ исследованной схемы усилителя (для двух значений K) в одной координатной системе. На графике по оси частот отметить значения $\omega_{0.y}$, $\omega'_{1.0.c}$, $\omega''_{1.0.c}$, а также ω_T – частоту единичного усиления. Значение K_U известно из лабораторной работы № 3.

График строится в координатах $K_{дБ}$, ω ; по оси ординат откладывается коэффициент усиления в децибелах; по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе.

Цены делений по осям при построении графиков: по оси ординат – 10 дБ в 1 см; по оси абсцисс – 5 см на одну декаду. Одна из декад должна быть разбита в логарифмическом масштабе. Характеристики строят на миллиметровой бумаге формата А4.

4.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
 2. Схемы прямого и инвертирующего усилителей, схемы эксперимента.
 3. Таблицы, расчеты, графики характеристик.
 4. Анализ результатов проделанной работы.
- Отчет выполняется каждым участником работы.

4.5. Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схемы прямого и инвертирующего усилителей и схемы эксперимента. Расскажите, как проводился эксперимент?
2. Приведите формулу АЧХ, $K(\omega)$; постройте характеристику для пяти значений ω .
3. Расскажите, как построить ЛАЧХ ОУ, имея значения $\omega_{0,y}$, K_u ? Как определить частоту единичного усиления ω_T ?
4. Что такое ПУЧ? Как рассчитывается ПУЧ?
5. Как соотносятся коэффициент усиления ОУ K_u и коэффициент усиления усилителя с обратной связью? Как соотносятся $T_{0,y}$ и $T_{10,c}$ (или $\omega_{0,y}$ и $\omega_{10,c}$)?
6. Выведите формулу АЧХ неинвертирующего усилителя. Поясните ход вывода.
7. Выведите формулу АЧХ инвертирующего усилителя. Поясните ход вывода.
8. Чем отличаются выражения, определяющие ПУЧ двух основных схем включения? Дайте пояснения.
9. Приведите на память значения параметров ОУ, для которого были сняты частотные характеристики K_u , K_u (дБ), $T_{0,y}$, $\omega_{0,y}$, ω_T .

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОУ

Цель работы. Ознакомиться с характеристиками дифференциальных усилителей на ОУ в схемах сравнения двух входных сигналов (напряжений) и усиления их разности.

5.1. Краткие теоретические сведения

Схема сравнения сигналов на разных входах ОУ

Схема представлена на рис. 23, а.

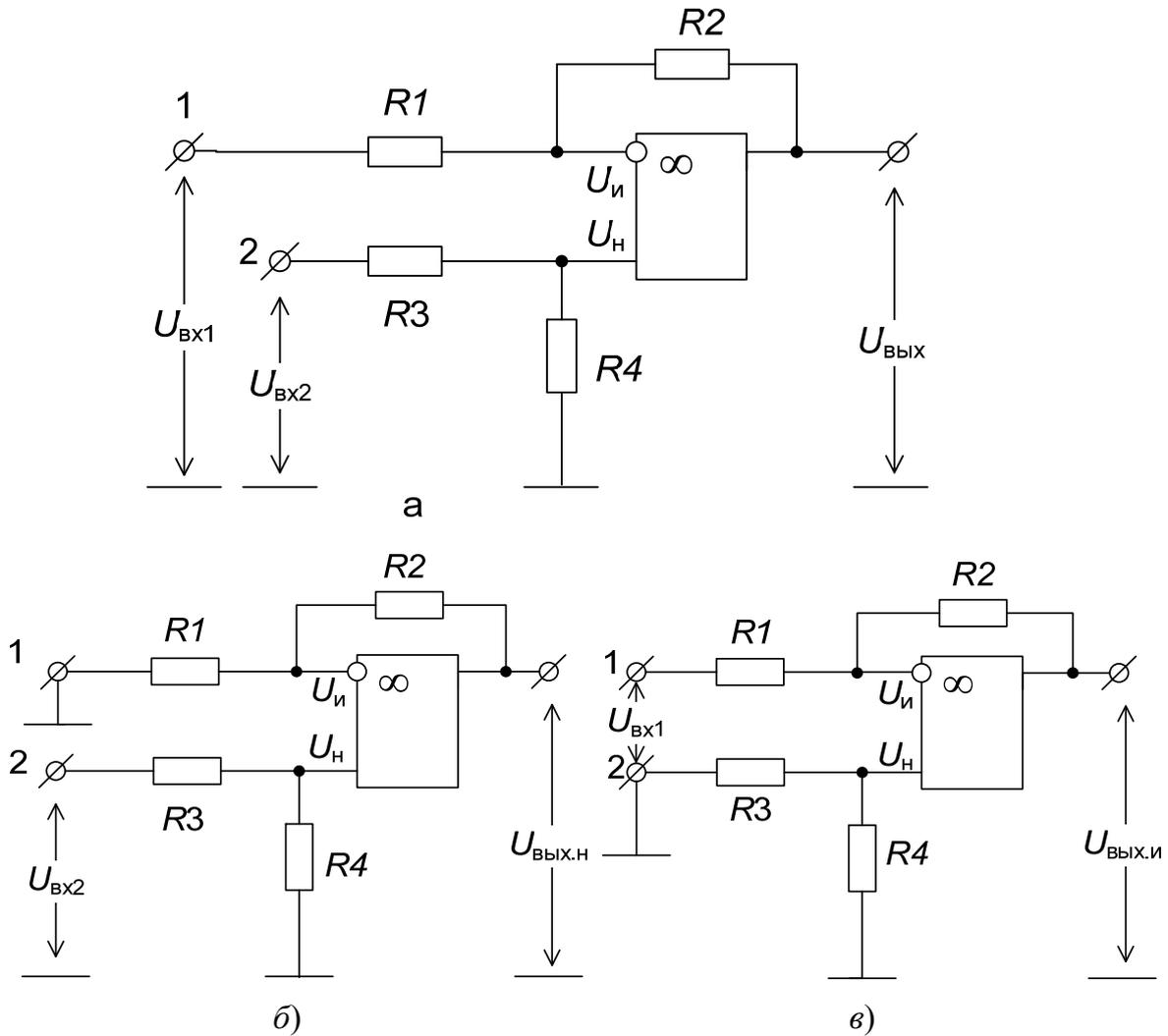


Рис. 23

Предполагается работа ОУ в линейном режиме, поэтому, используя принцип суперпозиции (наложения), будем считать, что выходной сигнал есть результат совместного действия входных сигналов по двум входам: инвертирующему и неинвертирующему. Сначала положим $U_{\text{вх.1}} = 0$ и найдем составляющую выходного напряжения $U_{\text{вых.н}}$ как реакцию на действие $U_{\text{вх.2}}$. При этом точка 1 мысленно заземляется; получаем прямую схему включения ОУ (рис. 23, б). Сигнал $U_{\text{вх.2}}$ уменьшается с помощью делителя, образованного резисторами R_3 , R_4 , и непосредственно на прямом входе действует напряжение $U_{\text{н}} = U_{\text{вх.2}} R_4 / (R_3 + R_4)$. Коэффициент усиления по прямому входу (каналу)

$$K_H = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Следовательно, составляющая выходного напряжения $U_{\text{вых.н}}$ (результат действия сигнала $U_{\text{вх.2}}$) равна

$$U_{\text{вых.н}} = U_{\text{н}} \cdot K_H = U_{\text{вх.2}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Теперь положим $U_{\text{вх.2}} = 0$ и найдем составляющую выходного напряжения $U_{\text{вых.и}}$ как реакцию схемы на действие $U_{\text{вх.1}}$. При этом точка 2 мысленно заземляется; получаем инвертирующую схему включения ОУ (см. рис. 11, в). Параллельное соединение резисторов R_3 и R_4 образует балансное сопротивление $R_6 = R_3 \parallel R_4$, которое, как и ранее, в формулах учитывать не будем. Коэффициент усиления схемы по инвертирующему каналу $K_{\text{и}} = -R_2 / R_1$, а составляющая выходного напряжения $U_{\text{вых.и}}$ (результат действия сигнала $U_{\text{вх.1}}$) равна

$$U_{\text{вых.и}} = -U_{\text{вх.1}} \frac{R_2}{R_1}.$$

Выходной сигнал дифференциального усилителя найдем как алгебраическую сумму $U_{\text{вых.н}}$ и $U_{\text{вых.и}}$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых.н}} + U_{\text{вых.и}} = U_{\text{вх.2}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{\text{вх.1}} \frac{R_2}{R_1}. \quad (21)$$

Выведена формула для $U_{\text{вых}}$ в общем виде. Рассмотрим ее варианты.

1. Если принять условие выбора резисторов $R_2/R_1 = R_4/R_3$, то получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ.2}} \frac{R_4/R_3}{1 + R_4/R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{\text{ВХ.1}} \frac{R_2}{R_1} = (U_{\text{ВХ.2}} - U_{\text{ВХ.1}}) \frac{R_2}{R_1}, \quad (22a)$$

или

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ.2}} - U_{\text{ВХ.1}})K, \quad (22б)$$

где K – коэффициент усиления схемы.

2. Если принять $R_4 = R_3$, а $R_2 = R_1$, то получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ.2}} - U_{\text{ВХ.1}}.$$

В этом случае схема преобразуется в вычитающее устройство.

Схема сравнения сигналов на одном входе ОУ

Схема, реализующая сравнение на одном входе ОУ, приведена на рис. 24.

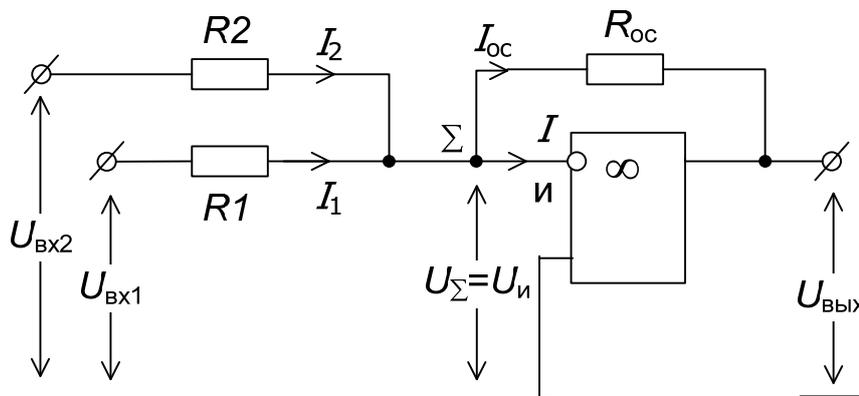


Рис. 24

По существу, это инвертирующий сумматор с двумя входами. При анализе его работы примем следующие условия: ОУ, на котором построена схема, по свойствам близок к идеальному; сопротивления $R_1 = R_2 = R$.

Для входной цепи составим уравнение согласно первому закону Кирхгоффа. В точке суммирования Σ с учетом $I \rightarrow 0$

$$I_1 + I_2 = I_{o.c} + I \approx I_{o.c}. \quad (23)$$

Далее находим каждый из токов с учетом $U_{\Sigma} = U_{и} \rightarrow 0$:

$$I_1 = \frac{U_{вх.1} - U_{и}}{R_1} \approx \frac{U_{вх.1}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{вх.2} - U_{и}}{R_2} \approx \frac{U_{вх.2}}{R_2}, \quad I_{о.с} = \frac{U_{и} - U_{вых}}{R_{о.с}} \approx \frac{-U_{вых}}{R_{о.с}}.$$

После подстановки выражений для токов в (23) получим

$$U_{вых} = -\frac{R_{о.с}}{R}(U_{вх.1} + U_{вх.2}). \quad (24)$$

Последняя формула указывает на то, что схема может выполнять ряд функций.

1. Положим, что сопротивления резисторов R и $R_{о.с}$ выбраны равными, тогда при одинаковых знаках сигналов $U_{вх.1}$ и $U_{вх.2}$ схема реализует функцию сложения, при разных знаках – вычитания, что означает сравнение без усиления разности.

2. Если сопротивления резисторов R и $R_{о.с}$ неодинаковы, то отношение $R_{о.с}/R$ определит коэффициент усиления и при разных знаках $U_{вх.1}$ и $U_{вх.2}$ схема реализует функцию сравнения сигналов и усиления разности.

Применение схем сравнения сигналов

В электронных системах стабилизации напряжения, тока, частоты вращения и т.д. схемы сравнения сигналов на разных входах применяются достаточно часто. Однако выражение (22а, 22б), простое и удобное для оценки схемы, не всегда приемлемо. Поясним примером.

На рис. 25, а приведена упрощенная схема системы стабилизации. Она состоит из регулирующего элемента (РЭ), делителя напряжения на нагрузке U_0 (резисторы R_3, R_4), источника эталонного, или опорного напряжения $U_{оп}$, схемы сравнения на ОУ DA и, наконец, схемы формирования сигнала управляющего РЭ.

Сигнал, который управляет регулирующим элементом, формируется по результату сравнения $U_{оп}$ и $U_{о.с}$. Оба напряжения подаются на входы ОУ DA . Опорное напряжение получают делением одного из напряжений питания ОУ. Типовые значения $U_{п} = \pm 5 \dots \pm 15$ В. Очевидно, $U_{оп}$ не превышает нескольких вольт. В то же время напряжение на нагрузке U_0 может быть равным и десяткам, и сотням вольт.

Поскольку сравнению подлежат только соизмеримые величины, то в делителе R_3, R_4 сопротивление резистора $R_3 \gg R_4$ и коэффициент деления (коэффициент обратной связи) $K_{o.c} = R_4 / (R_3 + R_4)$ много меньше единицы. В отличие от $K_{o.c}$ коэффициент усиления дифференциального усилителя должен быть достаточно большим, а значит $R_2 \gg R_1$. Из этих рассуждений следует, что условие $R_2/R_1 = R_4/R_3$ не выполняется.

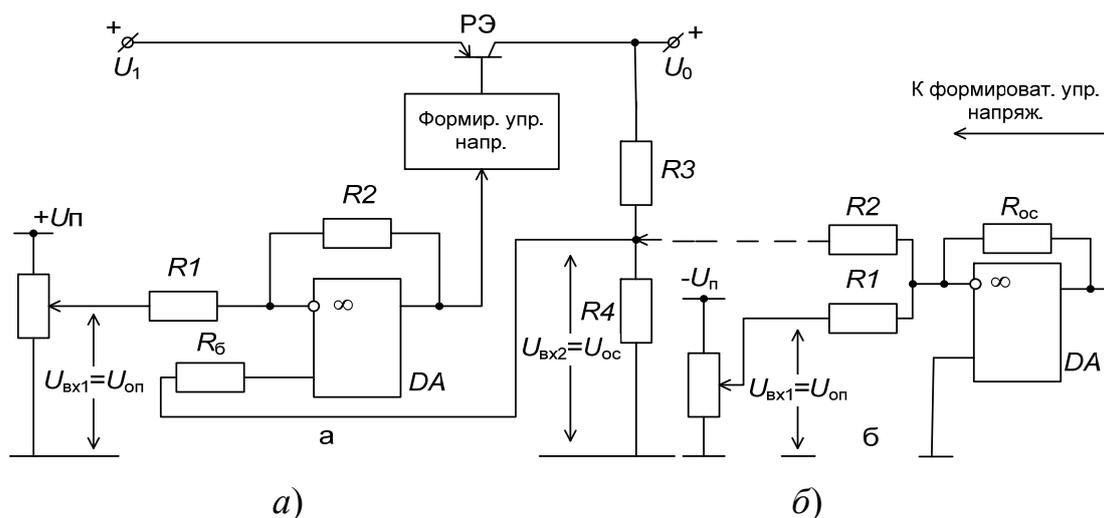


Рис. 25

Чтобы найти выражение, по которому можно было бы построить характеристику схемы сравнения, обратимся к исходной формуле (21), в которой проведем замену: $U_{вх.1} = U_{оп}$; $U_{вх.2} = U_{о.с}$; $U_{о.с} = U_o R_4 / (R_3 + R_4)$, тогда получим:

$$U_{вых} = U_{о.с} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{оп} \frac{R_2}{R_1}. \quad (25a)$$

На практике возможен вариант, когда сигнал обратной связи $U_{о.с}$ подается на инвертирующий вход DA , а опорное напряжение $U_{оп}$ – на прямой вход. В этом случае формула характеристики схемы сравнения принимает вид

$$U_{вых} = U_{оп} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{о.с} \frac{R_2}{R_1}. \quad (25б)$$

В установившемся режиме работы системы стабилизации с дифференциальным усилителем рассмотренного типа разница между $U_{оп}$ и $U_{о.с}$ несущественна. В такой схеме, по определению, действует достаточно большое синфазное напряжение $E_{с.с} = 0,5 \cdot (U_{оп} + U_{о.с})$, не-

сколько единиц вольт, поэтому в формулах (25а, 25б) для точного расчета характеристик требуется учитывать и составляющую $U_{\text{ВЫХ.СИН}}$ – ошибку измерения разности $U_{\text{оп}} - U_{\text{о.с}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{о.с}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1} + \frac{K_u}{1 + \gamma K_u} \text{ООСС} \cdot E_{\text{с.с}}, \quad (26a)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{оп}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{\text{о.с}} \frac{R_2}{R_1} + \frac{K_u}{1 + \gamma K_u} \text{ООСС} \cdot E_{\text{с.с}}. \quad (26б)$$

Схема сравнения сигналов на одном входе ОУ применяется, когда напряжения $U_{\text{оп}}$ и $U_{\text{о.с}}$ имеют разные знаки (рис. 25, б). Поскольку синфазное напряжение на входах этой схемы практически равно нулю, то и напряжение ошибки $U_{\text{ВЫХ.СИН}}$ в составе выходного сигнала отсутствует, что является достоинством.

Проведя замену обозначений в выражении (24), получим формулы характеристик схемы сравнения на одном входе: $U_{\text{ВХ.2}} = \pm U_{\text{о.с}}$; $U_{\text{ВХ.1}} = \pm U_{\text{оп}}$; $R_1 = R_2 = R$.

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{о.с}}}{R} (U_{\text{оп}} - U_{\text{о.с}}); \quad U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{о.с}}}{R} (U_{\text{о.с}} - U_{\text{оп}}). \quad (27)$$

5.2. Рабочее задание

Ознакомьтесь или прочитайте заново описание лабораторного стенда. При выполнении работы потребуются: блок питания с набором напряжений ± 15 В, вольтметр с большим входным сопротивлением, например В7-38, соединительные перемычки и проводники, штекеры с кольцевыми наконечниками.

Подключите БП и вольтметр к питающей сети 220 В, 50 Гц. Подключите шнур питания стенда к выходным клеммам БП, соблюдая полярность: красный провод шнура – к клемме «+», синий провод – к клемме «-», черный провод – к средней (общей) точке.

Схема сравнения сигналов на разных входах (рис. 26, а). Переведите переключатель S на стенде (сектор 1) в положение 2. Подготовьте схему сравнения сигналов на разных входах ОУ DA к измерениям, для этого соедините перемычками гнезда 7 и 10; 8 и 11; 12 и 13; 9 и 2; 6 и 2, 5 и 2.

Подключите вольтметр к выводам 13 и 2. Переведите выключатель S на передней панели БП в верхнее положение. Напряжения питания ± 15 В поданы на стенд.

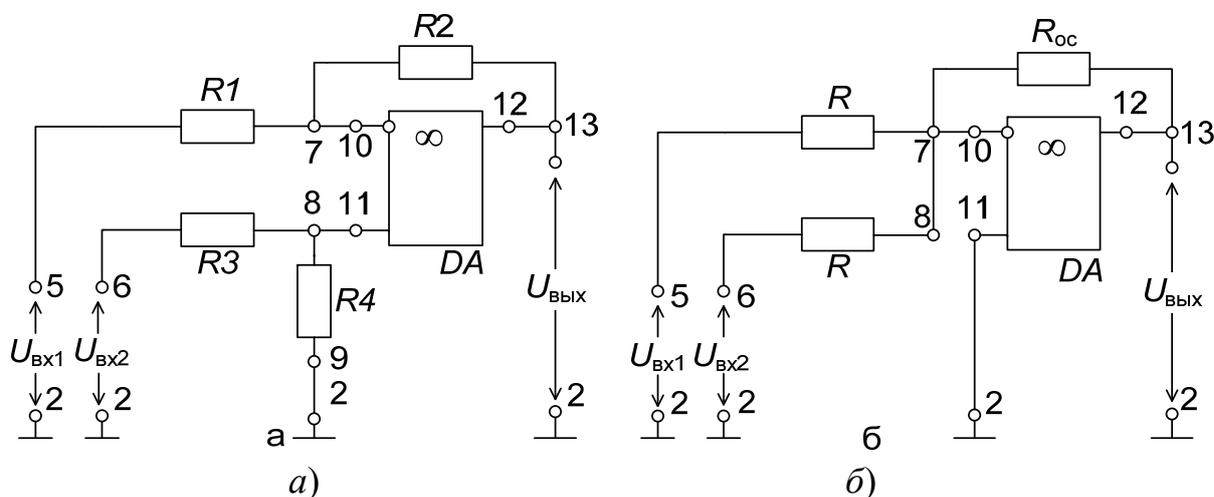


Рис. 26

Сбалансируйте схему: поворачивая движок потенциометра $R5$, добейтесь нулевого или минимально возможного уровня напряжения на выходе DA . Подключите вольтметр поочередно к гнездам 1 и 2, а затем 3 и 2. С помощью потенциометров R_{p1} и R_{p2} установите напряжения $U_{ВХ.1}$ и $U_{ВХ.2}$ равными нулю. Снимите перемычки, соединяющие гнезда 5 и 2; 6 и 2. Соедините перемычками гнезда 5 и 1; 6 и 3. Схема эксперимента собрана.

2. Положим, что $U_{ВХ.1}$ выполняет функцию опорного напряжения $U_{оп}$, а $U_{ВХ.2}$ – функцию сигнала обратной связи $U_{о.с}$.

Выставьте $U_{ВХ.1} = U_{оп} = 0,5$ В. Контролируя с помощью вольтметра $U_{ВХ.2} = U_{о.с}$ и $U_{ВЫХ}$, снимите амплитудную характеристику схемы сравнения $U_{ВЫХ} = f(U_{о.с})$ при $U_{оп} = 0,5$ В (8 ... 10 точек). Уменьшите $U_{ВХ.2} = U_{о.с}$ до нуля.

Выставьте новое значение $U_{ВХ.1} = U_{оп} = 1,0$ В. Снимите амплитудную характеристику $U_{ВЫХ} = f(U_{о.с})$ при $U_{оп} = 1,0$ В.

Выставьте $U_{оп} = 1,5$ В повторите измерения. Уменьшите $U_{ВХ.1}$ и $U_{ВХ.2}$ до нуля. Выключите напряжения питания стенда ± 15 В.

Примерный вид снятого семейства АХ изображен на рис. 27, а.

Схема сравнения сигналов на одном входе ОУ (рис. 26, б).

1. Переведите переключатель S на стенде (сектор 1) в положение 1. Подготовьте схему сравнения на одном входе к измерениям, для

этого снимите перемычки, соединяющие гнезда 9 и 2; 8 и 11; поставьте новые перемычки между гнездами 11 и 2; 7 и 8. При необходимости проведите балансировку схемы.

2. Положим, что $U_{\text{вх.2}}$ выбрано в качестве опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ (в данном случае $U_{\text{оп}}$ – отрицательное напряжение), а $U_{\text{вх.1}}$ – в качестве сигнала обратной связи – $U_{\text{о.с}}$ (здесь $U_{\text{о.с}}$ – положительное напряжение). Выставьте $U_{\text{вх.2}} = U_{\text{оп}} = -0,5$ В. Контролируя с помощью вольтметра $U_{\text{вх.1}} = U_{\text{о.с}}$ и $U_{\text{вых}}$, снимите АХ схемы сравнения $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{о.с}})$ при $U_{\text{оп}} = -0,5$ В. Повторите измерения при $U_{\text{оп}} = -1,0$ В; $-1,5$ В.

По окончании измерений уменьшите напряжения $U_{\text{вх.1}}$ и $U_{\text{вх.2}}$ до нуля.

Примерный вид семейства АХ изображен на рис. 27, б).

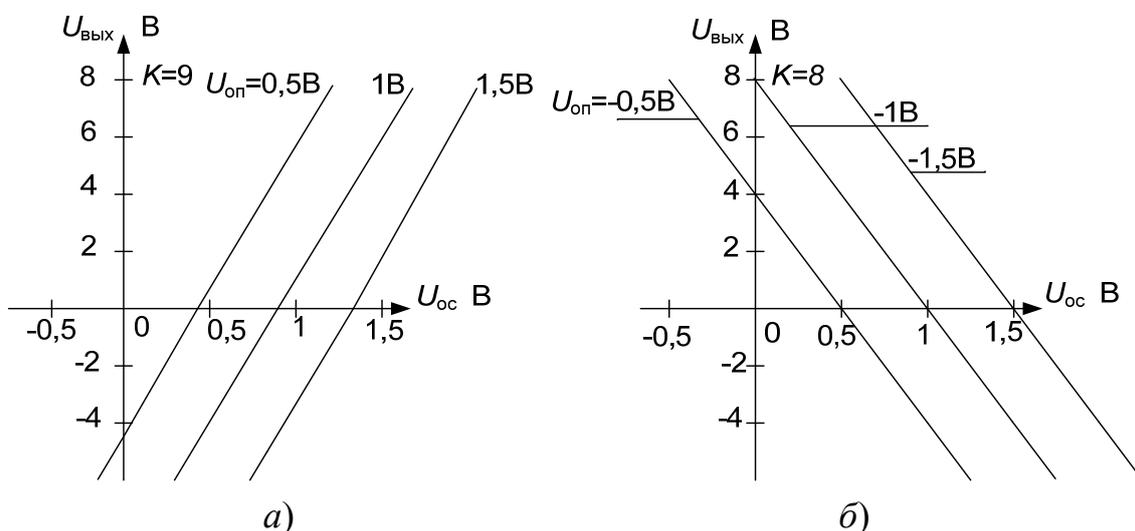


Рис. 26

3. Выберите в качестве опорного положительное напряжение $U_{\text{вх.1}}$, а в качестве сигнала – отрицательное $U_{\text{вх.2}} = U_{\text{о.с}}$.

Задаваясь значениями $U_{\text{оп}} = 0,5$ В; $1,0$ В; $1,5$ В, снимите АХ $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{о.с}})$ при $U_{\text{оп}} = \text{const}$.

4. По окончании измерений уменьшите напряжения $U_{\text{вх.1}}$ и $U_{\text{вх.2}}$ до нуля. Выключите напряжения источника питания ± 15 В. Отсоедините шнур питания стенда от клемм БП. Снимите перемычки, соединительные проводники и штекеры. Отключите БП и вольтметр от сети 220 В, 50 Гц. Приведите рабочее место в порядок.

5.3. Расчетное задание. Порядок оформления отчета

1. Проведите расчет снятых амплитудных характеристик схем сравнения по формулам (25) и (27) с учетом знаков напряжений $U_{оп}$ и $U_{о.с.}$, а также принятых $U_{оп}$.

2. Постройте рассчитанные и экспериментальные АХ в одних координатных системах: отдельно для схемы сравнения на разных входах DA и отдельно для схемы сравнения на одном входе DA . Оцените коэффициент усиления схем на рабочих участках. АХ характеристики строят на миллиметровой бумаге формата А4.

3. Для схемы сравнения сигналов на разных входах ОУ рассчитайте синфазную ошибку в составе $U_{вых}$. В расчетах используйте данные лабораторной работы № 3.

5.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
 2. Схемы эксперимента; схемы сравнения, исследуемые в работе.
 3. Расчеты, таблицы расчетных и экспериментальных данных, графики характеристик.
 4. Анализ результатов проделанной работы.
- Отчет выполняется каждым участником работы.

5.5. Контрольные вопросы

1. Изобразите схему сравнения сигналов на разных входах ОУ. Какие по знаку сигналы можно сравнивать с помощью этой схемы? Дайте объяснение.

2. Изобразите схему сравнения сигналов на одном входе ОУ. Какие по знаку сигналы можно сравнивать с помощью этой схемы? Дайте объяснение.

3. Выведите формулу АХ дифференциального усилителя, сравнивающего сигналы на разных входах ОУ.

4. Выведите формулу АХ дифференциального усилителя, сравнивающего сигналы на одном входе ОУ.

5. Как будут выглядеть АХ схемы сравнения на разных входах, если $U_{вх.1}$ и $U_{вх.2} > 0$? Объясните ход характеристик.

6. Как будут выглядеть АХ схемы сравнения на разных входах, если $U_{\text{вх.1}}$ и $U_{\text{вх.2}} < 0$?

7. Как будут выглядеть АХ схемы сравнения на одном входе, если $U_{\text{вх.1}} = U_{\text{оп}} > 0$, а $U_{\text{вх.2}} = U_{\text{о.с}} < 0$? Дайте объяснение.

8. Как будут выглядеть АХ схемы сравнения на одном входе, если $U_{\text{вх.1}} = U_{\text{оп}} < 0$, а $U_{\text{вх.2}} = U_{\text{о.с}} > 0$? Дайте объяснение.

9. Рассчитайте синфазную составляющую $U_{\text{вых}}$ для схемы сравнения на разных входах ОУ (при одном из значений $U_{\text{оп}}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы методических указаний содержат краткие теоретические сведения, которые достаточны для общей предварительной подготовки к проведению лабораторных работ.

В ходе занятия студенты знакомятся с наиболее распространенными в практике операционными усилителями, их параметрами и характеристиками. Знания и навыки, полученные студентами, будут полезны в дальнейшем при изучении и разработке схем с использованием ОУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фолкенберри, Л.* Применение операционных усилителей и линейных ИС / Л. Фолкенберри. – М. : Мир, 1985. – 572 с.

2. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : справочник / С. И. Якубовский [и др.]; под ред. С. И. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с. – ISBN 5-256-00259-7.

3. Интегральные микросхемы. Операционные усилители: справочник. В 2 т. Т. 1 / сост. А. В. Перебаскин [и др.]. – М. : Физ.-математ. лит. ВО Наука, 1993. – 238 с. – ISBN 5-02-015113-0.

4. *Волович, Г.И.* Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых устройств / Г.И. Волович. – М.: Додэка-XXI, 2007. – 528 с. – ISBN 978-5-9120-144-0.

Оглавление

Введение	3
Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ ПРЯМОГО И ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЙ ОУ	27
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ	41
Лабораторная работа № 3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ СИНФАЗНОГО СИГНАЛА	47
Лабораторная работа № 4. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	62
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОУ	73
Заключение	82
Библиографический список	82

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОСНОВЫ МИКРОСХЕМОТЕХНИКИ».
Раздел «Операционные усилители. Основы»

Составители:

ГРИБАКИН Александр Семенович

КОЧУРОВ Олег Михайлович

ГРИБАКИН Виктор Семенович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой доцент А. Б. Градусов

Подписано в печать 07.06.10.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 4,88. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета

600000, Владимир, ул. Горького, 87.