

P851

**Объявляется набор в магистратуру
в 2021г.**

По направлению:
12.04.01 Приборостроение
Направленность (профиль) программы:
(Технологии цифрового города)

**Все вопросы по почте:
ankravets@mail.ru**

Кафедра радиоприемных устройств и

телевидения

Руководство к лабораторной работе
**Исследование функциональных узлов
на операционном усилителе**
по курсу

**Схемотехника аналоговых электронных
устройств**

Для студентов радиотехнического факультета
всех форм обучения



УДК 621.375.147(07)

Кравец А.В., Шибаета Е.М. Руководство к лабораторной работе «Исследование функциональных узлов на операционном усилителе» по курсу «Схемотехника аналоговых электронных устройств». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 32 с.

В данной работе изложены краткие описания лабораторных работ и краткие сведения о новом оборудовании. Приведены домашние и лабораторные задания, методические указания по выполнению лабораторных заданий.

Соответствует программе курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств» для студентов всех форм обучения по направлению «Радиотехника».

Табл. 1. Ил. 15. Библиогр.: 8 назв.

Рецензент В.Т. Лобач, канд. техн. наук, профессор кафедры РТС ЮФУ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципов работы функциональных узлов на операционном усилителе и определение их основных параметров.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) – это электронный усилитель, предназначенный для различных операций над аналоговыми величинами в схемах с отрицательной обратной связью (ООС). Чаще под ОУ понимают усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, *большим* коэффициентом усиления K_0 , *малыми* входными токами $I_{вх}$, *большим* входным сопротивлением $R_{вх}$, *малым* выходным сопротивлением $R_{вых}$, достаточно *большой* граничной частотой усиления $f_{гр}$, *малым* смещением нуля $U_{см}$. Под *большими* и *малыми* понимаются такие величины, которые в простых расчетах можно считать соответственно бесконечными или нулевыми (идеальный ОУ).

Для идеального ОУ:

$$K_0 = \infty; I_{вх} = 0; R_{вх} = \infty; R_{вых} = 0; f_{гр} = \infty; U_{см} = 0.$$

Основное назначение операционного усилителя – построение схем с точно синтезированной передаточной функцией, которая зависит практически только от свойств цепи обратной связи (ОС). На основе ОУ создаются прецизионные масштабирующие усилители, генераторы функций, стабилизаторы напряжения и тока, активные фильтры, логарифмирующие и потенцирующие усилители, интеграторы и дифференциаторы и т.д. Можно насчитать более 100 стандартных схем включения ОУ общего применения. Упрощенная принципиальная схема ОУ приведена на рис. 1.

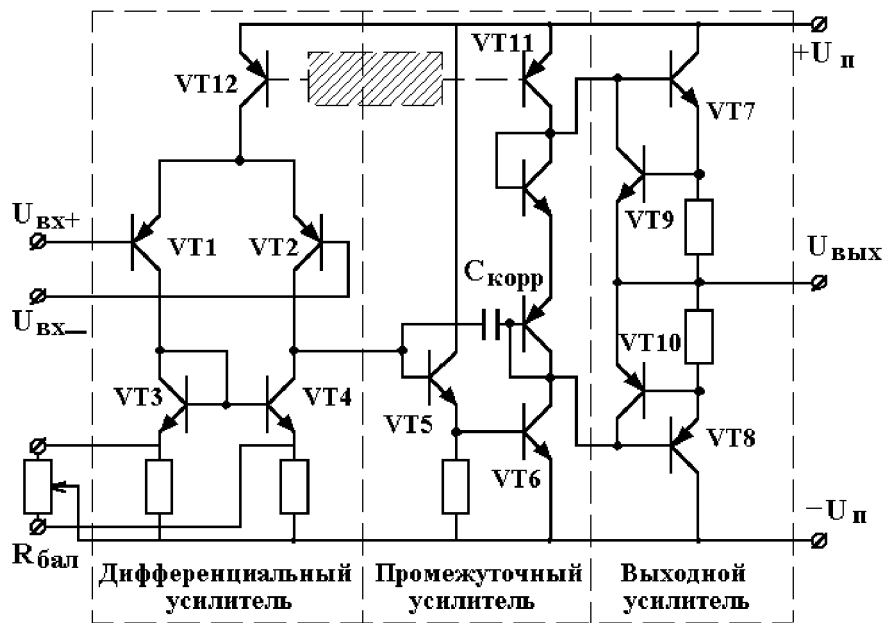


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема ОУ (часть схемы, обозначенная штриховкой, не приведена)

Независимо от сложности внутреннего устройства первый каскад состоит из дифференциального усилителя (ДУ), который определяет входные свойства ОУ. Использование полевых транзисторов на входе делает входные токи очень малыми (от 10^{-9} до 10^{-12} А). Второй каскад служит для усиления и согласования по сопротивлению входного и выходного каскадов. Оконечный (выходной) каскад служит для согласования большого выходного сопротивления усилительных каскадов с низкоомной нагрузкой, т.е. позволяет получить малое выходное сопротивление.

Операционные усилители обычно питаются от симметричных источников, обеспечивающих одинаковые по величине положительное и отрицательное напряжение $+U_{П}$, $-U_{П}$ относительно нулевого провода ("земли"). Для большинства современных ОУ напряжение питания можно менять в достаточно широких пределах от ± 3 до ± 18 В.

Выходное напряжение ОУ связано со входным дифференциальным сигналом простым выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_0(U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}}), \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент усиления без обратной связи. Величина K_0 для разных типов ОУ изменяется в диапазоне $10^3 - 10^7$.

Вследствие большого коэффициента усиления ОУ является высокочувствительным элементом, усиливающим как малые полезные сигналы, так и собственные шумы и внешние наводки. Несимметрия внутренних элементов, нестабильность параметров приводит к тому, что без отрицательной обратной связи ОУ просто непригоден для работы в линейном режиме, так как напряжение $U_{\text{вых}}$ под влиянием шумов, наводок, температурных уходов будет принимать значения, близкие к напряжению источников питания (режим насыщения выходного каскада). Основной причиной, по которой K_0 делают большим, является обеспечение высокой стабильности параметров при глубокой ООС.

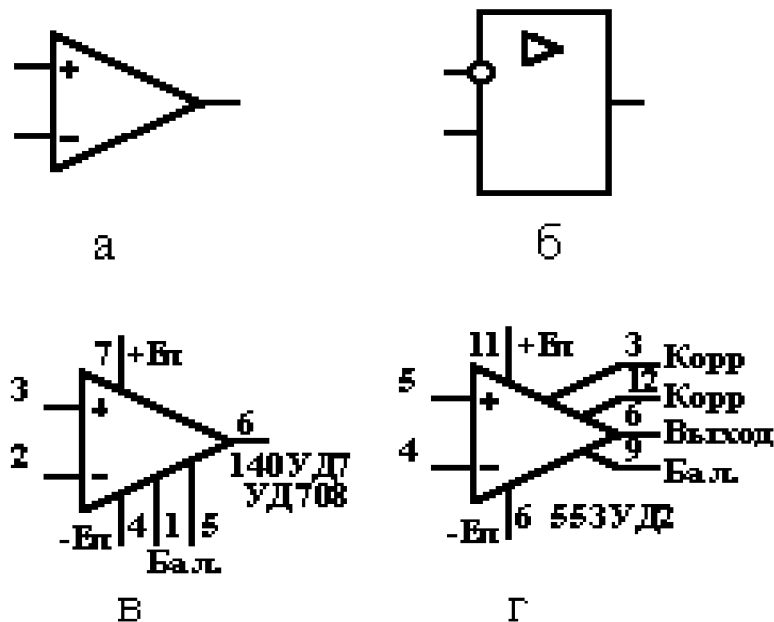


Рис.2. Примеры обозначений ОУ

Примеры схемных обозначений ОУ приведены на рис. 2. Обычно на схемах ОУ обозначается треугольником с указанием инвертирующего и неинвертирующего входа с помощью значков "-" и "+" (рис. 2,а), реже – прямоугольником с инвертирующим входом в виде кружка (рис. 2,б). Изображения, приведенные на рис. 2,а и 2,б, используются, как правило, в функциональных или упрощенных схемах, остальные – в принципиальных схемах.

2.2. Основные параметры операционных усилителей

Коэффициент усиления ОУ (K_0) равен отношению приращения выходного напряжения (тока) к вызвавшему это приращение входному сигналу (току) при отсутствии ОС.

K_0 является функцией частоты и с ее увеличением падает. Частотная и фазовая характеристики ОУ складываются из характеристик отдельных внутренних каскадов, каждый из которых имеет свою собственную постоянную времени и может быть представлен в виде RC-цепочки. Суммарная частотная характеристика ОУ аппроксимируется диаграммой Бode (рис. 3,а). Каждый каскад вносит фазовый сдвиг 90° , поэтому общий фазовый сдвиг зависит от количества каскадов и имеет вид, показанный на рис. 3,а внизу. Поскольку на выходе ОУ уже имеется сдвиг фазы 180° относительно инвертирующего входа, на который подается ООС, то на некоторой частоте суммарный сдвиг фазы достигает 360° . Если на этой частоте величина $K_0 \gamma \geq 1$, где γ – коэффициент ОС, то *отрицательная* ОС превращается в *положительную*, что приводит к самовозбуждению схемы.

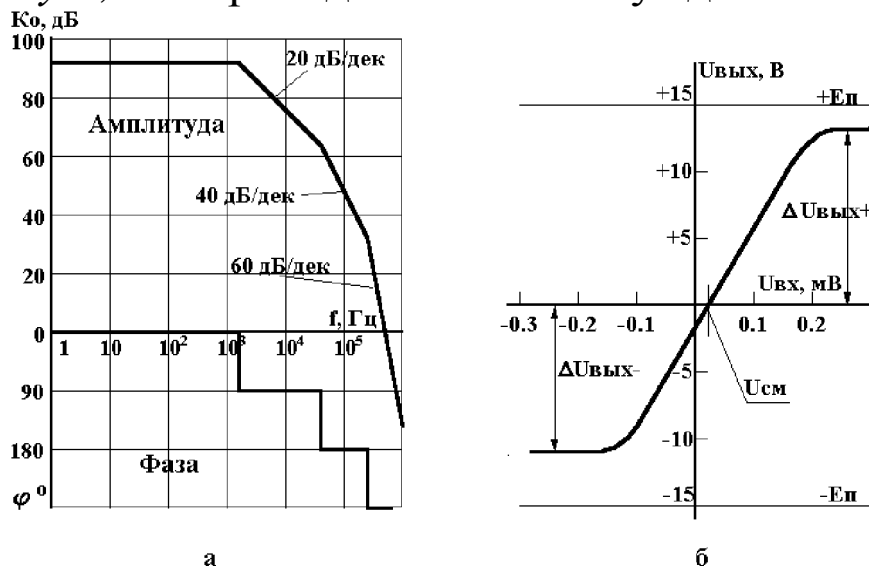


Рис. 3. Характеристики ОУ: а – аппроксимированная логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) и фазо-частотная характеристики (ФЧХ); б – статическая передаточная характеристика

Частотная коррекция предотвращает самовозбуждение схемы. Для этого вводят специальные частотно-зависимые корректирующие цепи, которые снижают коэффициент усиления на высоких частотах, приближая характеристику ОУ к звену первого порядка, как на рис. 3. Частотная коррекция может быть как внутренняя (140УД7, 544УД1), так и внешняя (553УД2, 140УД5).

Входное сопротивление ($R_{вх}$) определяется как отношение $\Delta U_{вх}/\Delta I_{вх}$ при заданной частоте сигнала. Необходимо помнить, что входное сопротивление ОУ и входное сопротивление схемы – это два разных понятия, величина их может отличаться на несколько порядков. Типовые значения $R_{вх}$ на низких частотах для ОУ с биполярными входами – 10^4 – 10^8 Ом, для ОУ с полевыми входами – 10^7 – 10^{12} Ом.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ – это внутреннее выходное сопротивление ОУ, которое можно определить как отношение $U_{хх}/I_{кз}$ (напряжение холостого хода / ток короткого замыкания), составляющее для разных ОУ величину порядка десятков – сотен Ом. Типовое значение $R_{вых}$ для ОУ широкого применения 100–1000 Ом.

Входной ток смещения ($I_{вх}$) – ток, протекающий во входную цепь ОУ, необходимый для нормальной работы входных биполярных транзисторов (для полевых – ток утечки затвора). Под $I_{вх}$ подразумевают среднее арифметическое двух токов $I_{вх+}$ и $I_{вх-}$. Для разных типов ОУ входной ток смещения изменяется в широких пределах: для биполярных входных транзисторов – 10^{-5} – 10^{-8} А, для полевых – 10^{-9} – 10^{-12} А. В справочных данных обычно приводятся сильно завышенные значения $I_{вх}$.

Разность входных токов (ток сдвига) $\Delta I_{вх} = |I_{вх+} - I_{вх-}|$ определяется при заданном значении входного напряжения. Разность $\Delta I_{вх}$ вызывает на выходе ОУ некоторое смещение (приведенное ко входу оно составляет величину 1–5 мВ и зависит от величины резисторов, подключаемых ко входам).

Напряжение смещения ($U_{см}$) определяется как разность напряжений на входах, при котором $U_{вых} = 0$ при оговоренных сопротивлениях резисторов, подключаемых ко входам. Если значения этих резисторов стремятся к нулю, то напряжение смещения называют ЭДС смещения ($E_{см}$). Для ОУ с биполярными транзисторами на входе $U_{см}$ зависит в основном от разброса напряжений $\Delta U_{эб}$ эмиттерно-базовых переходов и составляет 1–10 мВ. Для ОУ с полевыми транзисторами на входе $U_{см}$ обычно в несколько раз больше (до 30 мВ), что объясняется их меньшей крутизной. Если на оба входа ОУ, не охваченного отрицательной обратной связью, подать точно равные напряжения, например, оба входа заземлить, на выходе скорее всего будет наблюдаться уровень, близкий к одному из питающих напряжений, т.е. ОУ войдет в режим ограничения:

$$U_{вых} = U_{см} K_0 \sim 10^{-2} \cdot 10^5 = 1000 \text{ В} \gg E_{пит}.$$

Для того чтобы при подаче равного напряжения на оба входа усилителя выходное напряжение было близко к нулю, ОУ необходимо сбалансировать. Балансировка ОУ обычно достигается подачей дополнительного тока в цепь коллекторов входного ДУ с помощью переменного резистора, подключаемого к специальным выводам ($R_{бал}$ на рис. 1). Некоторые типы ОУ таких выводов не имеют и балансируются по входу (140УД5).

Средний температурный дрейф напряжения смещения ($\Delta U_{см}/\Delta T$) – максимальное изменение $U_{см}$ при изменении температуры на 1 °С в оговоренном диапазоне температур. Измеряется в мкВ/°С. Типовые значения для биполярных входов 5–20 мкВ/°С, для входов с полевыми транзисторами 20–100 мкВ/°С. Если $U_{см}$ можно скомпенсировать до нуля, то с температурным дрейфом бороться сложнее. Входной ток $I_{вх}$ и разность входных токов $\Delta I_{вх}$ тоже изменяются с температурой.

Частота единичного усиления (f_1) – это частота, на которой $|K_0(f_1)| = 1$.

Характерная зависимость коэффициента усиления от частоты приведена на рис. 3,а и 4, где ЛАХ пересекает уровень 0 дБ в точках f_1 .

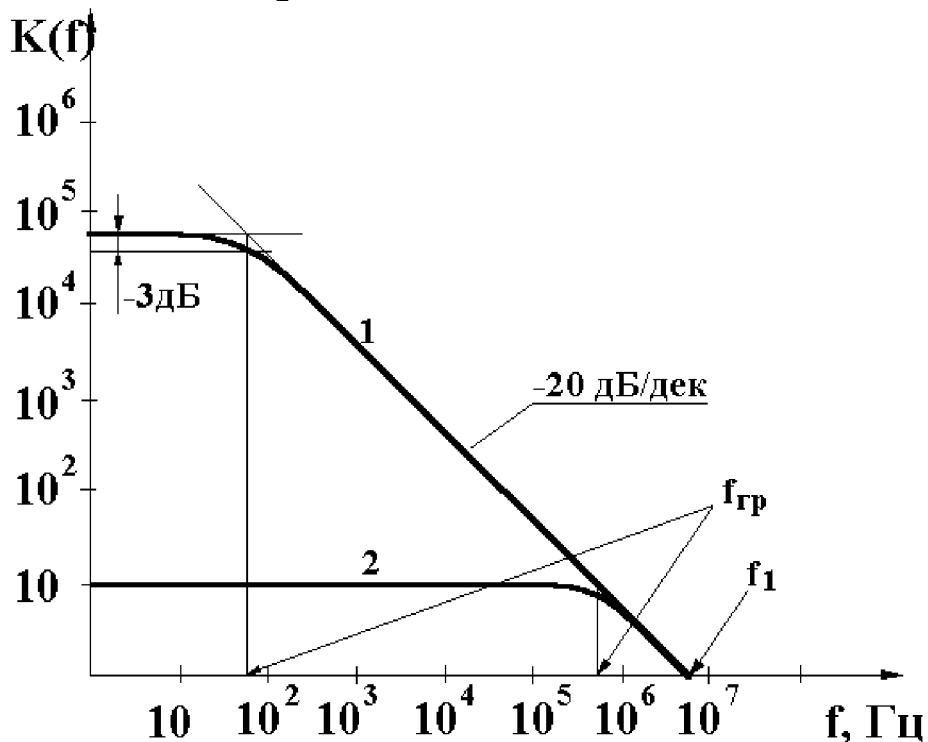


Рис.4. Аппроксимированная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ)

Граничная частота ($f_{гр}$) определяется как частота, на которой коэффициент усиления уменьшается на 3 децибела: $|K(f_{гр})| = 0,707|K(0)|$. Область частот $0 - f_{гр}$ называют полосой пропускания. Введение ООС *расширяет* полосу пропускания (график 2 на рис. 4).

Скорость нарастания выходного напряжения определяется как $dU_{вых}/dt$ при воздействии импульса большой амплитуды. Измеряется в В/мкс. Для разных ОУ меняется в пределах от $0,1$ В/мкс (прецизионные ОУ) до 100 В/мкс (быстродействующие ОУ). Этот параметр становится важным, если ОУ используется в качестве компаратора (различителя) уровней сигналов в быстродействующих схемах.

Диапазон выходного напряжения ($\Delta U_{вых}$) – это диапазон значений выходного напряжения, при котором параметры ОУ

лежат в гарантированных пределах. Зависит от напряжения питания. При несимметричном выходе верхняя и нижняя границы диапазона различны. Например, для 544УД2 $\Delta U_{\text{вых}}=10$ В при $E_{\text{п}} = \pm 15$ В (симметричный выход); для 140УД5 $\Delta U_{\text{вх}} = +6$ В / $- 4$ В при $E_{\text{п}} = \pm 12$ В (несимметричный выход).

Диапазон синфазных входных напряжений ($\Delta U_{\text{вх.сф}}$) – это такой диапазон синфазных входных напряжений, в котором параметры ОУ лежат в гарантированных пределах. Зависит от напряжения питания. Примерно на 3–5В меньше $E_{\text{п}}$.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала равен отношению синфазного входного напряжения к дифференциальному, вызывающих одно и то же $U_{\text{вых}}$. Измеряется в децибелах. Для разных ОУ изменяется в пределах от 50 дБ (140УД5А) до 120 дБ (140УД24).

Максимальный выходной ток ($I_{\text{вых.мах}}$). Для ОУ, имеющих внутреннюю защиту от короткого замыкания по выходу, это выходной ток короткого замыкания в режиме ограничения; для ОУ без защиты от КЗ – предельный выходной ток, который нельзя превышать. Для разных ОУ изменяется в диапазоне 1– 400 мА.

Существуют также другие параметры, характеризующие ток потребления, шумовые, температурные, частотные, фазовые, временные и другие свойства ОУ. В конкретных применениях любой из этих параметров может стать самым важным и определяющим выбор типа ОУ.

2.3. Схемы включения операционных усилителей

Как уже упоминалось выше, нормальная работа ОУ в линейном режиме возможна только в схемах с глубокой ООС. Для понимания работы таких схем полезно ввести понятие **виртуального, или мнимого, заземления**.

Инвертирующий усилитель.

Рассмотрим схему на рис. 5.

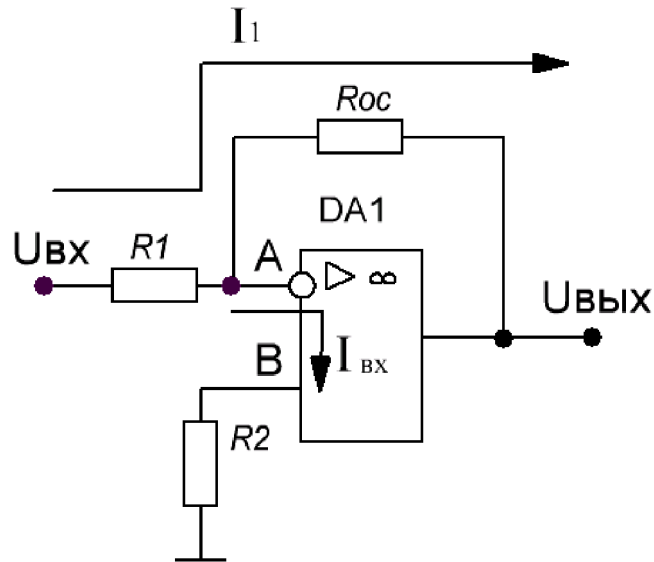


Рис. 5. Инвертирующий усилитель

Потенциал на неинвертирующем входе $U_B = 0$. Так как ОУ находится в линейном режиме, из (1) следует:

$$U_B - U_A = U_{\text{вых}}/K_0.$$

Например, при $U_{\text{вых}} \sim 5 \text{ В}$, $K_0 \sim 2 \cdot 10^5$ получаем $U_A \sim 25 \text{ мкВ}$. Такое малое напряжение (оно сравнимо с величиной термо-ЭДС при $\Delta T \sim 1^\circ\text{C}$) даже невозможно измерить обычным цифровым вольтметром. Отсюда следует, что потенциалы на входах ОУ можно с хорошей точностью считать равными. Если один из входов ОУ заземлить, на втором входе будет также поддерживаться нулевой потенциал, **хотя напрямую входы ОУ гальванически не связаны**. Этот эффект называется **виртуальным**, или **мнимым**, заземлением.

Таким образом, из $U_B = 0$ следует $U_A = 0$,

$$U_{\text{вх}} - U_A = U_{\text{вх}} \text{ (падение напряжения на } R_1\text{);}$$

$$U_{\text{вых}} - U_A = U_{\text{вых}} \text{ (падение напряжения на } R_{\text{oc}}\text{).}$$

Поскольку входной ток ОУ очень мал ($I_{\text{вх}} \ll I_1$), им можно

пренебречь, тогда получим:

$$I_1 = U_{ВХ}/R_1 = -U_{ВЫХ}/R_{OC}.$$

Это означает, что для инвертирующего усилителя

$$K_U = -\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}.$$

Для минимизации влияния токов смещения неинвертирующий вход заземляется через резистор, равный параллельному соединению всех резисторов, подключенных к инвертирующему входу ОУ.

$$R_2 = R_1 || R_{OC}.$$

Входное сопротивление этой схемы равно $R_{ВХ.OC} = R_1$, так как $U_A = 0$ (мнимое заземление).

Выходное сопротивление $R_{ВЫХ.OC} \approx 0$, так как

$$R_{ВЫХ.OC} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + K_{Uoy} \cdot \gamma} \rightarrow 0.$$

где $\gamma = \frac{R_1}{R_{OC}}$. (2)

При $R_{ВЫХ} = 200$ Ом, $K_0 = 2 \cdot 10^5$, $\gamma = 0,1$ $R_{ВЫХ.OC} = 10^{-2}$ Ом – сопротивление обычного медного провода диаметром 0,3 мм и длиной всего 5 см!

При заданной ЭДС источника сигнала E_r с внутренним сопротивлением R_r формула примет вид

$$K_U = -\frac{U_{ВЫХ}}{E_r} = -\frac{R_{OC}}{R_1 + R_r}.$$

Ток выходной цепи ОУ, протекающий через резисторы R_H и R_{OC} , включенные параллельно для приращений тока, равен:

$$I_{ВЫХ} = I_H + I_{OC} = \frac{U_{ВЫХ}}{R_H} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}}.$$

Значение выходного тока большинства типов ОУ не должно превышать нескольких миллиампер.

Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель можно получить, подавая сигнал на неинвертирующий вход, а цепь ООС – на инвертирующий, как показано на рис. 6.

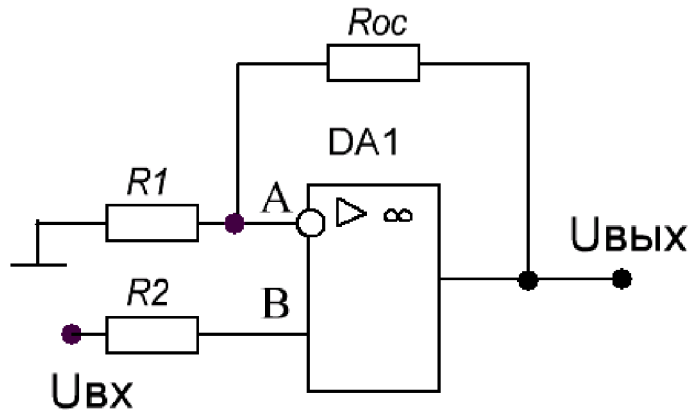


Рис. 6. Неинвертирующий усилитель

Напряжение ОС снимается с делителя:

$$U_A = U_{\text{ВЫХ}} \cdot R_1 / (R_1 + R_{\text{ОС}}).$$

Так как $U_A = U_{\text{ВХ}}$, коэффициент усиления равен

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K_{\text{УОУ}}}{1 + K_{\text{УОУ}} \cdot \gamma} \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}.$$

Входное сопротивление схемы

$$R_{\text{ВХ.ОС}} = R_{\text{ВХ}}(1 + \gamma K_U),$$

где $\gamma = \frac{R_1}{R_{\text{ОС}} + R_1}$,

как всегда при последовательной ООС входное сопротивление увеличивается.

Выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ.ОС}} \approx 0,$$

так как $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ.оу}}}{1 + K_{\text{Уоу}} \cdot \gamma} \rightarrow 0.$

Повторитель

Если в схеме на рис. 6 принять $R_1 = \infty$ и $R_{OC}=0$, то $K_{OC} = 1$ и $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$, т. е. имеем повторитель с коэффициентом передачи, равным единице (рис. 7).

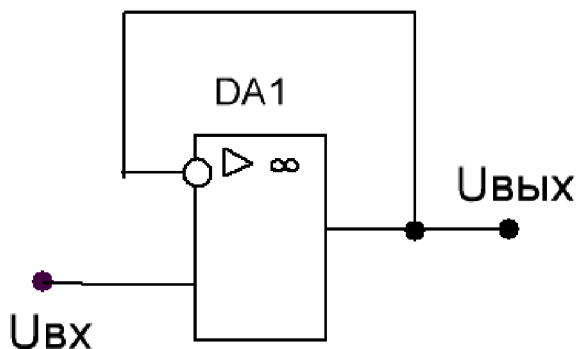


Рис.7. Схема повторителя на ОУ

Для схемы повторителя с коэффициентом усиления $K_{OC} = 1$ глубина обратной связи $F = K_{OY}$ и выражения для выходного и входного сопротивлений запишутся в виде

$$R_{вх\ повт} = R_{вх\ ОУ} (1 + K_{OY}),$$

$$R_{вых\ повт} = \frac{R_{вых\ ОУ}}{1 + K_{OY}}.$$

Входное сопротивление повторителя получается чрезвычайно высоким ($\sim 10^{12}$ Ом), однако практически столь высокие значения $R_{Вх}$ не достигаются из-за влияния шунтирующего действия утечек и синфазного входного сопротивления ОУ (сопротивления между входами ОУ и землей).

Разностный усилитель

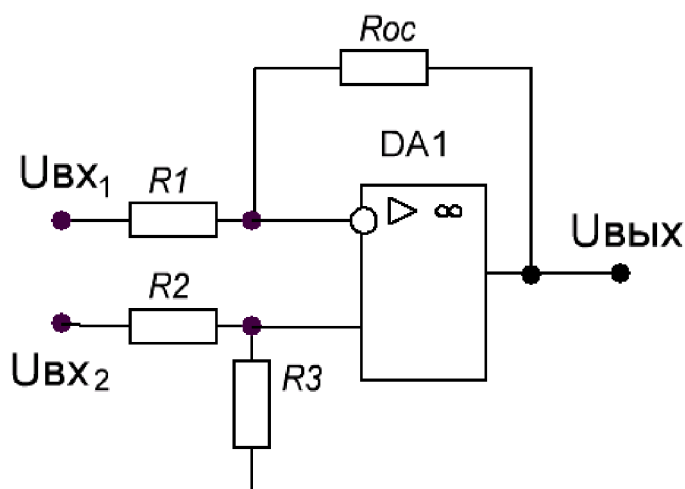


Рис. 8. Схема разностного усилителя

Разностный усилитель (рис. 8) усиливает разность сигналов, приложенных ко входам ОУ. Зная коэффициенты усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам, можно получить выражение для выходного напряжения разностного усилителя, используя метод суперпозиции:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых}} &= -K_{\text{инв}} U_{\text{вх1}} + K_{\text{неинвер}} U_{\text{вх2}} \frac{R_3}{R_3 + R_2} = \\
 &= \frac{-R_{oc}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{\text{вх2}}.
 \end{aligned}$$

Если

$$R_2 = R_1, \quad R_3 = R_{oc}, \quad R_3 / R_2 = R_{oc} / R_1 = m,$$

то

$$U_{\text{вых}} = -m U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} \frac{(m+1)m}{m+1} = m(U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}).$$

В разностном усилителе помехи, попадающие или возникающие на его входах, оказываются синфазными сигналами и не усиливаются, так как схема усиливает только разностный

сигнал. Для хорошего подавления синфазных сигналов требуется точный подбор резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_{oc} . Способность усиливать полезный сигнал на фоне сильных синфазных помех позволяет применять разностный усилитель в различных измерительных схемах.

Недостатком разностного усилителя (рис. 8) является различное входное сопротивление по инвертирующему и неинвертирующему входам, а также трудность регулирования его коэффициента усиления (требуется одновременное изменение двух точно подобранных резисторов).

Для устранения различия и увеличения входных сопротивлений применяется схема разностного усилителя, изображенная на рис. 9.

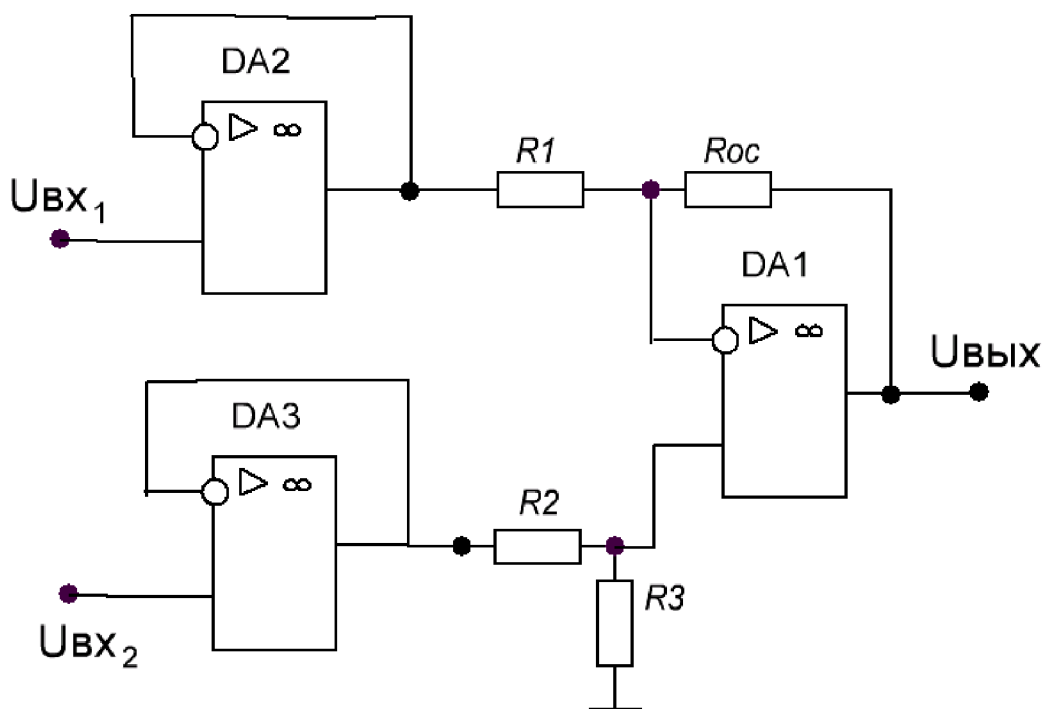


Рис.9. Разностный усилитель с повторителями

Здесь на обоих входах усилителя включены повторители на ОУ, обеспечивающие равное и высокое входное сопротивление схемы.

Сумматоры

Инвертирующий сумматор

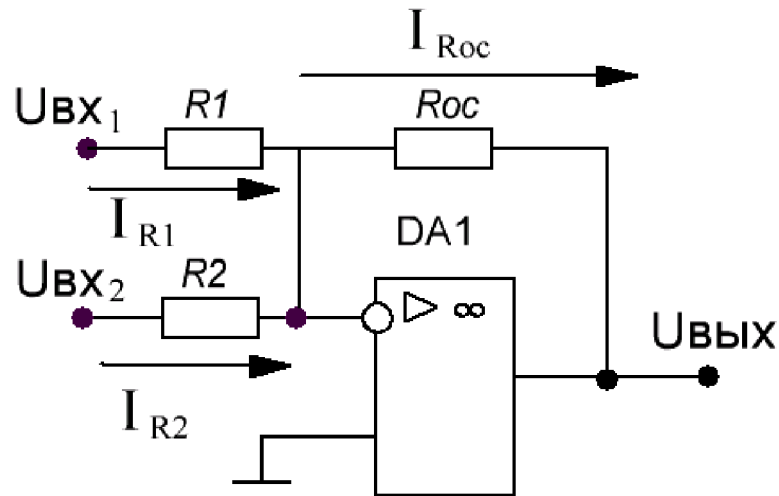


Рис. 10. Инвертирующий сумматор на ОУ

Благодаря малому потенциалу ОУ на инвертирующем входе его можно использовать в качестве суммирующего усилителя (рис. 10). Из данного рисунка видно, что здесь каждый из входов ОУ оказывается разделенным друг от друга низким потенциалом ОУ на инвертирующем входе. Ток в каждом из резисторов на входе определяется только приложенным к нему напряжением и не зависит от тока в других резисторах:

$$I_{Roc} = I_{ex1} + I_{ex2},$$

учитывая

$$I_{ex1} = \frac{U_{ex1}}{R_1}, \quad I_{ex2} = \frac{U_{ex2}}{R_2}, \quad I_{Roc} = \frac{U_{вых}}{R_{oc}}.$$

Поэтому входные сигналы независимо друг от друга вызывают на выходе появление напряжения, величина которого пропорциональна отношению R_{oc}/R . При одновременном действии нескольких сигналов на входе

$$U_{\text{вых}} = - \left(U_1 \frac{R_{oc}}{R_1} + U_2 \frac{R_{oc}}{R_2} + \dots + U_n \frac{R_{oc}}{R_n} \right),$$

где $\frac{R_{oc}}{R_1}$; $\frac{R_{oc}}{R_2}$ – коэффициенты суммирования (усиления).

Если $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, то

$$U_{\text{вых}} = - \left(\frac{R_{oc}}{R} \right) (U_1 + U_2 + \dots + U_n),$$

где $\alpha = R_{oc} / R$ имеет смысл коэффициента передачи

При $R_{oc} = R$ напряжение будет равно

$$U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Неинвертирующий сумматор

В ряде случаев необходимо произвести простое суммирование, при котором выходное напряжение равно сумме входных напряжений без инверсии. Пусть надо получить $U_{\text{вых}} = U_1 + U_2$. Очевидно, что в этом случае сигналы необходимо подать на прямой вход и сохранить условие баланса коэффициентов (рис. 11).

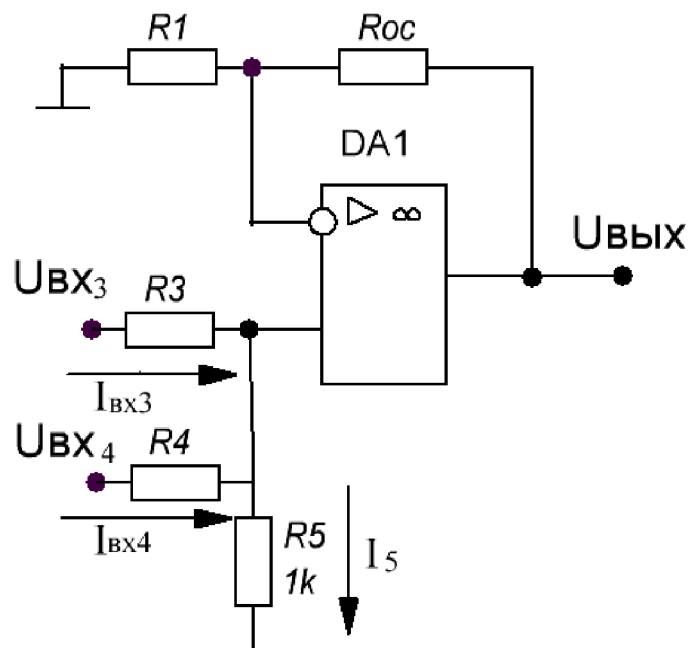


Рис. 11. Неинвертирующий сумматор на ОУ

Условия баланса коэффициентов:

$$\frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{R_5}{R_3} = \frac{R_5}{R_4} = \dots = \frac{R_5}{R_n},$$

$$R_5 = R_3 = R_4 = \dots = R_n.$$

Причем $R'_{oc} = R'_1 = R'_2$. Коэффициент передачи по инвертирующему входу должен быть равен 2.

Выберем $R_1 = R_{oc}/n = R_{oc}/2$.

Тогда схема будет выглядеть, как показано на рис. 11.

Можно осуществить суммирование с весовыми коэффициентами, т.е. получить, например, $U_{вых} = U_1 + 2U_2$ и т.д. При этом необходимо соблюсти условие баланса коэффициентов, как указывалось выше.

Рассмотрим в качестве примера универсальную схему вычитания (рис 12), предназначенную одновременно для суммирования и вычитания любого числа входных напряжений.

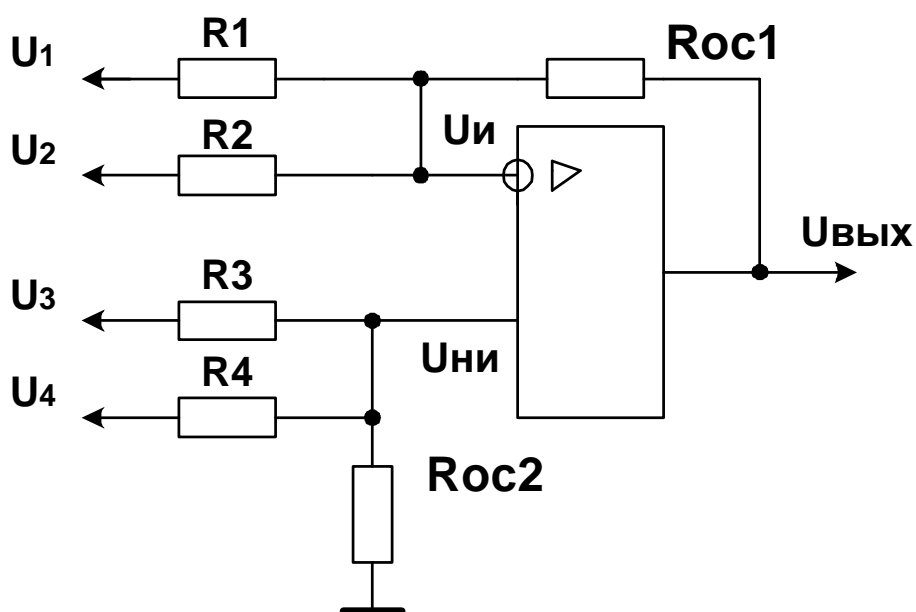


Рис. 12. Схема сложения-вычитания на ОУ

Составим уравнения суммирования токов, потребляемых от четырех источников при условии:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{oc1} = R_{oc2} = R;$$

$$\frac{U_1 - U_u}{R} + \frac{U_2 - U_u}{R} = \frac{U_u - U_{вых}}{R};$$

$$\frac{U_3 - U_{ни}}{R} + \frac{U_4 - U_{ни}}{R} = \frac{U_{ни}}{R}.$$

Так как $U_{II} = U_{НИ}$, то после преобразований уравнений получим:

$$U_1 + U_2 - 3U_{II} = -U_{вых},$$

$$U_3 + U_4 - 3U_{НИ} = 0.$$

Отсюда получаем

$$U_3 + U_4 - U_1 - U_2 = U_{вых}.$$

В общем случае для правильной работы этой схемы необходимо выполнение следующих условий: сумма коэффициентов усиления инвертирующей части схемы должна быть равна сумме коэффициентов усиления ее не инвертирующей части. Иными словами, должно быть выполнено следующее равенство:

$$R_{oc}/R_1 + R_{oc}/R_2 + \dots + R_{oc}/R_m = R'_{oc}/R'_1 + R'_{oc}/R'_2 + \dots + R'_{oc}/R'_n,$$

где m – число инвертирующих входов, n – число не инвертирующих входов.

В рассмотренной выше схеме данное условие выполняется. Может возникнуть вопрос, как обеспечить выполнение данного условия (условия баланса) в схеме, которая проектируется заново? Оказывается, что схему можно сделать балансной, добавив к ней дополнительный вход, на который подается нулевой потенциал. Этот вход добавляется к той половине усилителя, суммарный коэффициент которого меньше.

Логарифмические преобразователи на ОУ

Логарифмический преобразователь на ОУ представляет собой электронное устройство, в котором выходное напряжение пропорционально логарифму входного сигнала. Для получения логарифмической зависимости напряжения на выходе ОУ от напряжения на его входе необходимо в цепь обратной связи ОУ включить элемент с логарифмической характеристикой. Таким элементом может быть полупроводниковый диод (рис. 13) или биполярный транзистор в диодном включении (рис. 14). Из теории полупроводников известно, что ток через полупроводниковый диод, равен

$$I_{\partial} = I_0 \left(e^{\frac{U_{\partial}}{m\varphi_T}} - 1 \right),$$

где I_0 – статический обратный ток, $1 < m < 2$ – корректирующий множитель.

В рабочей области, где выполняется условие $I_{\partial} \gg I_0$, можно считать с достаточной точностью

$$I_{\partial} = I_0 e^{\frac{U_{\partial}}{m\varphi_T}}, \quad U_{\partial} = m \varphi_T \ln(I_{\partial}/I_0).$$

Последнее выражение и является искомой логарифмической функцией. При этом для схемы на рис. 13 имеем

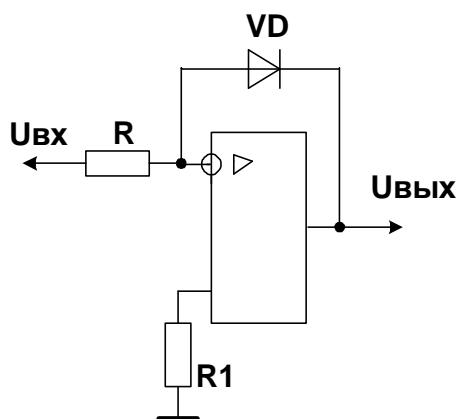


Рис.13. Логарифмический усилитель с диодом в цепи обратной связи

$$U_{\text{вых}} = -m \cdot \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_0}\right) = m \varphi_T \left(\ln \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} - \ln I_0 \right).$$

Выходное напряжение определяется прямым падением напряжения на диоде. Диапазон возможных рабочих токов ограничен двумя специфическими свойствами диодов – их омическим сопротивлением, на котором при большом токе падает значительное напряжение, приводящее к искажению логарифмической характеристики, а также зависимостью множителя m от тока. Поэтому удовлетворительная точность может быть получена при изменении входного тока в пределах двух декад.

Влияние множителя m можно исключить, применив вместо диода транзистор (рис.14). Для коллекторного тока транзистора (при $U_{\text{кб}} = 0$) справедливо соотношение

$$I_{\text{к}} = \alpha \cdot I_{\text{э0}} \cdot \left(e^{U_{\text{бэ}} / m \varphi_T} - 1 \right).$$

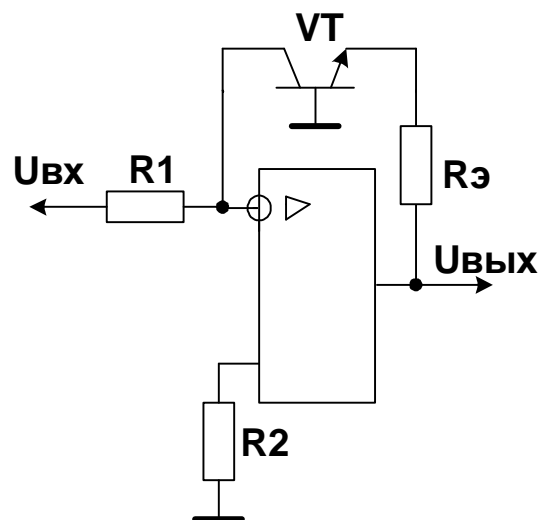


Рис. 14. Логарифмический усилитель с транзистором в цепи обратной связи

Зависимости α и m от тока взаимно компенсируется.

Тогда

$$I_k = \alpha \cdot I_{\varepsilon 0} \cdot e^{U_{бэ} / \varphi_T}; \quad U_{бэ} \approx \varphi_T \ln(I_k / I_{\varepsilon 0}).$$

Выходное напряжение логарифмического усилителя

$$U_{вых} = -\varphi_T \ln\left(\frac{U_{вх}}{R_1 I_{\varepsilon 0}}\right).$$

не зависит от коэффициента m , а его динамический диапазон рабочих токов при надлежащем выборе транзисторов может составлять 9 декад.

Рассмотренные схемы, хотя и являются работоспособными, не содержат устройств температурной компенсации или коррекции для устранения влияния теплового тока I_0 и температурного потенциала φ_T . Последние вносят значительную нестабильность в работу логарифмического усилителя. Так, при изменении температуры от 20 до 50 градусов φ_T увеличивается на 10 %, а ток I_0 – примерно в 10 раз.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 15 приведена схема лабораторной установки.

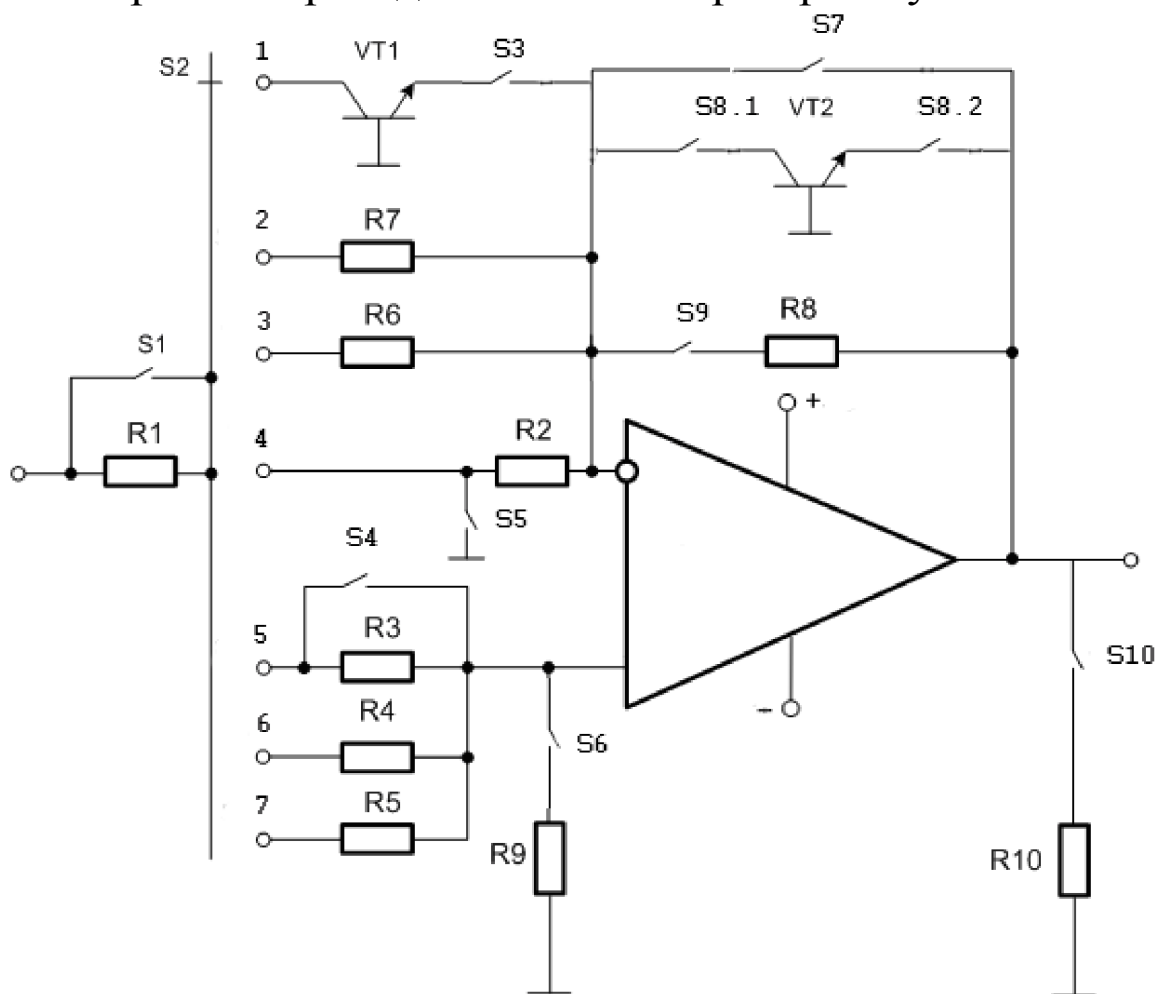


Рис. 15. Схема лабораторной установки

Инвертирующий усилитель: включены S1, S2 (положение 4), S9.

Неинвертирующий: вкл. S1, S2 (положение 5), S4, S5, S9.

Повторитель: вкл. S1, S2 (положение 5), S4, S7.

Разностный: вкл. S1, S2 (положение 4, 5), S6, S9.

Неинвертирующий сумматор: вкл. S1, S2 (положения 5, 6, 7), S4, S5, S9.

Инвертирующий сумматор: включены S1, S2 (положения 2,3,4), S9.

Логарифмирующий усилитель: включены S1, S2 (положение 4), S8.

Антилогарифмирующий усилитель: включены S1, S2 (положение 1), S9.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Внимательно изучить данное методическое руководство к лабораторной работе.

2. Изучить по предлагаемым в конце методического руководства литературным источникам принципиальные схемы каскадов на ОУ, основные характеристики, их назначения, достоинства и недостатки.

3. Ознакомиться со схемой установки и методикой определения основных качественных показателей каскадов, изучить лабораторное задание и методику выполнения лабораторной работы.

4. Подготовить ответы на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях.

5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

Ознакомиться с экспериментальной установкой для исследования схем на операционном усилителе.

1. Снять амплитудную характеристику для инвертирующей схемы, определить коэффициент усиления по напряжению на линейном участке, зарисовать осциллограммы. Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

2. Определить верхнюю и нижнюю граничную частоту, рассчитать полосу пропускания для инвертирующей схемы. Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

3. Определить входное сопротивление инвертирующей схемы. Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

4. Измерить выходное сопротивление инвертирующей схемы. Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

5. Исследовать разностную схему.

6. Исследовать схемы сумматоров.

7. Проанализировать результаты экспериментов и сделать заключение.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАДАНИЯ

1. Для исследования амплитудной характеристики необходимо подключить к входу макета генератор низкой частоты и настроить его на частоту 1кГц. К входу макета подключить первый канал осциллографа для контроля уровня сигнала генератора, к выходу макета подключить второй канал осциллографа для контроля уровня сигнала и его формы. Построить зависимости амплитуды выходного сигнала от входного сигнала для исследуемой схемы. Для получения общего представления о характере кривых целесообразно, предварительно не записывая показаний, оценить изменения выходного напряжения и выделить участки с наиболее выраженной нелинейной зависимостью. После этого снять характеристики по точкам. Наибольшее число точек следует снимать на нелинейных участках кривых, так как линейные участки достаточно четко определяются двумя-тремя точками. Для всех схем в середине линейного участка амплитудной характеристики определить коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Повторить для других схем, кроме сумматоров и разностного усилителя. Сравнить полученные результаты. Результаты измерений свести в табл. 1. По полученным данным построить графики на одном рисунке.

Амплитудные характеристики каскадов

Инвертирующий усилитель	$U_{вх}$, мВ	
	$U_{вых}$, мВ	
Неинвертирующий усилитель	$U_{вх}$, мВ	
	$U_{вых}$, мВ	
Логарифмический усилитель	$U_{вх}$, мВ	
	$U_{вых}$, мВ	
Антилогарифмический усилитель	$U_{вх}$, мВ	
	$U_{вых}$, мВ	

2. Определить верхнюю и нижнюю граничную частоту. Для этого установить частоту генератора 1 кГц, изменяя уровень выходного сигнала генератора установить уровень выходного сигнала с макета равным 1 В. Изменяя частоту генератора вверх и вниз, найти частоты, соответствующие уровню 0,7 от уровня центральной частоты (1 кГц). На основе данных о верхней и нижней граничных частотах рассчитать полосу пропускания для схемы. Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

3. Определить входное сопротивление инвертирующей схемы. Для измерения входного сопротивления с помощью переключателя S1 на вход каскада подключается дополнительное сопротивление R_0 , равное 1 кОм. Зафиксировав изменение выходного напряжения $U_{вых}$, рассчитать входное сопротивление по формуле

$$R_{вх} = \frac{R_0 U_{вых}}{U_{вых0} - U_{вых}}$$

Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

4. Измерить выходное сопротивление инвертирующей

схемы. Для измерения выходного сопротивления с помощью переключателя S5 параллельно к выходу подключается дополнительное сопротивление R_d , равное 5,6 кОм.

Зафиксировав изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, рассчитать выходное сопротивление по формуле

$$R_{\text{вых}} = R_d \left(\frac{U_{\text{вых}0}}{U_{\text{вых}}} - 1 \right)$$

Повторить для других схем. Сравнить полученные результаты.

5. Исследовать дифференциальный усилитель (усилитель разности сигналов). Собрать схему усилителя разности сигналов, для чего на макете поставить переключатели в соответствующие схеме положения. Затем, подключив на вход и на выход схемы двухканальный осциллограф, зарисовать временные диаграммы входных сигналов $U_{\text{вх}1}$ и $U_{\text{вх}2}$, подав на инвертирующий вход гармонический сигнал $U_{\text{вх}1}$ с амплитудой 1В и частотой 1000 Гц, а на неинвертирующий вход гармонический сигнал $U_{\text{вх}2}$, такой же амплитуды и частоты.

6. Исследовать суммирующий усилитель. Сначала собрать схему инвертирующего суммирующего усилителя, для чего на макете поставить переключатели в соответствующие положения. Затем, подключив на вход и на выход схемы двухканальный осциллограф, зарисовать временные диаграммы входных сигналов $U_{\text{вх}1}$ и $U_{\text{вх}2}$, подав на первый вход гармонический сигнал $U_{\text{вх}1}$ с амплитудой 1 В и частотой 1000 Гц, а на второй вход гармонический сигнал $U_{\text{вх}2}$, такой же амплитуды и частоты. Повторить все для неинвертирующей схемы.

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ ЕСКД и должен содержать:

1. Электрическую принципиальную схему установки.
2. Принципиальные схемы функциональных блоков на операционных усилителях.
3. Результаты измерений амплитудных характеристик в виде таблиц и графиков. Графики амплитудных характеристик каскада для всех схем привести на одном рисунке в одном масштабе.
4. Результаты измерений полосы пропускания.
5. Результаты измерений входных сопротивлений.
6. Результаты измерений выходных сопротивлений.
7. Результаты измерений коэффициентов усиления.
8. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Схема и основные соотношения для неинвертирующего усилителя на ОУ.
2. Схема и основные соотношения для инвертирующего усилителя на ОУ.
3. Схема и основные соотношения для дифференциального усилителя на ОУ.
4. Схема и основные соотношения для инвертирующего сумматора.
5. Схема и основные соотношения для неинвертирующего сумматора.
6. Основные параметры и характеристики ОУ.
7. Понятие об идеальном ОУ.
8. Классификация ОУ.
9. Условия, при которых реальный ОУ можно считать идеальным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. – М.: Связь, 1977. – 357с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учебное пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
3. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Учитель и ученик: КОРОНА–принт, 2003. – 416 с.
4. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных интегральных схем. – М.: Мир, 1995. – 250 с.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем.– М.: Мир, 1982. – 512 с.
6. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
7. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. – 2-е изд. – М.: Связь, 1977. – С. 310–346.
8. Масленников В.В., Сироткин А.П. Избирательные RC-усилители. – М.: Энергия, 1980. – 217 с.

**Кравец Андрей Владимирович
Шибаета Елена Михайловна**

**Руководство к лабораторной работе
Исследование функциональных узлов
на операционном усилителе
по курсу**

Схемотехника аналоговых электронных устройств

Ответственный за выпуск Кравец А.В.
Редактор Проценко И.А.
Корректор Чиканенко Л.В.

Подписано в печать

Заказ № Тираж 100 экз.

Формат 60X84 1/16 . Усл. п.л. – 2,0. Уч. – изд. л. – 1,9.

Издательство Южного федерального университета
344091, г. Ростов–на–Дону, пр. Стачки, 200/1.
Тел. (863)2478051.

Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической
продукцией кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической,
корпоративной и сувенирной продукции
ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

ГСП 17 А, Таганрог, 28, Энгельса, 1
Тел. (8634)371717.