



Операционные усилители

Лабораторные работы посвящены изучению операционных усилителей и схем их включения. В методическом пособии разъясняется принцип работы операционного усилителя, приводятся основные параметры и стандартные схемы включения.

Введение

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

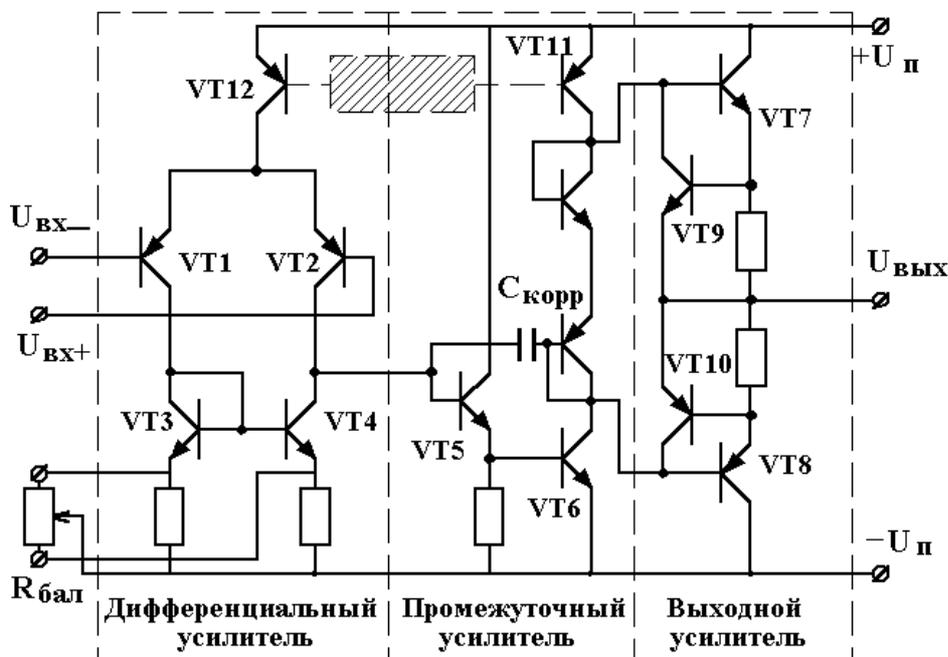


Рис.1. Упрощенная принципиальная схема ОУ
(часть схемы, обозначенная штриховкой, не приведена)

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.

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} А 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 В до ± 18 В. В военном исполнении диапазон напряжения питания ОУ расширен до ± 22 В.

Выходное напряжение ОУ связано с входным дифференциальным сигналом простым выражением

$$U_{вых} = K_0 \cdot (U_{вх+} - U_{вх-})$$

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

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 $U_{вых}$ 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. Примеры схемных обозначений ОУ приведены на рис.2.

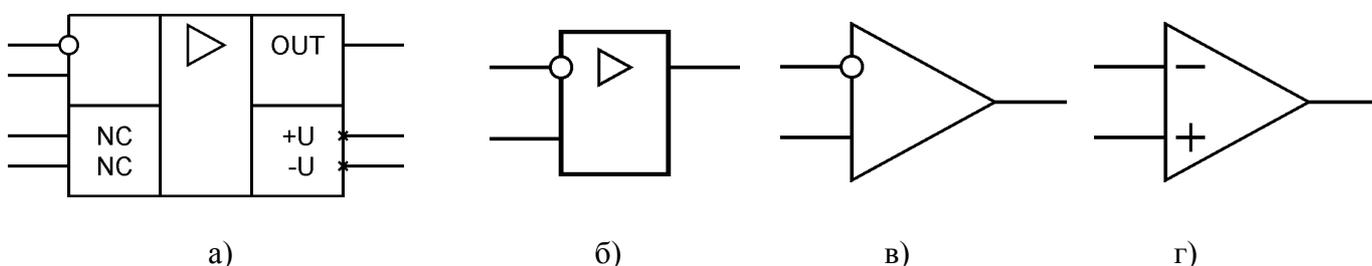


Рис.2. Условно-графические обозначения: а, б) по ГОСТу (NC - коррекция нуля); в, г) устаревшее обозначение, а также обозначение зарубежных производителей ОУ.

1. Параметры операционных усилителей

Возможности применения ОУ зависят от его электрических характеристик. Для полной характеристики ОУ необходимо учитывать более 30 параметров. Знание параметров ОУ, понимание степени их влияния на работу схемы позволяет не только выбрать наиболее подходящий тип для конкретной цели, но зачастую обходиться без дополнительных испытаний.

Коэффициент усиления ОУ (K_0) равен отношению приращения выходного напряжения (тока) к вызвавшему это приращение входному напряжению (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 Боде (рис.3а). Каждый каскад вносит фазовый сдвиг до 90° на граничной частоте, поэтому общий фазовый сдвиг зависит от количества каскадов и имеет вид, показанный на рис.3а) 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 $K_0 \cdot \beta \geq 1$, где β - коэффициент ОС, то *отрицательная* ОС превращается в *положительную*, что приводит к самовозбуж-

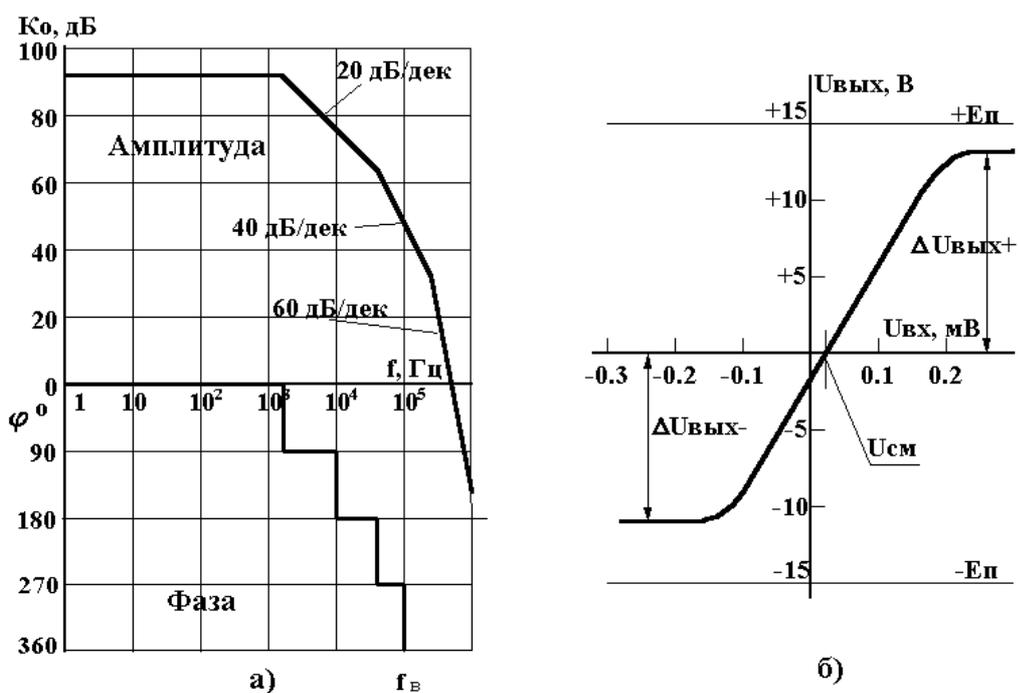


Рис. 3. а) Аппроксимированная логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) и фазо-частотная характеристики (ФЧХ); б) статическая передаточная характеристика

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.4. 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. Фактически это сопротивление между входами ОУ. 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 биполярных входов - $10^4 \div 10^8$ Ом, для полевых - $10^7 \div 10^{12}$ 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), и составляет для разных ОУ величину порядка десятков-сотен Ом. Глубокая отрицательная обратная связь делает выходное сопротивление пренебрежимо малым (или очень большим в случае обратной связи по току). Типовое значение $R_{вых}$ для ОУ широкого применения $100 \div 1000$ Ом.

Входной ток смещения ($I_{вх}$) - это ток, протекающий во входную цепь ОУ, который необходим 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 - $10^{-5} \div 10^{-8}$ А, для полевых - $10^{-9} \div 10^{-12}$ 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 $I_{вх}$ вызывает на выходе ОУ некоторое смещение (приведенное ко входу оно составляет величину $1 \div 5$ 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 **э.д.с. смещения ($E_{см}$)**. Для ОУ с биполярными транзисторами на входе $U_{см}$ зависит в основном от разброса напряжений $\Delta U_{б}$ эмиттерно-базовых переходов и составляет $1 \div 10$ 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 рав-

ные напряжения, например, оба входа заземлить, на выходе скорее всего будет наблюдаться уровень, близкий к одному из питающих напряжений, то есть ОУ войдет в режим ограничения $U_{\text{вых}} = U_{\text{см}} * K_0 \sim 10^{-2} * 10^5 = 1000\text{В} \gg E_{\text{пит}}$. 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 ($R_{\text{бал}}$ на рис. 1). Некоторые типы ОУ таких выводов не имеют и балансируются по входу (140УД5, рис.2е).

Средний температурный дрейф напряжения смещения ($\Delta U_{\text{см}}/\Delta T$) - максимальное изменение $U_{\text{см}}$ при изменении температуры на 1°C в оговоренном диапазоне температур. Измеряется в мкВ/ $^\circ\text{C}$. Типовые значения для биполярных входов $5 \div 20$ мкВ/ $^\circ\text{C}$, для входов с полевыми транзисторами $20 \div 100$ мкВ/ $^\circ\text{C}$. Если $U_{\text{см}}$ можно скомпенсировать до нуля, то с температурным дрейфом бороться сложнее. Входной ток $I_{\text{вх}}$ и разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$ 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.3а и 4, где ЛАХ пересекает уровень 0 дБ в точках f_1 .

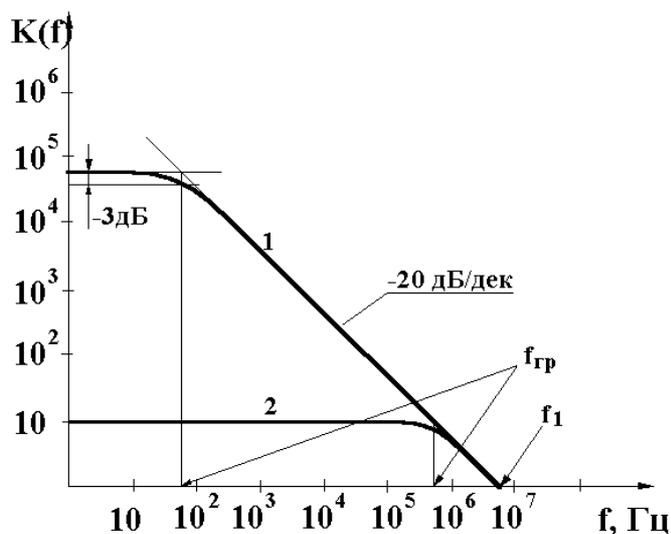


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от частоты.

Граничная частота ($f_{\text{гр}}$) определяется как частота, на которой коэффициент усиления уменьшается на 3 децибела: $|K(f_1)| = 0.707 * |K(0)|$. Область частот $0 \div f_{\text{гр}}$ называют полосой пропускания. Введение ООС расширяет полосу пропускания (график 2 на рис.4).

Скорость нарастания выходного напряжения определяется как $dU_{\text{вых}}/dt$ при воздействии импульса большой амплитуды. Измеряется в В/мкс. Для разных ОУ меняется в пределах от 0,1 В/мкс (прецизионные ОУ) до 3000 В/мкс (быстродействующие ОУ). Этот параметр становится важным, если ОУ используется в качестве компаратора уровней сигналов в быстродействующих схемах.

Диапазон выходного напряжения ($\Delta U_{\text{вых}}$) - 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 $\Delta U_{\text{вх}} = 10$ В при $E_{\text{п}} = \pm 15\text{В}$ (симметричный выход); для 140УД5 $\Delta U_{\text{вх}} = +6\text{В}/-4\text{В}$ при $E_{\text{п}} = \pm 12\text{В}$ (несимметричный выход).

Диапазон синфазных входных напряжений ($U_{\text{вх.сф}}$) - это такой диапазон синфазных входных напряжений, в котором параметры ОУ лежат в гарантированных пределах. Зависит от напряжения питания. Примерно на $-2 \div +3$ В 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.

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 1-1500 мА. Для специализированных ОУ выходной ток достигает нескольких Ампер.

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. 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 понятие **виртуального** или **мнимого** заземления.

Инвертирующий усилитель. Рассмотрим схему на рис.5.

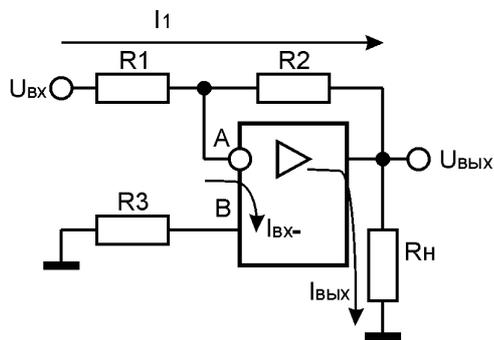


Рис. 5. Инвертирующий усилитель

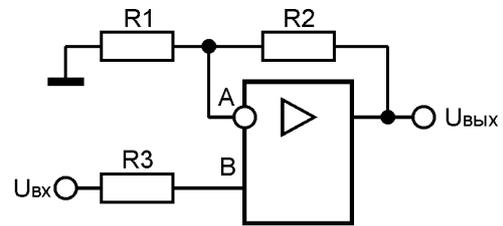


Рис. 6. Неинвертирующий усилитель

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-э.д.с. 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 $U_A = 0$, $U_{\text{ex}} - U_A = U_{\text{ex}}$ (падение напряжения на R_1); (падение напряжения на R_2). Поскольку входной ток ОУ очень мал ($I_{\text{вх}} \ll I_1$), им можно пренебречь, тогда получим $I_1 = \frac{U_{\text{ex}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_2}$. Это означает, что для инвертирующего усилителя

$$K_{OC} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ex}}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Для минимизации влияния токов смещения вход "+" заземляется через резистор $R_3 \approx R_1 \parallel R_2$.

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

Выходное сопротивление $R_{\text{вых.OC}} = 0$, так как $R_{\text{вых.OC}} = \frac{dU_{\text{вых}}}{dI_{\text{вых}}}$, а $U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{\text{ex}}$

от $I_{\text{вых}}$ не зависит. Это не означает, конечно, что к выходу ОУ можно подключать нагрузку сколь

угодно малого сопротивления, так как $I_{\text{вых.max}}$ ограничен: $R_{\text{наг.min}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых.max}}}$, т. е. **минималь-**

ное сопротивление нагрузки на выходе ОУ зависит от амплитуды выходного напряжения.

Как видим, понятие мнимого заземления и идеализация ОУ ($I_{\text{вх}} = 0$, $K_0 = \infty$) существенно облегчают анализ схем включения ОУ, а точный расчет может добавить только члены порядка $K_{OC}/K_0 \ll 1$, например для выходного сопротивления вместо нуля будем иметь

$$R_{\text{вых.OC}} = \frac{R_{\text{вых}} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2 + (1 + K_0) \cdot R_1} \cong \frac{R_{\text{вых}}}{K_0} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

При $R_{\text{вых}} = 200 \text{ Ом}$, $K_0 = 2 \cdot 10^5$, $R_2/R_1 \approx 10$, $R_{\text{вых}} \approx 10^{-2} \text{ Ом}$ - сопротивление обычного медного провода диаметром 0.3 мм и длиной всего 5 см!

Неинвертирующий усилитель можно получить, подавая сигнал на неинвертирующий вход, а цепь ООС - на инвертирующий, как показано на рис. 6. Напряжение ОС снимается с делителя:

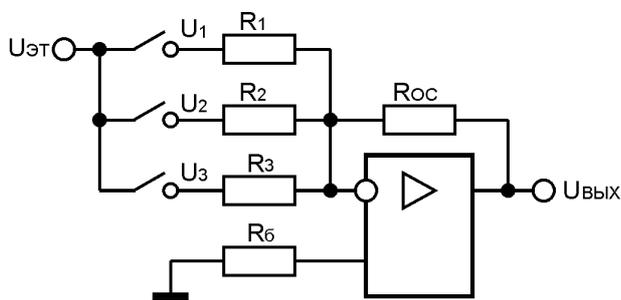
$$U_A = \frac{U_{\text{вых}} \cdot R_1}{(R_1 + R_2)}. \text{ Так как } U_A = U_{\text{вх}}, \text{ коэффициент усиления } K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

$$\text{Входное сопротивление схемы } R_{\text{вх.ОС}} = \frac{R_{\text{вх}} \cdot K_0 \cdot R_1}{(R_1 + R_2)} - \text{ как всегда при последовательной}$$

ООС входное сопротивление увеличивается.

$$\text{Выходное сопротивление } R_{\text{вых.ОС}} \cong 0.$$

Аналоговый сумматор. На ОУ легко реализовать аналоговый суммирующий усилитель (рис.7). По первому закону Кирхгофа с учетом мнимого заземления получаем



$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{\text{ОС}};$$

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{ОС}} \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right).$$

Если величины сопротивлений R_1, \dots, R_n выбрать равными, то на выходе получим сумму входных напряжений. Если же R_1, \dots, R_n взять кратными степени двойки: $R_n = R \cdot 2^{n-1}$, а на входы U_n через ключи, управляемые цифровым кодом, подать эталонное напряжение, то получим простейший цифро-аналоговый преобразователь - ЦАП.

Рис. 7. Аналоговый сумматор.

Аналоговый интегратор. Рассмотрим схему на рис.8а. Ток $I_{\text{вх}} = I_R = U_{\text{вх}}/R = I_C = C \cdot dU_C/dt$ (мнимое заземление). Следовательно, с учетом полярности U_C , получаем

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \cdot \int U_{\text{вх}} \cdot dt + U_0,$$

где U_0 - напряжение на выходе при $t = 0$ (емкость C может быть заряжена перед началом интегрирования).

Нулевое начальное условие можно задать при помощи управляемого ключа (обычно МОП-транзистора). Если $R \gg r_{\text{кл}} \sim 50 \text{ Ом}$, то при замкнутом ключе $K_{\text{ОС}} \sim 0$, $U_{\text{вых}} = U_C = 0$; при разомкнутом идет интегрирование.

Точность вычисления интеграла определяется коэффициентом усиления K_0 , входными токами ОУ, напряжением смещения $U_{\text{см}}$. Для интеграторов обычно используются ОУ с полевыми транзисторами на входе и конденсаторы с малыми токами утечки.

С помощью интеграторов можно решать обыкновенные дифференциальные уравнения, в том числе нелинейные (аналоговые вычислительные машины).

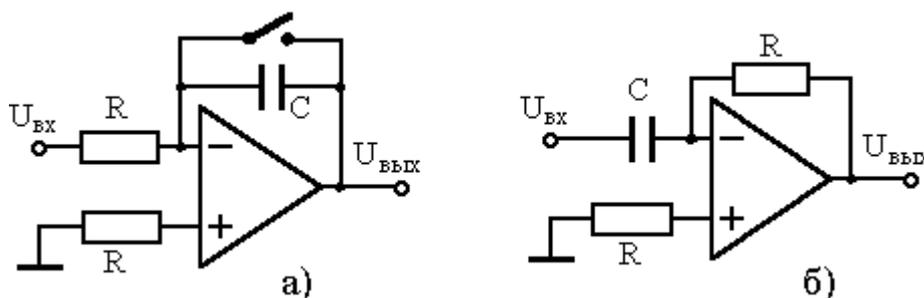


Рис.8. Интегрирующий (а) и дифференцирующий (б) усилители

Дифференцирующий усилитель получается, если **R** и **C** поменять местами (рис. 8б):

$K_{OC}(\omega) = -j\omega RC = -pRC$, где $p = j\omega$ - отображение операции дифференцирования. Эта схема сравнительно редко используется на практике, так как обладает большим K_{OC} на высоких частотах и усиливает импульсные наводки и собственные шумы.

Логарифмический усилитель (ЛУ). Для получения логарифмической зависимости $U_{вых} \sim \lg(U_{вх})$ в цепь ОС вводят нелинейный элемент - диод или биполярный транзистор (рис.9а).

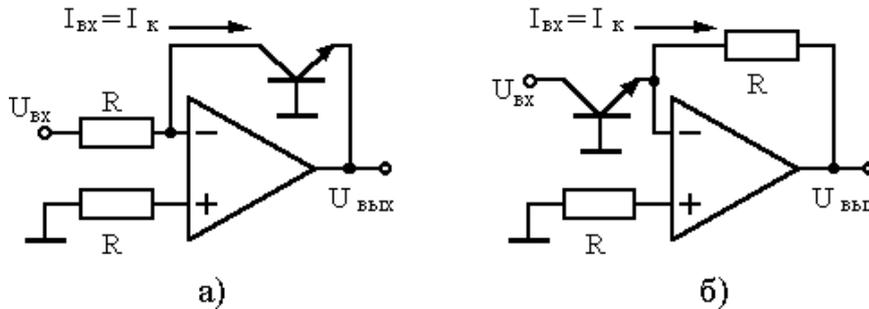


Рис.9. Логарифмирующий (а) и потенцирующий (б) усилители.

Ток, протекающий в цепи ОС, при $I_{вх} = 0$, равен коллекторному току транзистора и определяется равенством

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R} = I_k = I_{k0} \left[\exp\left(\frac{q \cdot U_{эб}}{\eta \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right],$$

где I_{k0} - тепловой ток **p-n** перехода (обратный ток коллектора), $U_{эб}$ - напряжение на переходе эмиттер-база, k - постоянная Больцмана, T - температура в градусах К, q - заряд электрона, η - постоянная рекомбинации. Величина $\eta kT/q = \phi_T$ называется температурным потенциалом; ($\phi_T \approx 26$ мВ для германия, $\phi_T \approx 30$ мВ для кремния. Для большинства транзисторов малой мощности $I_{k0} < 10^{-8}$ А.

С учетом $U_{эб} > 30$ мВ, $I_{k0} \ll I_k$ из (4) следует

$$U_{вых} = U_{эб} = \phi_T [\ln(I_k) - \ln(I_{k0})] = \phi_T \left[\ln\left(\frac{U_{ex}}{R}\right) - \ln(I_{k0}) \right]$$

Потенцирующий усилитель получается, если резистор и транзистор в цепи ОС поменять местами (рис.9б). Все расчеты аналогичны.

Так как ЛУ часто применяются для расширения диапазона измеряемых токов (для схемы рис. 9а этот диапазон составляет 9 декад 10^{-12} А $< I_k < 10^{-3}$ А), в них используются ОУ с полевыми транзисторами, которые тщательно балансируют (при этом зануляется и второй член в (5)). Принимаются также меры для компенсации температурного дрейфа, поскольку в (4) температура входит явно.

С помощью ЛУ можно возводить в произвольную степень и перемножать аналоговые сигналы. Точность ЛУ невелика - порядка нескольких процентов. Схемы рис. 9 работают только с однополярными сигналами.

Прецизионный выпрямитель. Полупроводниковые диоды непригодны для выпрямления сигналов амплитудой меньше 1 В, так как для получения заметной проводимости на кремниевые диоды нужно подать смещение примерно 0.7 В, а на германиевые - около 0.4 В. Применение ОУ позволяет получать выпрямители, хорошо работающие с сигналами до 1 мВ. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 10а.

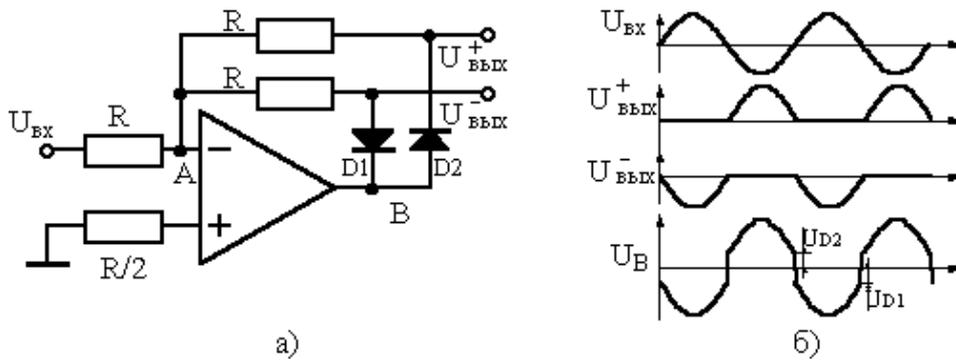


Рис. 10. Однополупериодный выпрямитель

Эпюры напряжений, показанные на рис. 10б, поясняют работу схемы. При положительном входном сигнале ток течет через диод D_1 , а при отрицательном - через диод D_2 . Рассуждения, полностью аналогичные тем, что проводились при рассмотрении инвертирующего усилителя, приводят к выводу, что коэффициент передачи $U_{\text{вых}}^+ / U_{\text{вх}}$ равен -1 для отрицательной полуволны на входе, равен 0 для положительной. От характеристик диодов качество выпрямителя практически не зависит, от них требуется только малый обратный ток.

Для двухполупериодного выпрямления требуется еще один ОУ для получения суммы $\{U_{\text{вх}} + 2*U_{\text{вых}}^+\}$ (см. рис. 10б).

Рекомендуемое задание к работе

По результатам выполнения практических заданий составьте итоговую таблицу для измеренных параметров ОУ ($U_{\text{см}}$), ($I_{\text{вх}}$), ($\Delta I_{\text{вх}}$), (f_1), ($\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$), ($dU_{\text{вых}} / dt$) в сравнении со справочными данными.

Измерения, имеющие оценочный характер, можно проводить с помощью осциллографа. Это удобно еще и потому, что, если ОУ возбуждётся, то сразу будет видно. Но для точности следует использовать цифровой или стрелочный вольтметр, а по осциллографу контролировать возбуждение. Все измерения проводить при температуре 30°C , если не сказано дополнительно. Светящийся индикатор говорит о том, что идёт нагрев. Как только он погаснет можно проводить измерения (температура достигла указанного значения).

1. Измерение ($U_{\text{см}}$), (f_1), ($I_{\text{вх}}$), ($\Delta I_{\text{вх}}$).

а) Соберите схему по рис. 11а с биполярным ОУ ТСА0372DP1 при значениях резисторов $R_1 = R_3 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ кОм}$. Напряжение питания $\pm 6 \text{ В}$.

Заземлите вход. По измеренному $U_{\text{вых}}$, найдите $U_{\text{см}}$ и сравните его со справочными данными ($U_{\text{см}} = U_{\text{вых}} / K_{\text{ОС}}$). По справочным же данным оцените влияние входных токов смещения. Так как измеряется $U_{\text{см}}$, то напряжение сдвига, вызванное разностью входных токов, должно быть много меньше $U_{\text{см}}$.

б) Для компенсации смещения нуля подключите резистор $R_{п}$ к резистору $R_{п1}$ или $R_{п2}$, в зависимости от знака $U_{\text{см}}$ (рис.11б). Сбалансируйте ОУ.

в) Подайте на вход инвертирующего усилителя (рис.11в) синусоидальный сигнал уровня $30 \div 40 \text{ мВ}$. Изменяя $U_{\text{вых}}$ на разных частотах, постройте ЛАЧХ, подобный рис.4. Определите частоту единичного усиления (f_1).

г) Разомкните цепь ООС (рис.11г), т. е. уберите R_2 и попытайтесь установить на выходе напряжение, близкое к нулю. Объясните результат.

д) Милливольтметром измерьте напряжение смещения.

е) Для сбалансированного ОУ, когда на среднем выводе переменного резистора $R_{п}$ установлено напряжение, равное ($-U_{\text{см}}$); замените резистор R_3 на номинал 10 кОм (рис.11д). Измерив $U_{\text{вых}}$ вычислите $I_{\text{вх}+}$ и сравните результат со справочными данными ($U_{\text{вых}} = I_{\text{см}} * R_2 * K_{\text{ОС}}$).

ж) Замените резистор R_1 тоже на 10 кОм , а R_2 - на 1 МОм (рис.11е). По измеренному $U_{\text{вых}}$ оцените разность входных токов ($\Delta I_{\text{вх}}$). ($U_{\text{вых}} = I_{\text{сдв}} * R_{\text{ист}} * K_{\text{ОС}}$)

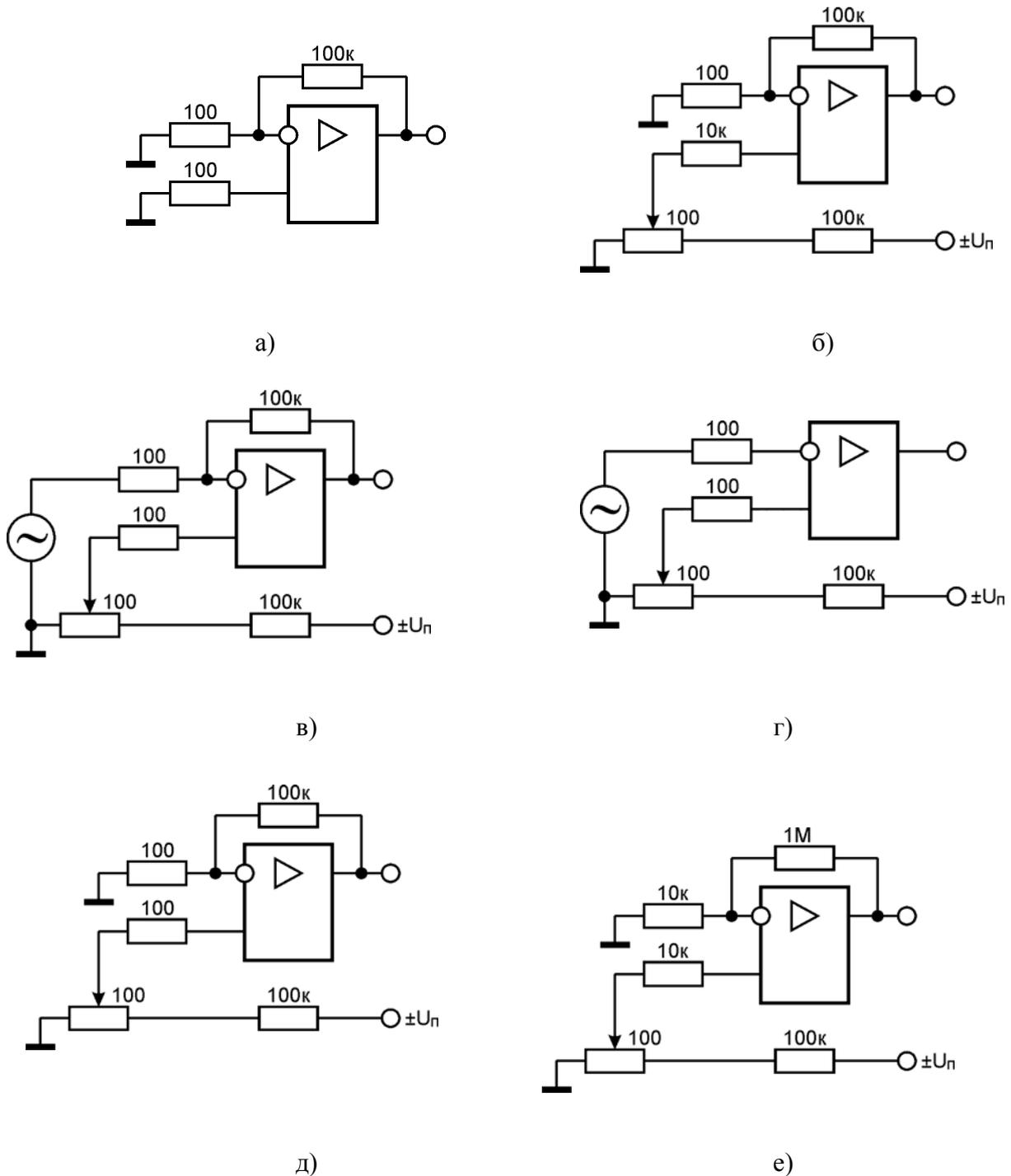
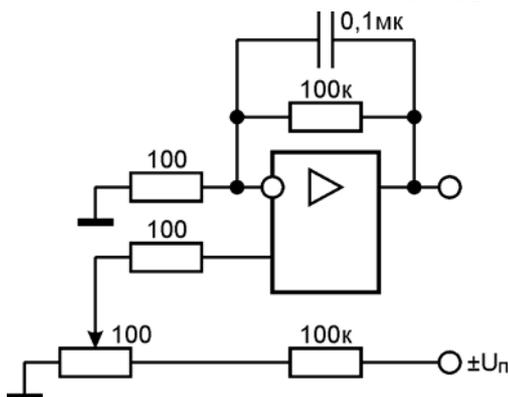


Рис.11. Инвертирующий усилитель (а - е).

2. Наблюдение температурного дрейфа и низкочастотного шума

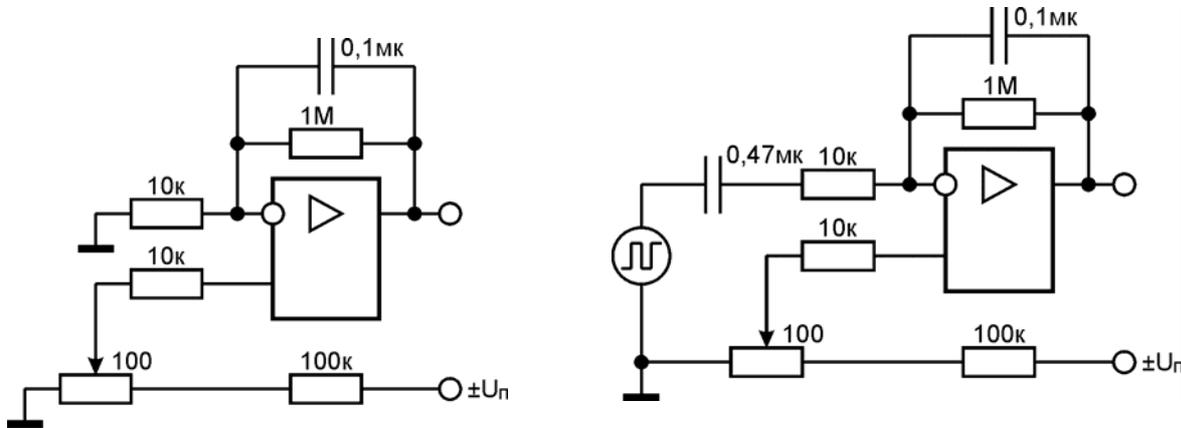


Соберите схему по рис.12 при значениях $R_1=R_3=100$ Ом, $R_2=100$ кОм, $C_2=0.1$ мкФ. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ. На выходе ОУ должны наблюдаться плавные уходы напряжения в ту и другую сторону (так называемый "шум $1/f$ "). Вы увидите систематический уход $U_{\text{вых}}$. Включите тумблер « $30^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$ » в положение 60°C . Оцените $(\Delta U_{\text{см}}/\Delta T)$.

Примечание. Конденсатор C служит для уменьшения шумов и наводок.

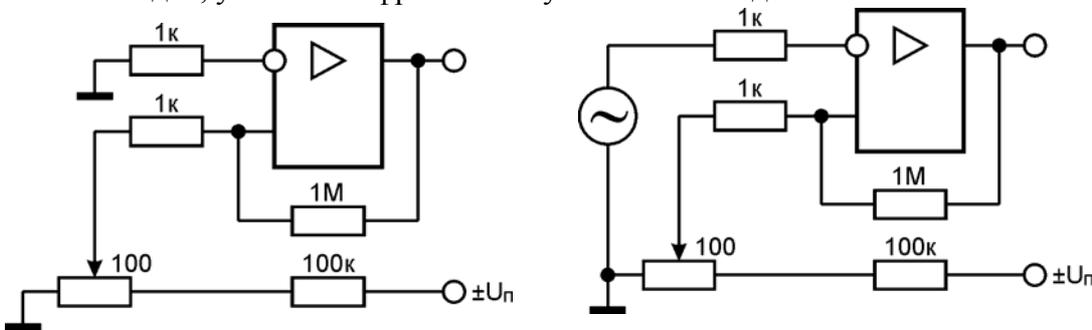
3. Интегратор

В схему по рис.12 установите резисторы $R1 = R3 = 10 \text{ кОм}$, $R2 = 1 \text{ МОм}$, оставив $C2 = 0.1 \text{ мкФ}$ и цепь балансировки без изменений. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ. Подайте на вход через $C1 = 0.47 \text{ мкФ}$ прямоугольный сигнал со скважностью 2 (меандр) амплитудой 5 В, частотой 1 кГц. Сигнал на выходе должен иметь треугольную форму с хорошей линейностью. Измените $R2 = 100 \text{ кОм}$. Объясните изменение амплитуды.

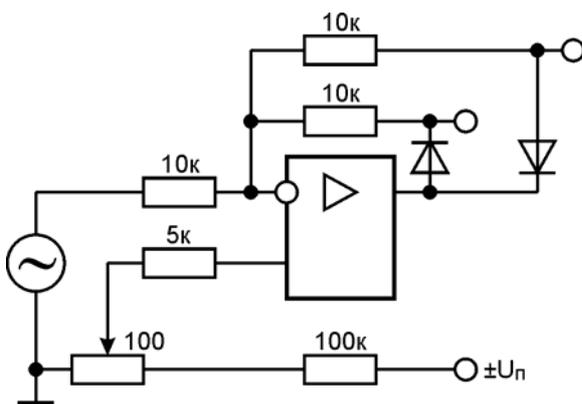


4. Компаратор с гистерезисом

Соберите схему по рис.13. $R1 = R3 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = 1 \text{ МОм}$. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ. Подайте на вход синусоидальный сигнал амплитудой 100 мВ, частотой 500 Гц. Вращая резистор $Rп$, получите на выходе сигналы различной скважности. В режиме большого входного сигнала ($U_{вх} \sim 1-3 \text{ В}$), частота 64 кГц, определите скорость нарастания выходного напряжения ($dU_{\text{вых}}/dt$). Сравните полученный результат со справочными данными. Подобная схема используется в качестве порогового устройства для подсчета импульсов с амплитудой больше заданного уровня. Положительная ОС предотвращает срабатывание схемы от шумов и наводок, уменьшает фронты импульсов на выходе.



5. Прецизионный выпрямитель

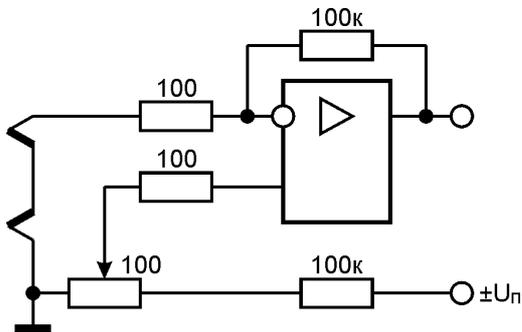


Соберите схему по рис.10а (цепь балансировки можно не ставить, так как смещение микросхемы ТСА0372DP1 очень мало). Резисторы взять по 10 кОм. Подавая на вход синусоидальный сигнал различной амплитуды и частоты, наблюдайте сигнал на обоих выходах. Определите минимальную амплитуду сигнала на частоте 1 кГц и верхнюю частоту сигнала с амплитудой 1 В, при которых форма сигнала на выходе визуально не отличается от рис.10б.

6. Измерение малых сопротивлений

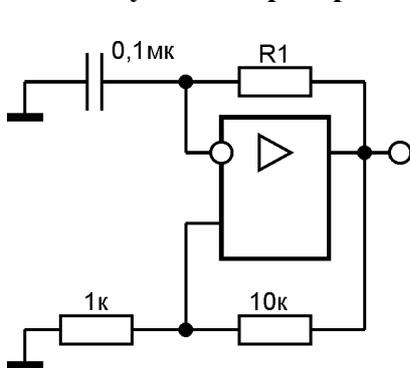
С помощью ОУ можно простыми средствами измерить сопротивления (шунты). Соберите схему по рис.14. К точкам А и Б подключите R_x . Соединив концы R_x , сбалансируйте ОУ. Измерив $U_{\text{вых}}$, вычислите R_x .

7. Измерение э.д.с. термопары



Подключите термопару и сбалансируйте ОУ. При этом оба переключателя температуры должны быть в положении 30°C . Затем включите тумблер « $30^{\circ}\text{C}/90^{\circ}\text{C}$ » в положение 90°C . Измерьте напряжение на выходе ОУ. Вычислите э.д.с. термопары. Сравните полученное значение термо-э.д.с. с табличными данными.

8. Мультивибратор.



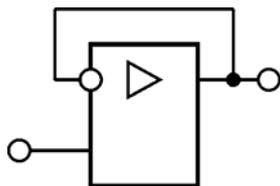
$$\beta_n = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$T = 2 \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Рассчитайте времена для двух сопротивлений $R_1 = 100 \text{ кОм}$, а затем $R_1 = 1 \text{ МОм}$. Сравните полученные периоды с реальными периодами наблюдаемыми на осциллографе. $R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_4 = 10 \text{ кОм}$, $C_1 = 0.1 \text{ мкФ}$.

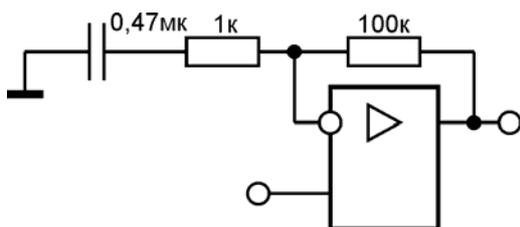
9. Повторитель – генератор напряжения.

$$K_U = 1$$



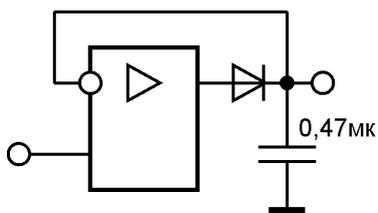
10. Усилитель переменного сигнала с большим входным сопротивлением.

Данная схема не усиливает напряжение смещения.

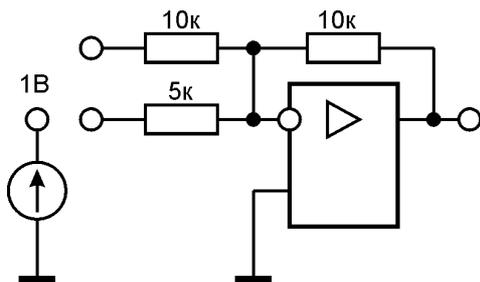


11. Активный пиковый детектор.

Использовать высокоомные измерительные приборы.



12. Аналоговый сумматор (ЦАП).



Литература

1. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС. Руководство по анализу и расчету, М.: Мир, 1992.
2. Остапенко Г.С. Усилительные устройства: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1989.
3. Алексенко А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых схем, М.: Радио и связь, 1985.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1, М.: Мир, 1984.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982.
6. Мячин Ю.А. 180 аналоговых микросхем: Справочник. М.: Патриот, 1993.

Справочные данные некоторых ОУ

Тип ОУ	Вход	K_0 , тыс.	$U_{см}$, мВ	$\Delta U_{см}/\Delta T$ мкВ/°С	$I_{вх}$, нА $\Delta I_{вх}$	f_1 , МГц	$dU_{вых}/dt$ В/мкс	$K_{сф}$ дБ	$\Delta U_{вых}$ В	$R_{вых}$, Ом $I_{вых}$, мА	$I_{пот}$, мА	$U_{п ном}$ Диап.
140УД1Б	БП	1÷12	7	20	8000 1500	8	0.8	60	+6.7/ -5.0	700 2.5	8	12.6
140УД5Б	БП	2.5	5	6	6000 3600	14	6	60	+6.4/ -4.0	700 3	13	12 6÷13
140УД7Б	БП	45	10	50	550 200	0.8 вк	0.3	70	10	150 20/кз	3.5	15 5÷20
140УД708	БП	30	6	300	400 200	0.8 вк	0.3	70	10.5	200 20/кз	3.5	15 5÷17
140УД8А	ПТ	50	20	50	0.2 0.15	1 вк	5	64	10	200 -	5	15 5÷18
140УД24	МОП	1000	0.005	0.05	0.01 0.005	1	2.5	120	4.7	- -	3.5	5 2.5÷8
544УД1А	ПТ	100	15	20	0.05 0.02	1 вк	5	80	10	200 -	3.5	15 7÷17
544УД2Б	ПТ	10	50	100	0.5 0.5	15	20	70	10	200 8	7	15 5÷17
551УД1А	БП	500	1.5	10	150 20	0.8	0.01	100	5	- 5	5	15 5÷17
К553УД2	БП	20	7.5	20	1500 500	1	0.5	70	10	300 -	6	15 5÷20

вк – внутренняя коррекция; **кз** – защита от короткого замыкания на выходе.