

## Лабораторная работа 6.

### 1 часть работы

#### Цель работы: Моделирование работы усилителя переменного тока

Используем стандартный двухкаскадный транзисторный усилитель. Воспользуемся схемой усилителя в программе EWB, показанной на рис. 1. Посмотрим, как ведет себя усилитель при приближении частоты входного сигнала к нулю. Для этого используем источник переменного напряжения E1 с действующим значением напряжения  $V_1 = 10$  мВ и, начиная со 100 Гц, будем уменьшать в 10 раз частоту сигнала и фиксировать показания вольтметра V2, подключенного к выходу усилителя. Оба вольтметра должны быть переключены на измерения переменного напряжения (AC). Вначале показания вольтметра V2 существенно меняться не будут (надо только выждать некоторое время для установления показаний и не забывать производить перезапуск моделирования), но, пройдя «герцовый» диапазон, мы заметим, что начнется резкий спад выходного сигнала. Если вначале при 10 мВ на входе напряжение на выходе равно около 3,3 В, то при 0,1 Гц оно составляет всего лишь 24 мВ (чтобы получить эти показания надо не прерывать режима моделирования почти 6 мин). При частоте 0,001 Гц на выходе фиксируются микровольты.

Этот характерный срез АЧХ в инфразвуковой области частот можно также зафиксировать на Боди-плоттере. Здесь наглядно видно как усилитель ослабляет входной сигнал и превращается в аттенуатор. Такое поведение усилителя действительно и для ультравысоких частот.

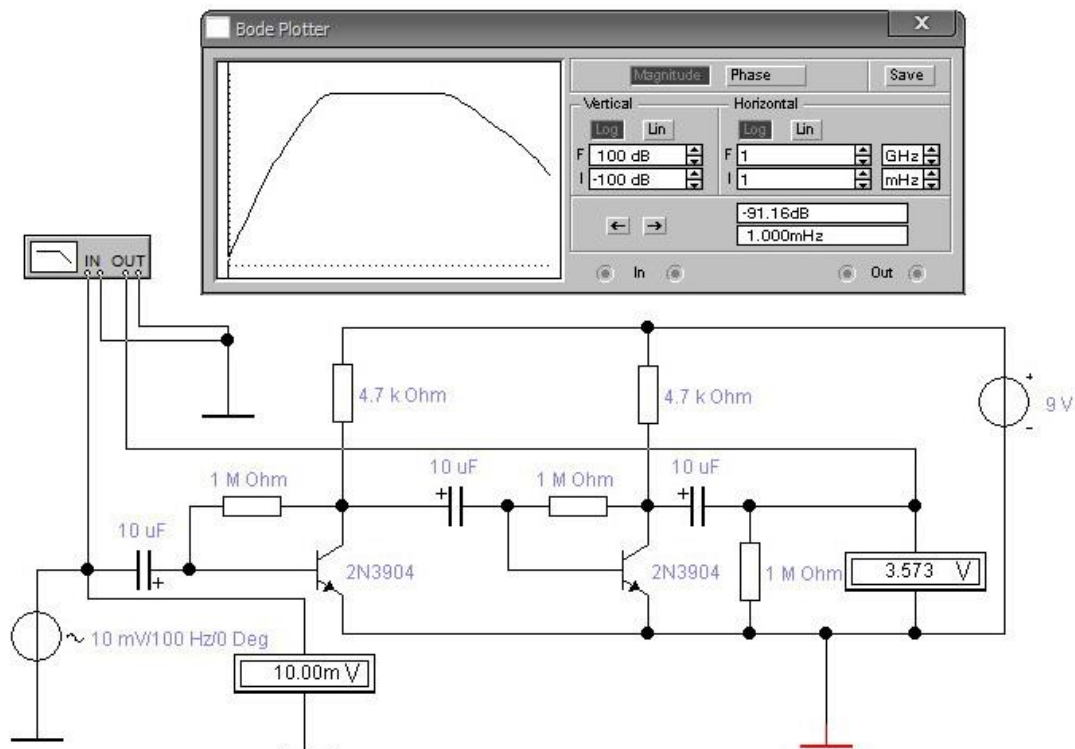


Рис. 1. Моделирование работы усилителя на низких частотах

#### ЗАДАНИЕ:

- исследовать работу УНЧ
- снять шесть показаний вольтметров при частоте входного сигнала 1000 Гц, 100 Гц, 1 Гц, 0,1 Гц, 0,01 Гц, 0,001 Гц

- построить АЧХ усилителя
- рассчитать коэффициент усиления

## 2 часть работы

### Исследование УПТ на операционных усилителях (EWB)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** состоит в ознакомлении с характеристиками и параметрами операционных усилителей и исследовании их применения в качестве линейных устройств.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Операционным усилителем (ОУ) – называют усилитель постоянного тока, имеющий дифференциальный вход и общий выход, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными сигналами в схемах с обратными связями. В настоящее время ОУ, изготовленные по интегральной технологии, являются самыми универсальными и массовыми элементами, а благодаря разнообразным внешним обратным связям позволяют создавать устройства самого различного функционального назначения (усилители, сумматоры, компараторы, фильтры, дифференциаторы, интеграторы и т.д.).

На [рис.1.1](#) приведено условное обозначение ОУ и его схема включения по постоянному току. Как следует из [рис.1.1](#) он имеет два входа и один выход. Вход ( $U_{ВХ-}$ ), напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180 (противофазно) относительно выходного напряжения называют инвертирующим и обозначают кружком. Второй вход ( $U_{ВХ+}$ ) – неинвертирующим, т.к.

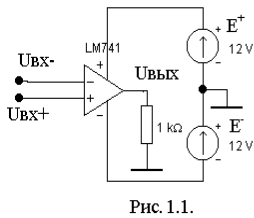


Рис. 1.1.

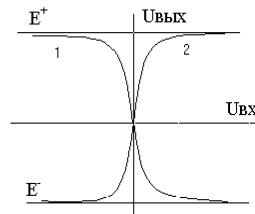


Рис.1.2.

напряжение на нем и выходное совпадают по фазе. ОУ обычно имеет двухполярное питание, а выводы к которым оно подключается обозначены  $U_{ип-}$  и  $U_{ип+}$ . Кроме того он может иметь вспомогательные выводы для подключения элементов частотной коррекции и балансировки выходного напряжения. ОУ считается сбалансированным когда выполняется условие:  $U_{ВЫХ} = 0$ , когда  $U_{ВХ} = 0$ .

Входные ( $U_{ВХ+}$ ,  $U_{ВХ-}$ ) и выходное ( $U_{ВЫХ}$ ) напряжения ОУ связаны соотношением:

$$U_{ВЫХ} = K_{ОУ} (U_{ВХ+} - U_{ВХ-}), \quad (1)$$

где  $K_{ОУ}$  – коэффициент усиления операционного усилителя.

В связи с тем, что  $K_{ОУ}$  достаточно велик ( $10^5 - 10^6$ ), схемы на ОУ работают в линейном режиме только при введении отрицательной обратной связи.

Параметры ОУ можно разделить на следующие группы:

*Входные параметры, определяемые свойствами входного дифференциального каскада:*

- напряжение смещения нуля  $U_{см}$ , значение которого определяется неидентичностью напряжений  $U_{бэ0}$  транзисторов входного дифференциального каскада, и его температурный дрейф  $\Delta U_{см} \Delta T$ ;
- входной ток инвертирующего  $I_{ВХ}$  и неинвертирующего входа  $I_{ВХ+}$ , а также средний  $I_{ВХ.ср}$  и разностный  $I_{ВХ.разн}$  входной ток (ток баз транзисторов в режиме покоя

входного дифференциального каскада) и температурный дрейф разностного входного тока  $\Delta I_{\text{вх.разн}} / \Delta T$ ;

- максимальное входное дифференциальное  $U_{\text{вх.диф. макс}}$  и синфазное  $U_{\text{вх.сф. макс}}$  напряжения;
- входное дифференциальное сопротивление  $R_{\text{вх.оу}}$ , т.е. сопротивление между входами ОУ для малого дифференциального входного сигнала, при котором сохраняется линейность выходного напряжения;
- входное синфазное сопротивление  $R_{\text{вх.сф.}}$ , т.е. сопротивление, равное отношению напряжения, поданного на оба входа ОУ, к току входов.

#### Передаточные параметры:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_{\text{оу}}$  определяемый отношением изменения выходного напряжения к вызвавшему это изменение дифференциальному входному сигналу  $K_{\text{оу}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх.диф}}$ ;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{\text{осс}}$  определяемый отношением коэффициента усиления дифференциального сигнала в схеме на ОУ к коэффициенту усиления синфазного сигнала  $K_{\text{осс}} = K_{\text{оу}} / K_{\text{оу.сф}}$ . Он характеризует способность ослаблять (не усиливать) сигналы, приложенные к обоим входам одновременно;

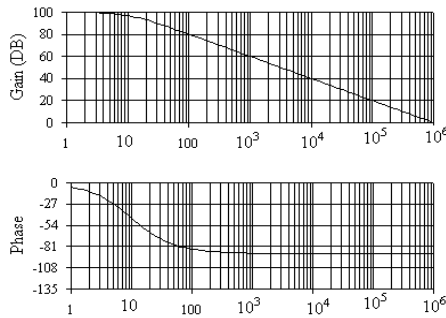


Рис. 1.9.

- граничная частота  $f_{\text{гр}}$  – частота на которой коэффициент усиления уменьшается в  $(1/2)^{1/2}$  раз по отношению к максимальному значению коэффициента усиления. Эта частота соответствует уменьшению коэффициента усиления на  $-3\text{дБ}$ , при задании коэффициента усиления в логарифмическом масштабе. Для ОУ АЧХ коэффициента усиления которого

приведена на рис. 1.9 граничная частота  $f_{\text{гр}} = 10\text{Гц}$ ;

- частота единичного усиления  $f_1$  т. е. частота, при которой  $K_{\text{оу}} = 1$ . Для ОУ АЧХ коэффициента усиления которого приведена на рис. 1.9 частота единичного усиления  $f_1 = 10^6\text{Гц}$ . Граничная частота  $f_{\text{гр}}$ , частота единичного усиления  $f_1$  и коэффициент усиления по напряжению  $K_{\text{оу}}$  для ОУ с внутренней коррекцией связаны соотношением  $f_1 = f_{\text{гр}} K_{\text{оу}}$ .
- запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления  $\varphi_{\text{зап}}$ , характеризует устойчивость ОУ.  $\varphi_{\text{зап}} = 180^\circ - |\varphi_1|$ , где  $\varphi_1$  – фазовый сдвиг на частоте  $f_1$ . Положительный запас устойчивости по фазе является показателем устойчивости ОУ. Для получения максимально быстрого отклика на импульсный входной сигнал и одновременно исключения звона или неустойчивости желательно иметь запас устойчивости по фазе порядка  $45^\circ$ . Для ОУ фазово-частотная характеристика, которого приведена на рис. 1.9  $\varphi_1 = 90^\circ$ , а  $\varphi_{\text{зап}} = 90^\circ$ .

#### Выходные параметры, определяемые свойствами выходного каскада ОУ:

- выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ ;
- максимальный выходной ток  $I_{\text{вых. макс}}$ , измеряемый при максимальном выходном напряжении, или минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н. мин}}$ ;
- максимальное выходное напряжение в диапазоне линейного усиления. Для большинства типов ОУ величина  $U_{\text{вых. макс}} = (E_{\text{п}} - 1,5)\text{В}$ , что составляет примерно - 10 В.

#### Переходные параметры:

- скорость нарастания выходного напряжения  $V_{u.вых}$ - максимальная скорость изменения во времени напряжения на выходе ОУ (В/мкс) при подаче на вход большого сигнала;
- время установления выходного напряжения  $t_{уст}$  время за которое выходное напряжение достигает свое стационарное значение с заданной точностью.

#### Параметры цепи питания:

- напряжение питания  $\pm E_{п}$  ;
- потребляемый ток  $I_{пот}$  .
- потребляемая мощность. Мощность (без нагрузки) потребляемая операционным усилителем.

Важной характеристикой ОУ является его амплитудная (передаточная) характеристика. Она приведена на рис. 1.2 –  $U_{вых} = f(U_{вх+}, U_{вх-})$ . Кривая 1 соответствует выходному напряжению при входном напряжении на инвертирующем входе и нулевом напряжении на неинвертирующем входе, т.е.  $U_{вых} = f(U_{вх-})|_{U_{вх+} = 0}$  . Кривая 2 –  $U_{вых} = f(U_{вх+})|_{U_{вх-} = 0}$  . По амплитудной характеристике можно определить  $K_{оу} = U_{вых}/U_{вх}$  , и  $U_{см}$  – напряжение смещения – это постоянное напряжение на входе при котором выходное напряжение равно нулю, т.е. ОУ - сбалансирован,  $U_{сдв}$  – напряжение сдвига - это постоянное напряжение на входе, когда  $U_{вх-} = U_{вх+} = 0$ . Типовые значения:  $K_{оу} = 10^4, 10^7$  ;  $U_{см} = 5...20$  мВ.

При упрощенном анализе схем, содержащих ОУ, удобно пользоваться понятием "идеального ОУ", для которого:

1.  $K_{оу} = \infty$  ;
2.  $R_{вх}$  – входное сопротивление =  $\infty$  ;
3.  $R_{вых}$  – выходное сопротивление = 0 Ом;
4.  $U_{вых} = 0$  при  $U_{вх-} = U_{вх+} = 0$  т.е. ОУ сбалансирован;
5.  $\Delta f$  – диапазон усиливаемых частот =  $\infty$ ;
6.  $I_{вх}$  – входной ток 0А.

Из параметров идеального ОУ следует, что его входы виртуально замкнуты т.е.  $U_{вх-} = U_{вх+}$  , а  $R_{вх} = \infty$ . Это утверждение следует из того, что при  $K_{оу} = \infty$  напряжение  $U_{вых} = K_{оу} (U_{вх+} - U_{вх-})$  всегда конечно и по значению меньше напряжения питания  $E_{п}$  , что может иметь место только в том случае когда выполняется условие  $(U_{вх+} - U_{вх-}) = 0$  или  $(U_{вх+} = -U_{вх-})$ .

Реально идеальных ОУ не существует. Однако параметры реальных ОУ, с точки зрения погрешностей создаваемых ими, близки к идеальным. Это позволяет использовать понятие идеального ОУ, что существенно упрощает анализ схем, содержащих ОУ. В действительности при расчете схем содержащих ОУ следует учитывать конечные значения  $R_{вх оу}$  ,  $R_{вых оу}$  и полосы пропускания. Так номиналы резисторов, подключаемые к выводам ОУ, должны удовлетворять очевидным неравенствам

$$R_{min} \geq 10 R_{вых оу} , R_{max} \leq R_{вх оу}/10.$$

Параметры некоторых типов ОУ могут изменяться за счет введения частотной коррекции и токового программирования. Частотная коррекция может быть введена в схему ОУ при его изготовлении. Это, так, называемые ОУ с внутренней коррекцией. На рис. 1.9, приведена АЧХ ОУ с внутренней коррекцией. Как известно, такая форма АЧХ обеспечивает устойчивость схем на ОУ при любом требуемом коэффициенте усиления, что достигается за счет существенного ухудшения частотных свойств ОУ. В случае широкого спектра усиливаемого сигнала частотные свойства ОУ накладывают ограничения на значение коэффициента усиления, который можно получить в схеме

усилителя, используя данный ОУ. Использование внешних корректирующих элементов позволяет, как правило, обеспечить устойчивую работу ОУ в требуемом диапазоне изменения коэффициента усиления при меньшем ухудшении частотных свойств, но приводит к усложнению схемы усилителя.

### ***Дифференциальный усилитель (усилитель разности)***

Это усилитель в котором выходное напряжение пропорционально разности входных сигналов  $U_{вх2}$  и  $U_{вх1}$ . Установим связь между входными и выходными сигналами этой схемы, учитывая что  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$ . Поскольку для идеального ОУ  $U_{вх-} = U_{вх+} = U_2 R_4 / (R_2 + R_4)$  и  $I_{вх} = I_{ос}$ , где  $I_{вх} = (U_{вх+} - U_{вх-}) / R_3$ , то выражение связывающее выходное и входное напряжения примет вид

$$U_{вых} = R_4 / R_2 (U_{вх2} - U_{вх1}) . \quad (6)$$

Идеальный разностный усилитель при подаче на оба входа одинаковых напряжений, т.е.  $U_{вх1} = U_{вх2}$ , имеет на выходе напряжение равное нулю. Такие входные напряжения называются синфазными  $U_{сф}$ . В общем случае синфазный сигнал представляет собой среднее значение двух входных напряжений, т.е.  $U_{сф} = (U_{вх1} + U_{вх2}) / 2$ . Если  $U_{вх1} = -U_{вх2}$ , то  $U_{сф} = 0$ .

Разность двух входных напряжений называется дифференциальным сигналом  $U_{дс} = U_{вх2} - U_{вх1}$ . Поскольку усилитель разности усиливает только разностный (дифференциальный) сигнал, то такой усилитель часто называют дифференциальным усилителем.

## **2. Задания на экспериментальные исследования и методика их выполнения**

Цель: Исследовать дифференциальный усилитель (усилитель разности сигналов)

Собрать схему усилителя разности сигналов.

1. Зарисовать временные диаграммы входных  $U_{вх1}$ ,  $U_{вх2}$  сигналов, подав на инвертирующий вход  $U_{вх1}$  гармонический сигнал с амплитудой 1В и частотой 50 Гц, а на неинвертирующий вход  $U_{вх2}$  сигнал прямоугольной формы, такой же амплитуды и частоты (Рис.2.1).

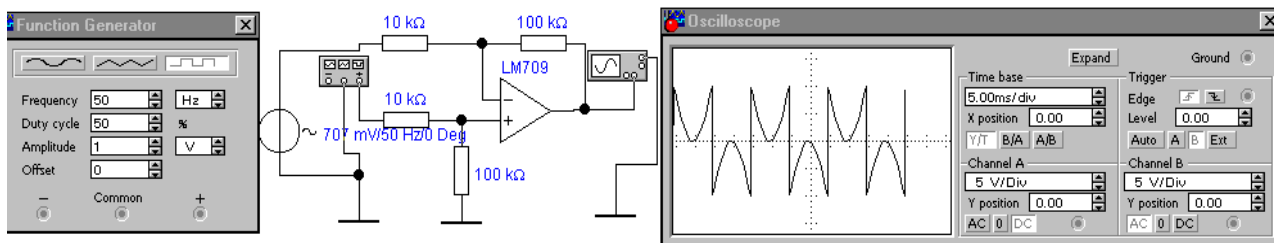


Рис.2.1

Измерения проводить в режиме синхронизации осциллографа от гармонического сигнала.

2. Рассчитать коэффициент ослабления синфазного сигнала.  $K_{осс} = U_{вх} / U_{вых}$ .

Для расчета  $K_{осс}$ , объединив входы усилителя разности и подав на них гармонический сигнал ( $U_m = 1В$ ,  $f = 100 Гц$ ) от генератора, измерить с помощью осциллографа амплитуду входного и выходного сигналов (рис.3.3).

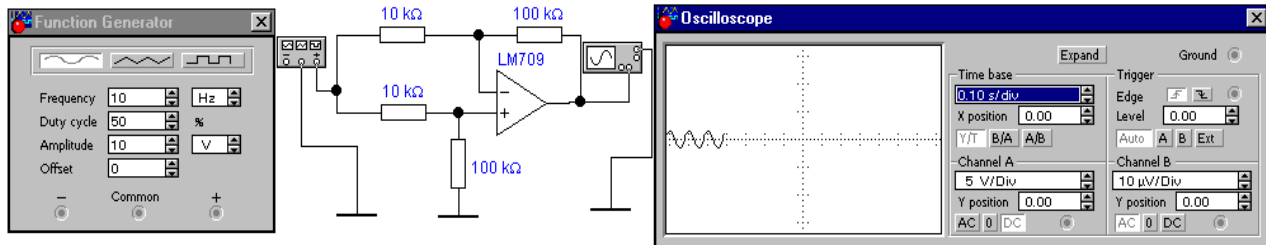


Рис.3.3

Объяснить результат измерения.

### 3. Указания к отчету

Отчет должен содержать:

- 3.1. Заголовок: название работы, N группы, ФИО студента;
- 3.2. Результаты теоретических расчетов и графических построений;
- 3.3. Структурные схемы устройств на основе ОУ исследуемых в заданиях раздела 2;
- 3.4. Результаты измерений, расчеты и графики, выводы.