

БЕСПЛАТНО

2410

Лаб. 22

экз. 59

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.И. КАЛИНИНА

СВОЙСТВА ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Методические указания к лабораторной работе

Ленинград 1986

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.И.КАЛИНИНА

СВОЙСТВА ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Методические указания к лабораторной работе

Ленинград 1986

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов радиотехнического, физико-механического и вечернего электротехнического факультетов, изучающих аналоговые электронные устройства по программам общих курсов, таких как "Основы электротехники и электроники", "Радиозлектронные методы экспериментальной физики", "Основы радиофизики", "Радиозлектроника" и др. Методические указания содержат сведения о свойствах операционных усилителей, описание исследуемых устройств, задание и рекомендации по проведению измерений. Рекомендованы к изданию кафедрой радиофизики и методической комиссией радиотехнического факультета.

Составители: Крий Николаевич Новиков,
Виктор Никитич Умцкий

СВОЙСТВА ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ
Методические указания к лабораторной работе

Научный редактор В.А.Розов
Редактор С.А.Мартынова
Технический редактор А.И.Колсдажная

Подписано к печати 11.11.85. Формат бумаги 60 × 90 $\frac{1}{16}$.
Бумага тип. №3. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Уч.- изд. л. 1,5.
Тираж 700. Заказ 29. Бесплатно.
Издание ЛПИ им. М.И.Калинина, 195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

Отпечатано на ротапринтере ЛПИ им. М.И.Калинина.
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

Операционный усилитель (ОУ) - это универсальный усилитель, обладающий очень высоким коэффициентом усиления напряжения (сотни тысяч) в полосе частот, начинающейся с нулевой частоты. ОУ имеет высокое входное сопротивление (сотни килоом) и низкое выходное (десятки ом). Операционный усилитель выполняется в виде монолитной интегральной микросхемы и обычно состоит из входного дифференциального усилителя, последующих каскадов усиления, цепей сдвига постоянных уровней и выходного усилителя. Благодаря почти идеальным усилительным свойствам, малым габаритам и доступной цене ОУ получает все более широкое применение в аналоговых электронных устройствах разнообразного назначения. В лабораторной работе исследуются свойства универсального ОУ, а также собранных на его основе устройств.

Целью лабораторной работы является углубление знаний о свойствах типовых операционных усилителей и о принципах построения аналоговых электронных устройств на их основе; приобретение навыков измерения и оценки параметров ОУ.

Работа выполняется на лабораторном макете, в плату которого вмонтирован операционный усилитель. К нему с внутренней стороны платы подключены источники постоянных напряжений +15 В и -15 В. Все устройства, которые требуется исследовать в процессе лабораторной работы, собираются включением резисторов и конденсаторов в гнезда, расположенные на плате. На рабочем месте имеется принципиальная схема исследуемого операционного усилителя и приводятся его паспортные данные. Для исследований используются следующие приборы: генератор синусоидальных колебаний, осциллограф, милливольтметры переменного напряжения, генератор прямоугольных импульсов. Все они снабжены краткими инструкциями по применению.

Программа лабораторной работы состоит из двух частей.

В первой части изучаются свойства типового операционного усилителя: исследуются его усилительные свойства в широком частотном диапазоне, вплоть до частоты, на которой коэффициент усиления ОУ падает до единицы; изучаются нелинейные искажения; измеряются входные токи и напряжение смещения - параметры, определяющие уровень "паразитного" напряжения на выходе ОУ при нулевой напряженности на входе. Измеренные параметры сопоставляются с паспортными данными.

Во второй части работы изучаются устройства, собранные на основе

операционного усилителя: исследуется неинвертирующий усилитель (частотный и динамический диапазон усиления при различных параметрах схемы); исследуется инвертирующий усилитель в режиме усиления постоянного напряжения; изучается функциональная связь выходного и входного напряжений для логарифмического и экспоненциального усилителей; анализируется работа усилителя, суммирующего напряжения, подводимые к различным входам.

Для подготовки к лабораторной работе необходимо изучить данные методические указания в полном объеме. Работа выполняется в соответствии с заданием, (см. страницу 19). Там же содержатся рекомендации по проведению конкретных измерений. После выполнения программы лабораторной работы составляется отчет, в котором приводятся схемы измерений, результаты расчетов и измерений в виде графиков, осциллограмм, численных значений. Отчет заканчивается выводами, в которых объясняются полученные результаты.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ

Операционный усилитель. Понятие идеального усилителя

Изображение и параметры ОУ. Условное графическое изображение операционного усилителя приведено на рис.1.

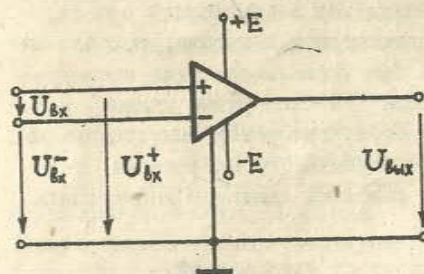


Рис.1. Изображение операционного усилителя на схемах

Операционный усилитель имеет выходной вывод (несимметричный выход) и два входа: инвертирующий (помечен знаком "минус") и неинвертирующий (помечен знаком "плюс"). Названия входов связаны с тем, что в области низких частот выходное напряжение совпадает по фазе с напряжением, приложенным к неинвертирующему входу, и противоположно (инверсно) по фазе напряжению, приложенному к инвертирующему входу. Операционный

усилитель имеет также выводы для подключения источников питания и соединения с корпусом, выводы для подсоединения цепей коррекции. На схемах обычно указывают только входы и выход ОУ.

Важнейшим параметром, характеризующим усилительные свойства ОУ, является собственный коэффициент усиления K_U , называемый также

дифференциальным. Он равен отношению приращений выходного напряжения $U_{вых}$ и разностного $U_{вх} = U_{вх}^+ - U_{вх}^-$:

$$K_U = U_{вых} / U_{вх}$$

(Для синусоидальных колебаний $U_{вых}$ и $U_{вх}$ имеет смысл амплитудных значений). Коэффициент K_U типичных операционных усилителей имеет в области низких частот очень большое числовое значение. Так, для ОУ широкого назначения типа 153УД2 согласно справочным данным $K_U > 5 \cdot 10^4$. Зависимость напряжения на выходе от напряжения на входе (передаточная характеристика) для этого случая изображена на рис.2. Из рисунка видно, что линейный режим усиления возможен лишь при выполнении условия: $|U_{вх}| < 200$ мкВ.

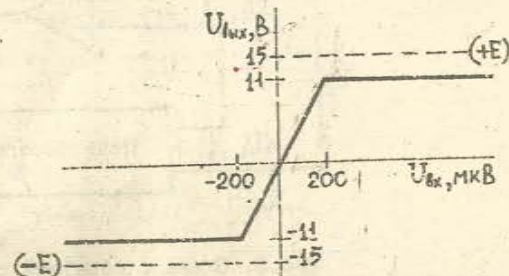


Рис.2. Передаточная характеристика ОУ 153УД2

Поскольку коэффициент усиления типовых ОУ очень велик, то при анализе электронных устройств успешно используется понятие идеального усилителя.

Идеальный ОУ характеризуется бесконечно большим собственным коэффициентом усиления ($K_U \rightarrow \infty$) и нулевыми токами на входах: $I_{вх}^+ = I_{вх}^- = 0$. Как следствие бесконечно большого усиления и конечного значения напряжения на выходе для идеального ОУ получается нулевое входное напряжение ($U_{вх} \approx 0$). Такая идеализация в значительной степени облегчает, с одной стороны, анализ функционирования и расчет характеристик конкретных устройств, с другой стороны, — их проектирование на основе заданного функционального описания.

Инвертирующий и неинвертирующий усилители. В устройствах на операционных усилителях часто используется отрицательная обратная связь. Это позволяет обеспечить стабильность и повторяемость характеристик устройств даже при значительном разбросе параметров ОУ. Действительно, при высоком коэффициенте усиления операционного усилителя функциональные свойства устройства определяются в основном свойствами цепи обратной связи, постоянство параметров которой обеспечить несложно. На рис.3 показан пример построения схем с цепью обратной связи, подключенной к инвертирующему входу ОУ. В этом случае коэффициент усиления $K = U_{вых} / U_c$ может быть выражен через собственный коэффициент усиления K_U и коэффициент

передачи цепи обратной связи β . Из рисунка видно, что

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_c} = \frac{U_{\text{вых}}}{(U_{\text{вх}} + \beta U_{\text{вых}})} = \frac{K_U}{1 + \beta K_U} \quad (1)$$

Если $\beta K_U \gg 1$, то

$$K \approx 1/\beta \quad (2)$$

и не зависит от K_U . Следовательно, чем больше собственный коэффициент усиления K_U , тем в меньшей степени характеристики устройства, построенных на нем, зависят от паспортных данных конкретных микросхем.

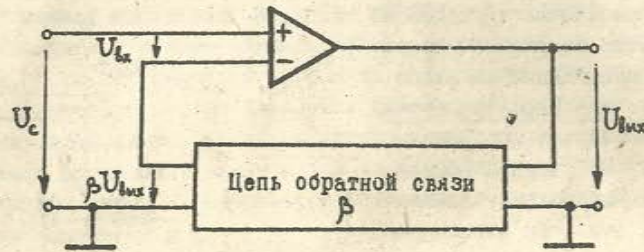


Рис.3. Схема с обратной связью, подводимой к инвертирующему входу

Если в качестве цепи обратной связи использовать простейший делитель напряжения на резисторах и производить операцию вычитания напряжений, используя разные входы ОУ, то можно построить неинвертирующий усилитель (рис.4). Предположение о том, что $I_{\text{вх}} = 0$, позволяет записать для него

$$\beta = \frac{R_\alpha}{R_\alpha + R_\beta} \implies K = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_\beta}{R_\alpha}$$

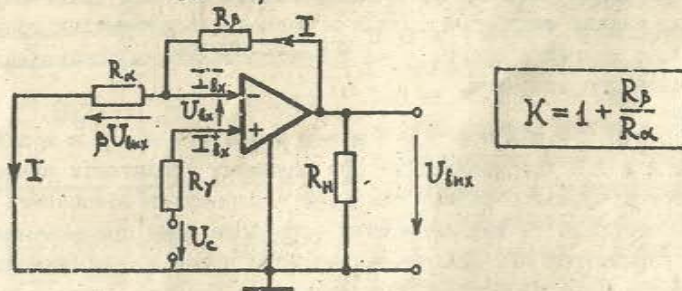


Рис.4. Неинвертирующий усилитель: R_α, R_β - делитель цепи обратной связи; R_n, R_γ - сопротивления нагрузки и источника

При выводе выражения для коэффициента усиления можно было не пользоваться формулой (2), а учесть, что $U_{\text{вх}} = 0$, $I_{\text{вх}}^+ = I_{\text{вх}}^- = 0$. Тогда получается:

$$U_{\text{вых}} = I(R_\alpha + R_\beta); \quad U_c = IR_\alpha \implies K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_c} = 1 + \frac{R_\beta}{R_\alpha}$$

Входное сопротивление неизвертирующего усилителя бесконечно большое, поскольку $I_{\text{вх}}^+ = 0$. Сопротивления R_n и R_γ на свойства усилителя в рассматриваемом приближении не влияют. При $R_\beta = 0$ или $R_\alpha = \infty$ коэффициент $K = 1$. Такое устройство называется повторителем.

На ОУ может быть построен инвертирующий усилитель (рис.5).

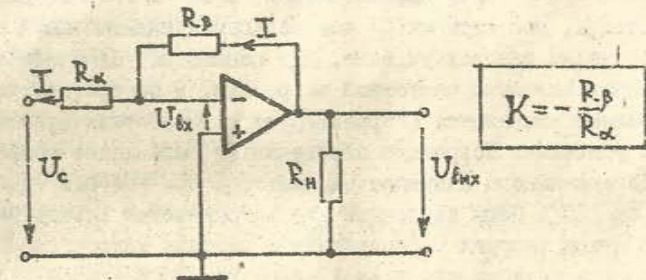


Рис.5. Инвертирующий усилитель: R_α, R_β - цепь обратной связи; R_n - сопротивление нагрузки

В приближении идеального ОУ можно записать

$$U_{\text{вых}} = IR_\beta; \quad U_c = -IR_\alpha \implies K = -\frac{R_\beta}{R_\alpha}$$

Входное сопротивление усилителя равно R_α .

Свойства типового операционного усилителя

Собственный коэффициент усиления. В лабораторной работе исследуются некоторые параметры типового ОУ широкого назначения. Это позволяет оценить близость свойств реального усилителя идеалу, а также представить границы, в пределах которых допустимо пользоваться понятием идеального ОУ. В частности, коэффициент усиления реального усилителя для постоянного или медленно изменяющегося напряжения имеет очень высокое значение, однако при увеличении частоты коэффициент усиления падает. Для описания частотных свойств ОУ вводится понятие комплексного собственного коэффициента усиления K_U .

равного отношению комплексных амплитуд гармонического напряжения на выходе и входе ОУ:

$$\dot{K}_V = \dot{U}_{\text{вых}} / \dot{U}_{\text{вх}}$$

Частотные свойства ОУ описываются амплитудно-частотной характеристикой - зависимостью модуля коэффициента усиления от частоты, и фазо-частотной характеристикой - зависимостью аргумента коэффициента усиления от частоты.

Вследствие многокаскадной структуры и наличия паразитных емкостей напряжение на выходе ОУ сдвигается по фазе относительно входного. Этот фазовый сдвиг растет по мере увеличения частоты и может приводить к самовозбуждению. Действительно, если внутренний набег фазы в операционном усилителе приближается к 180° , то обратная связь вместо отрицательной может стать положительной. Если к тому же это происходит на частотах, при которых ОУ еще обладает усилительными свойствами, то происходит самовозбуждение. Для повышения устойчивости применяются специальные цепи частотной коррекции. В результате подключения их к микросхеме изменяется (корректируется) частотная зависимость коэффициента усиления. Коррекция обеспечивает уменьшение коэффициента усиления до единичного значения на частоте, при которой сдвиг по фазе еще далек от 180° . Цепи коррекции или встраиваются внутрь микросхемы, или подключаются снаружи к определенным выводам микросхем. Схемы цепей частотной коррекции для каждой микросхемы приводятся в справочниках.

Для операционных усилителей при наличии коррекции зависимость коэффициента усиления от частоты имеет вид

$$\dot{K}_V = \frac{K_0}{1 + j(f/f_0)} \quad (3)$$

где $K_0 = \lim_{f \rightarrow 0} K_V$ - коэффициент усиления по напряжению на нулевой частоте; K_V - обозначение модуля коэффициента усиления ($K_V = |\dot{K}_V|$); f_0 - верхняя частота среза. На частоте среза модуль коэффициента усиления уменьшается по отношению к K_0 в $\sqrt{2}$ раз или на 3 децибелла:

$$\frac{K_V(f_0)}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{или} \quad 20 \lg \left(\frac{K_V(f_0)}{K_0} \right) = -3 \text{ дБ.}$$

При $f \gg f_0$ модуль коэффициента усиления обратно пропорционален частоте:

$$K_V = f_0 K_0 \cdot \frac{1}{f}$$

Как видно из этой формулы, произведение коэффициента усиления на частоту является постоянной величиной, численно равной частоте единичного усиления f_1 :

$$K_V \cdot f = K_0 \cdot f_0 = 1 \cdot f_1 \quad (4)$$

Частота f_1 , на которой K_V становится равным единице, приводится в паспортных данных ОУ (для ОУ 153УД2 с коррекцией $f_1 = 1$ МГц). На основании (4) можно оценить значение частоты среза:

$$f_0 = f_1 / K_0 \approx \frac{10^6}{5 \cdot 10^4} = 20 \text{ Гц.}$$

Наглядно иллюстрирует частотную зависимость коэффициента усиления амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), построенная в логарифмическом масштабе: по оси ординат линейно откладывается коэффициент усиления, вычисленный в децибеллах ($20 \lg K_V = \bar{K}_V$), по оси абсцисс через равные промежутки откладываются значения частоты:

10^0 Гц, 10^1 Гц, 10^2 Гц, 10^3 Гц

и т.д. Примерный вид АЧХ для типового ОУ приведен на рис. 6. При $f > f_0$ наклон графика составляет 20 децибелл на декаду (20 дБ/дек). Декада - изменение частоты в десять раз.

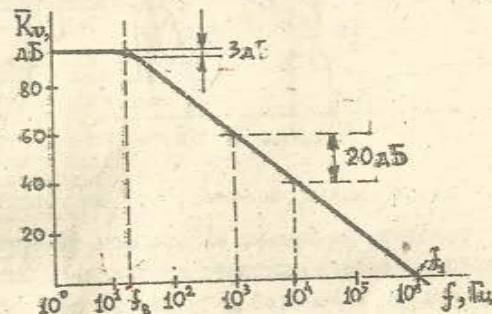


Рис. 6. АЧХ операционного усилителя с коррекцией

Измерение собственного коэффициента усиления ОУ. В лабораторной работе снимается амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя $K_V(f)$. Для этого на ОУ собирается усилитель, охваченный глубокой отрицательной обратной связью. Тем самым удастся обеспечить работу ОУ в режиме линейного усиления. Основная сложность при проведении измерений связана со значительным изменением K_V в диапазоне частот $0 - f_1$. Для измерения K_V в области низких частот используется инвертирующий усилитель, в котором напряжение на вход ОУ подается через делитель с известным коэффициентом деления (рис. 7а). Входное синусоидальное напряжение устанавливается определенной частоты. По результатам показаний милливольтметров вычисляется коэффициент усиления $K_V = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{н}}} (n+1)$.

Если выбрать n около 100, то даже при $K_U = 10^5$ напряжение U_n можно измерить с помощью милливольтметра. В области высоких частот для повышения точности измерений целесообразно уменьшить коэффициент деления

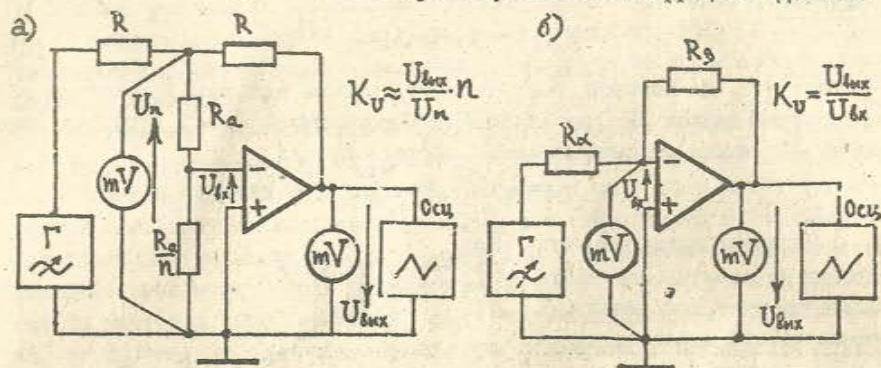


Рис.7. Схемы исследования АЧХ:

а) на низких частотах; б) на высоких частотах

или проводить измерения на обычном инвертирующем усилителе (рис.7,б), замеряя входное и выходное напряжения. Изменяя частоту генератора синусоидальных колебаний до частоты, на которой коэффициент усиления становится равным единице, можно выяснить характер убывания АЧХ, а также определить f_1 . На основании формулы (4) частоту единичного усиления можно найти и по значениям K_U на любой частоте в пределах спадающего участка АЧХ. При измерениях необходимо контролировать форму выходного напряжения. Искажения синусоиды сигнализируют о нарушении линейного режима усиления. В этом случае необходимо уменьшить амплитуду напряжения, подаваемого с генератора.

Нелинейные искажения. Максимальная скорость нарастания. На низкой частоте причиной нелинейных искажений выходного напряжения является ограниченность линейного участка усиления, как это видно из передаточной характеристики (рис.2). При синусоидальном входном напряжении, выходящем за пределы участка линейного усиления, напряжение на выходе имеет вид усеченной синусоиды (рис.8,а).

Если амплитуду сигнала уменьшить, то такие искажения пропадают. Однако по мере увеличения частоты вновь появляются нелинейные искажения, но уже иного рода. Они называются "динамическими" и связаны с тем, что скорость нарастания напряжения на выходе ОУ не может быть

как угодно большой. Поэтому при слишком быстрых изменениях входного напряжения возникают характерные искажения на выходе ОУ. Например, вместо синусоиды получается "пила" (рис.8,б). Форма выходного сигнала определяется тем, что с увеличением частоты из-за появления фазовых набегов обратная связь уже не будет, строго говоря, отрицательной.

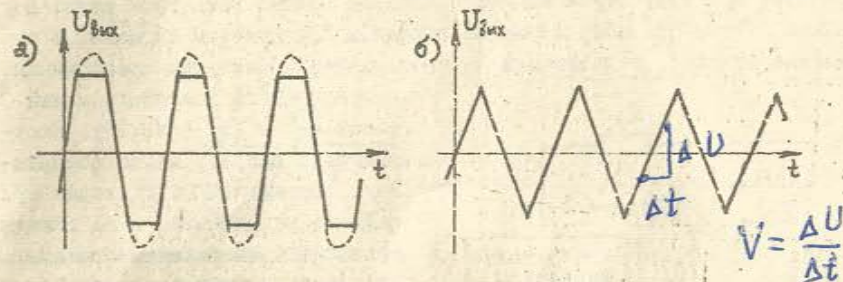


Рис.8. Нелинейные искажения выходного напряжения: а) на низких частотах; б) динамические

Для ОУ в ряду паспортных данных приводится параметр, называемый максимальной скоростью нарастания V . Он указывает предельную допустимую скорость изменения выходного напряжения, при которой ещё отсутствуют динамические искажения. Обычно V имеет значения, составляющие единицы и доли В/мкс. Для ОУ 153УД2 $V = 0,5$ В/мкс. В лабораторной работе производится оценка максимальной скорости нарастания для исследуемого ОУ по искажениям синусоидального напряжения на выходе инвертирующего усилителя (рис.9).

У синусоиды, как известно, максимальная скорость изменения соответствует точке перехода через нуль. Таким образом, для синусоидального выходного напряжения $u_{вых} = U_m \sin(2\pi f t)$ наибольшая скорость изменения

$$\frac{du_{вых}}{dt} \Big|_{max} = 2\pi f U_m$$

зависит от частоты и амплитуды.

При чрезмерном увеличении того или другого синусоида исказится, выходное напряжение станет пилообразным. Чтобы измерить V , следует плавно уменьшать входное напряжение вплоть до уровня, при котором на экране осциллографа, подключенного к выходу, появляется неискаженная синусоида. Измерение ее амплитуды и

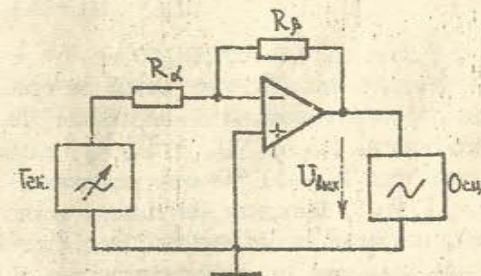


Рис.9. Схема измерения максимальной скорости нарастания

частоты позволяет вычислить максимальную скорость нарастания $V=2\pi fU_m$. Естественно, что результаты измерений по описанной методике зависят от субъективного восприятия формы синусоиды. Опыт целесообразно выполнить многократно на разных частотах.

Входные токи. В приближении идеального ОУ выходное напряжение при отсутствии входного сигнала должно равняться нулю. В реальном ОУ имеется напряжение на выходе и при нулевом сигнале. Его появление связано, в частности, с протеканием по входным проводникам

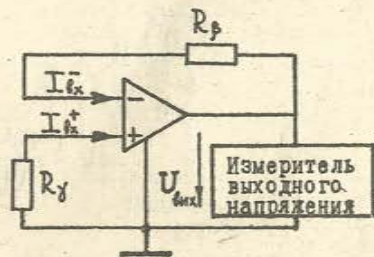


Рис.10. Схема для измерения входных токов

Для типовых ОУ его величина не превышает единиц микроампер. В паспорте ОУ 153УД2 указано, что $I_{вх} < 500$ нА. Разность между численными значениями входных токов

$$\Delta I_{вх} = |I_{вх+} - I_{вх-}|$$

не превышает для ОУ 153УД2 200 нА.

Измерить входные токи можно по схеме, приведенной на рис.10, определяя уровень выходного напряжения. Из схемы видно, что при $R_f = 0$ напряжение на выходе $U_{вых} = -I_{вх+} \cdot R_y$, следовательно, $I_{вх+} = -U_{вых} / R_y$. Аналогично, при $R_y = 0$ удается определить $I_{вх-}$, поскольку в этом случае $U_{вых} = I_{вх-} \cdot R_f$. Выходное напряжение можно измерить с помощью осциллографа, имеющего потенциальный вход. Если входные токи равны или имеют близкие значения, то их влияние можно частично компенсировать подключением к входам ОУ равных сопротивлений. Напряжение на выходе будет в этом случае пропорционально разности входных токов $\Delta I_{вх}$, которую можно измерить по той же схеме при $R_y = R_f = R$: $\Delta I_{вх} = U_{вых} / R$.

Определить значения входных токов можно другим способом - по измерению скорости заряда конденсатора, подключенного к входу ОУ (рис.11)

операционного усилителя малых токов $I_{вх+}$ и $I_{вх-}$ (рис.10). Входные токи создают на сопротивлениях, подключенных к входам ОУ, падение напряжения, и на выходе появляется напряжение ошибки. Значения входных токов приводятся в паспортных данных операционных усилителей. Обычно в справочниках указывается значение усредненного входного тока:

$$I_{вх} = \frac{1}{2} (I_{вх+} + I_{вх-})$$

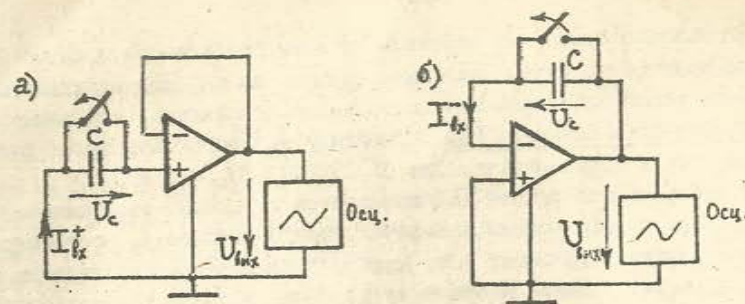


Рис.11. Схемы определения входных токов по измерению скорости заряда конденсатора:
а) $I_{вх-} = C \frac{\Delta U_c}{\Delta t} = -C \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta t}$; б) $I_{вх+} = C \frac{\Delta U_c}{\Delta t} = C \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta t}$.

После отключения замыкающей перемычки начинается заряд конденсатора входным током. Скорость изменения напряжения на емкости, как известно, прямо пропорциональна протекающему через нее току $i_c = C \Delta U_c / \Delta t$. Отсюда ясно, что $I_{вх} = C \frac{\Delta U_c}{\Delta t}$. Поскольку в рассматриваемых схемах $|U_c| = |U_{вых}|$, то для определения входных токов достаточно измерить скорость изменения выходного напряжения при заряде конденсатора. Скорость удобно измерять с помощью осциллографа, экранная сетка которого проградуирована: по вертикали в В/см, по горизонтали в сек/см. При заряде конденсатора светящаяся точка будет двигаться по прямой линии, наклон которой позволяет вычислить скорость изменения выходного напряжения.

Входное напряжение смещения. В схеме, приведенной на рис.12, влияние входных токов исключено, но даже в этом случае выходное напряжение не будет нулевым. Появляющееся напряжение

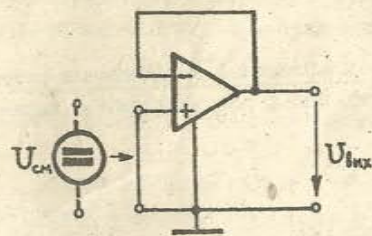


Рис.12. $U_{см}$ - мысленный источник ЭДС в схеме с идеальным операционным усилителем

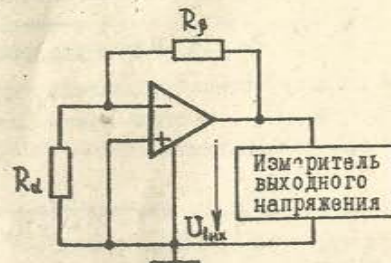


Рис.13. Схема измерения входного напряжения смещения

ошибки вызвано суммарным эффектом от всех разбалансов в схеме ОУ. Этот фактор может быть учтен мысленным включением на вход идеального операционного усилителя источника постоянного напряжения, называемого входным напряжением смещения $U_{см}$. Значение входного напряжения смещения указывается в справочниках. Для ОУ 153УД2 $U_{см} < 5$ мВ.

В лабораторной работе $U_{см}$ измеряется по схеме, изображенной на рис.13. Она подобна схеме неинвертирующего усилителя. Постоянное напряжение ошибки $U_{инх}$ может быть измерено осциллографом, имеющим потенциальный вход. Входное напряжение смещения вычисляется по формуле

$$U_{см} = \frac{U_{инх}}{K} = U_{инх} / (1 + \frac{R_2}{R_1}).$$

Сопротивления R_1 и R_2 выбираются достаточно малыми, чтобы исключить влияние входных токов на результаты измерения $U_{см}$.

Исследование устройств на операционных усилителях

Неинвертирующий усилитель. В лабораторной работе исследуются частотные и передаточные свойства неинвертирующего усилителя, построенного на ОУ (рис.14).

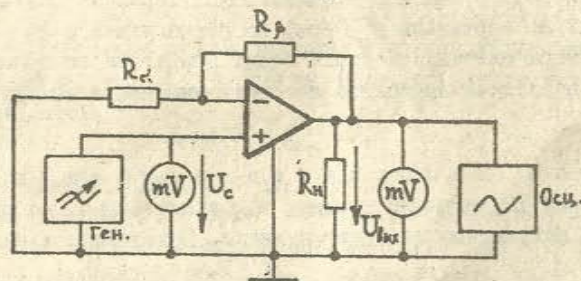


Рис.14. Неинвертирующий усилитель

Важной характеристикой усилителя является комплексный коэффициент усиления $K = U_{инх} / U_c$, который может быть определен в соответствии с выражением (1) по формуле

$$K = \frac{K_U}{1 + \beta K_U}$$

На низких частотах он совпадает с коэффициентом усиления, полученным в приближении идеального ОУ. Действительно, при $f \rightarrow 0$ собственный

коэффициент усиления ОУ $K_U \rightarrow K_0 \approx \infty$. Отсюда

$$K_{f \rightarrow 0} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

С ростом частоты (при $f > f_b$) K_U уменьшается, однако коэффициент усиления K остается примерно на прежнем уровне в диапазоне частот, называемом полосой усилителя. Ширина полосы характеризуется верхней частотой среза f_c . На этой частоте модуль коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз или на 3 децибелла меньше максимального значения:

$$K(f_c) / (1/\beta) = |1 + (1/\beta) / K_U(f_c)|^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Отсюда можно получить формулу, связывающую f_c с параметрами схемы. Причем, поскольку f_c заведомо больше верхней частоты среза операционного усилителя f_b , для вычисления K_U можно воспользоваться приближенным выражением. Из (3) вытекает, что при $f \gg f_b$

$$K_U \approx -j \frac{K_0 f_b}{f} = -j \frac{f_1}{f}.$$

Следовательно, верхняя частота среза усилителя в соответствии с (6) находится из условия $(1/\beta) \cdot (f_c / f_1) = 1$.

Отсюда

$$f_c = f_1 / (1/\beta).$$

Важно отметить, что произведение низкочастотного коэффициента усиления на верхнюю частоту среза является постоянной величиной:

$$f_c \cdot (1/\beta) = f_1 = K_0 f_b.$$

Из этой формулы видно, что самую широкую полосу имеет повторитель. Для него $K = 1$ и $f_c = f_1$.

Наглядно иллюстрирует частотные свойства усилителя амплитудно-частотная характеристика. На рис.15 изображены АЧХ неинвертирующих усилителей, имеющих различные коэффициенты усиления, там же приведена АЧХ собственного коэффициента усиления ОУ. Модули коэффициентов усиления K_1 и K_2 на спадающих участках характеристик совпадают с K_U , т.е. при $f \gg f_c$

$$K \approx K_U = f_1 / f. \quad (?)$$

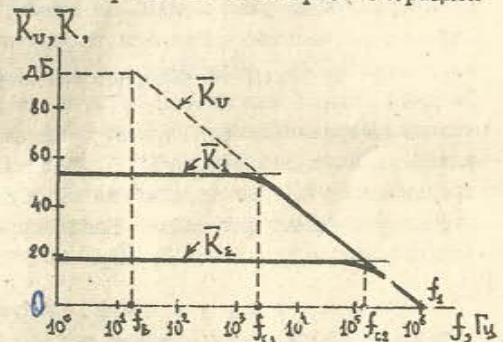


Рис.15. АЧХ неинвертирующих усилителей: $K_1 > K_2$

Спадающие участки характеристик имеют одинаковый наклон. При использовании ОУ с коррекцией он составляет 20 дБ/дек.

В лабораторной работе снимаются АЧХ неинвертирующих усилителей, имеющих разные коэффициенты усиления. Частота генератора синусоидальных колебаний изменяется от нижней частоты диапазона до частоты единичного усиления. Характеристики строятся в логарифмическом масштабе на одном графике. По результатам измерений определяются верхние частоты среза и частота единичного усиления. АЧХ усилителей сопоставляются между собой и с АЧХ операционного усилителя. Производится сравнение измеренных значений K с рассчитанными по формулам (5) и (7). При снятии АЧХ необходимо осциллографом контролировать отсутствие искажений выходного напряжения.

В лабораторной работе исследуется динамический диапазон усиления неинвертирующих усилителей. По схеме, изображенной на рис.14, на фиксированной частоте снимается передаточная (амплитудная) характеристика - зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного. Входной сигнал изменяется от нуля до уровня, вызывающего искажения на выходе. Форма искажений зависит от скорости нарастания выходного напряжения. Если она меньше V - максимальной скорости нарастания для применяемого ОУ, то напряжение на выходе будет ограничиваться - получается усеченная синусоида. Если скорость нарастания больше V , то синусоида преобразуется в пилу.

Инвертирующий усилитель. Программой лабораторной работы предусмотрено исследование инвертирующего усилителя при подаче на вход постоянного напряжения (рис.16). При различных значениях сопротивлений цепи обратной связи измеряется коэффициент усиления, он сопоставляется с рассчитанным по формуле: $K = -R_p/R_d$. Снимается также передаточная характеристика: зависимость выходного напряжения от входного. По характеристике выясняется диапазон напряжения на входе, в пределах которого обеспечивается линейное усиление.

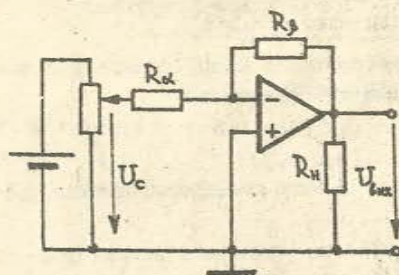


Рис.16. Инвертирующий усилитель

Логарифмический усилитель. Примером применения ОУ для создания функционального преобразователя является логарифмический усилитель. Напряжение на выходе функционального преобразователя является определенной функцией входного напряжения. В данном случае реализуется логарифмическая функция. Логарифмический усилитель

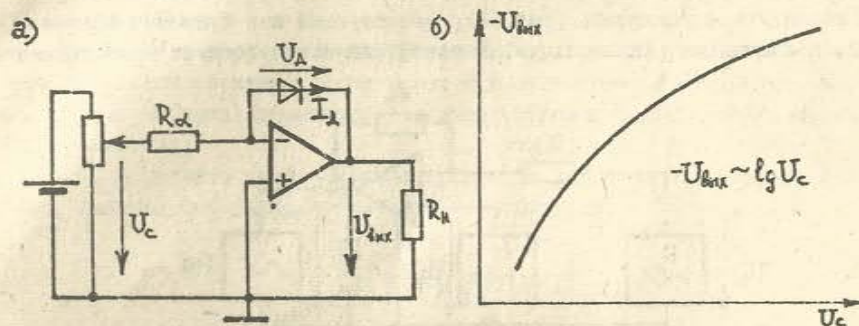


Рис.17. Логарифмический усилитель (а) и график зависимости выходного напряжения от входного (б)

представляет собой инвертирующий усилитель с нелинейным сопротивлением (полупроводниковым диодом) в цепи обратной связи (рис.17). Для получения требуемой функциональной зависимости здесь применяется сочетание физических свойств полупроводникового диода и усилительных свойств ОУ. Как известно, ток диода зависит от напряжения на нем по экспоненциальному закону

$$I_d = I_s \exp[U_d / (mU_T)],$$

где I_s - статический обратный ток (доли микроампер); U_T - термический потенциал (при температуре 20°C $U_T = 25,5$ мВ); m - корректирующий множитель, зависящий от типа диода ($1 < m < 2$). В приближении идеального усилителя $I_d = U_c / R_d$, $U_{вых} = -U_d$. Отсюда

$$U_{вых} = -mU_T \ln 10 \cdot \lg [U_c / (I_s R_d)] \approx -m60 \lg [U_c / (I_s R_d)],$$

где $U_{вых}$ - напряжение в милливольтках.

В лабораторной работе исследуется зависимость выходного напряжения от входного (U_c), подаваемого от источника постоянного напряжения. Если построить график $U_{вых}(U_c)$, откладывая входное напряжение по оси абсцисс в логарифмическом масштабе, то логарифмической функциональной зависимости будет соответствовать график в виде прямой линии.

Если перестроить цепь обратной связи, поменяв резистор и диод

местами, то получится экспоненциальный усилитель. Напряжение на его входе будет экспоненциальной функцией входного напряжения.

Суммирующий усилитель. В лабораторной работе исследуется усилитель (рис.18), действующий как сумматор напряжений, поданных на разные входы. В такой схеме отсутствует взаимовлияние

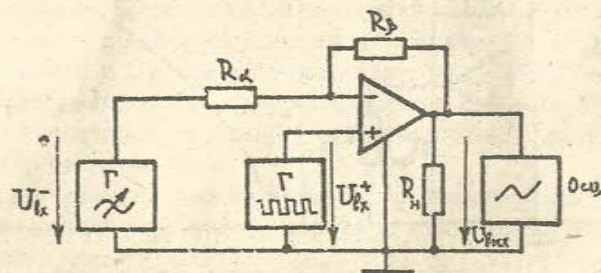


Рис.18. Суммирование синусоиды и последовательности прямоугольных импульсов

источников суммируемых напряжений. Программой лабораторной работы предусмотрено исследование сложения синусоиды и последовательности прямоугольных импульсов. На инвертирующий вход усилителя подается синусоидальное напряжение, на неинвертирующий - последовательность прямоугольных импульсов. Для первого сигнала устройство является инвертирующим усилителем, для второго - неинвертирующим, поэтому выходное напряжение связано с входными соотношением

$$U_{вых} = -U_{вх}^- \frac{R_β}{R_α} + U_{вх}^+ \left(1 + \frac{R_β}{R_α}\right).$$

Форма выходного напряжения наблюдается на экране осциллографа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как снимается АЧХ собственного коэффициента усиления ОУ? Почему на низких и высоких частотах диапазона усиления используются разные схемы измерения K_U ?
2. Для ОУ с коррекцией на частоте 1 кГц, соответствующей спадающему участку АЧХ, измерен модуль собственного коэффициента усиления. Он оказался равным 60дБ. Определите частоту единичного усиления и верхнюю частоту среза ОУ, если $K_0 = 4 \cdot 10^4$.
3. Пусть известно, что максимальная скорость нарастания для ОУ

составляет 0,5 В/мкс. Начиная с какой частоты появятся искажения формы синусоидального выходного напряжения, имеющего амплитуду 5 В?

4. По измерению скорости заряда конденсатора, имеющего емкость $C \approx 180$ нФ, определяются входные токи ОУ (см. рис.11). Какой масштаб целесообразно установить по осям экрана осциллографа (в В/см и в с/см), если ожидается, что значения входных токов находятся в диапазоне от 300 нА до 600 нА?

5. На ОУ с коррекцией построен неинвертирующий усилитель (рис.14). Резисторы цепи обратной связи имеют сопротивления: $R_β = 10$ кОм, $R_α = 0,5$ кОм. Частота единичного усиления ОУ равна 1 МГц. Вычислите полюсу усилителя.

6. Нарисуйте схему экспоненциального усилителя и получите формулу, связывающую выходное напряжение с входным.

ЗАДАНИЕ

1. Исследование свойств операционного усилителя

1.1. Исследование частотной зависимости собственного коэффициента усиления ОУ.

СНИМИТЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ (АЧХ) СОБСТВЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 10 Гц ДО ЧАСТОТЫ ЕДИНИЧНОГО УСИЛЕНИЯ. ПОСТРОЙТЕ АЧХ В ЛОГАРИФМИЧЕСКОМ МАСШТАБЕ.

АЧХ изображается в логарифмическом масштабе, поэтому измерения удобно проводить на частотах, отличающихся на декаду (в 10 раз): 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц и т.д. Коэффициент усиления на этих частотах вычисляется в децибеллах и линейно откладывается по оси ординат. В низкочастотной области (10 Гц - 1 кГц) для снятия АЧХ воспользуйтесь схемой, предназначенной для измерения больших значений K_U (рис.7, а). Соберите схему на макете, устанавливая в гнезда вкладки с резисторами. Рекомендуемые значения сопротивлений: $R = 100$ кОм, $R_α/n = 1$ кОм. Неинвертирующий вход соедините с нулевым проводом, воспользовавшись проводником со штырями.

Устанавливая различные значения частоты генератора, измерьте собственный коэффициент усиления $K_U = U_{вых} / U_{вх} \approx (U_{вых} / U_{вх}) \cdot 100$. При измерениях контролируйте с помощью осциллографа форму напряжения на выходе

ОУ. Если синусоида искажается, необходимо уменьшить напряжение, подаваемое с генератора.

Для снятия АЧХ на частотах выше 1 кГц воспользуйтесь схемой, изображенной на рис. 7, б. Соберите схему на макете, в цепь обратной связи установите резисторы, имеющие сопротивления: $R_k = R_p = 10 \text{ кОм}$. Изменяя частоту генератора вплоть до частоты единичного усиления, измерьте собственный коэффициент усиления ОУ $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$. При измерениях постоянно контролируйте форму выходного напряжения. Если синусоида искажается, уменьшайте уровень напряжения, подаваемого с генератора.

ОПРЕДЕЛИТЕ ЧАСТОТУ ЕДИНИЧНОГО УСИЛЕНИЯ (f_1). СРАВНИТЕ ИЗМЕРЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ f_1 С ТЕМ, КОТОРОЕ ПОЛУЧАЕТСЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ ($f_1 = K_U(f) \cdot f$) И СО ЗНАЧЕНИЕМ, УКАЗАННЫМ В ПАСПОРТЕ.

1.2. Исследование нелинейных искажений, оценка максимальной скорости нарастания выходного напряжения.

ИССЛЕДУЙТЕ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ НИЗКИХ ЧАСТОТ.

Соберите инвертирующий усилитель (рис. 9), в цепь обратной связи включите резисторы $R_k = 10 \text{ кОм}$, $R_p = 100 \text{ кОм}$. Установите какое-либо значение частоты синусоидального входного напряжения, не превышающее 5 кГц. Увеличивайте амплитуду входного напряжения до появления нелинейных искажений синусоиды на экране осциллографа, подключенного к выходу ОУ. Зарисуйте осциллограммы выходного и входного напряжений. На осциллограммах укажите масштаб в В/см и в с/см, установленный по осям экрана осциллографа.

ИССЛЕДУЙТЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ.

На частоте 10 кГц установите амплитуду напряжения генератора около 0,3 В. Убедитесь в отсутствии искажений выходного напряжения. Увеличивайте частоту до появления существенных динамических искажений выходного напряжения (синусоида превращается в "пилу"). Зарисуйте осциллограммы колебаний на выходе и на входе с указанием масштабов осей экрана осциллографа.

ОЦЕНИТЕ ЗНАЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

Уменьшайте амплитуду напряжения до уровня, при котором искажения синусоиды прекращаются. Измерьте по экрану осциллографа амплитуду

выходного напряжения U_m . Вычислите максимальную скорость нарастания по формуле $V = 2\pi f U_m$. Поскольку результаты измерений зависят от субъективного восприятия формы синусоиды, опыт следует выполнить многократно, каждый раз увеличивая частоту.

СРАВНИТЕ ПОЛУЧЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ С ПРИВЕДЕННЫМ В ПАСПОРТЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ.

1.3. Измерение входных токов.

ИЗМЕРЬТЕ ВХОДНЫЕ ТОКИ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ $I_{\text{ВХ}}^+$ И $I_{\text{ВХ}}^-$.

Входные токи определите по результатам измерения скорости заряда конденсатора, подключаемого ко входам ОУ (рис. 11). Емкость конденсатора $C \approx 170 \text{ нФ}$. Выход ОУ должен быть соединен с потенциальным входом осциллографа. Для этого переключатель входа осциллографа поставьте в положение "≈". Установите масштабы по осям экрана осциллографа: единицы В/см по вертикальной оси и единицы с/см по горизонтальной оси. Ручки плавной регулировки "УСИЛЕНИЕ" и "ДЛИТЕЛЬНОСТЬ" должны находиться в крайнем положении при вращении по часовой стрелке.

Замкните выводы конденсатора. По экрану осциллографа будет медленно двигаться светящаяся точка. Горизонтальная линия её траектории соответствует нулевому напряжению на конденсаторе. Когда точка будет в левой части экрана, разомкните конденсатор. Он начнет заряжаться. Выходное напряжение, равное напряжению на конденсаторе, начнет изменяться, и светящаяся точка будет двигаться по наклонной линии. Измерьте её наклон и вычислите скорость изменения выходного напряжения. Определите входные токи $I_{\text{ВХ}}^- = (\Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta t) \cdot C$; $I_{\text{ВХ}}^+ = -(\Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta t) \cdot C$.

ВЫЧИСЛИТЕ УСРЕДНЕННЫЙ ВХОДНОЙ ТОК И РАЗНОСТЬ ВХОДНЫХ ТОКОВ, СРАВНИТЕ ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ С ПРИВЕДЕННЫМИ В ПАСПОРТЕ ОУ.

1.4. Измерение напряжения смещения.

ИЗМЕРЬТЕ НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ И СРАВНИТЕ ЕГО СО ЗНАЧЕНИЕМ, ПРИВЕДЕННЫМ В ПАСПОРТЕ ОУ.

Соберите схему, приведенную на рис. 13. В цепь обратной связи установите резисторы, имеющие одинаковые сопротивления $R_k = R_p = 100 \text{ Ом}$. Измерьте осциллографом уровень постоянного напряжения на выходе. Вычислите напряжение смещения по формуле $U_{\text{СМ}} = U_{\text{ВЫХ}} / 2$.

2. Исследование устройств, построенных на операционном усилителе

2.1. Исследование неинвертирующего усилителя.

СНИМИТЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ ДВУХ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ: МЕНЬШЕ 20 дБ И БОЛЬШЕ 40 дБ.

Соберите неинвертирующий усилитель (рис.14). Для имитации нагрузки включите на выход усилителя резистор $R_H = 10$ кОм. Сопротивления резисторов цепи обратной связи R_α и R_β подберите так, чтобы коэффициент усиления в одном варианте был меньше 20 дБ, а в другом больше 40 дБ. Измерьте коэффициент усиления $K = U_{\text{вых}}/U_c$, изменяя частоту генератора от 10 Гц до частоты единичного усиления (так же, как в п.1.1). Входное напряжение удобно поддерживать постоянным на всех частотах (например, равным 10 мВ). При измерениях контролируйте по экрану осциллографа форму выходного напряжения.

ОПРЕДЕЛИТЕ ЧАСТОТУ ЕДИНИЧНОГО УСИЛЕНИЯ f_c , ВЕРХНЮЮ ЧАСТОТУ СРЕЗА, СООТВЕТСТВУЮЩУЮ РАЗНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ. ПРОВЕРЬТЕ ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО СООТНОШЕНИЯ

$$\frac{f_c}{f_c} = K = 1 + \frac{R_\beta}{R_\alpha}$$

Установите частоту генератора, соответствующую горизонтальным участкам АЧХ.

СНИМИТЕ АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ ТЕХ ЖЕ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ.

Амплитуду входного напряжения изменяйте в сторону уменьшения от уровня, при котором пропадают нелинейные искажения.

2.2. Исследование инвертирующего усилителя.

ИЗМЕРЬТЕ КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ ДВУХ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ. СОПОСТАВЬТЕ ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ С РАССЧИТАННЫМИ ПО ФОРМУЛЕ: $K = -R_\beta/R_\alpha$.

Соберите инвертирующий усилитель (рис.16). В качестве нагрузки включите резистор $R_H = 10$ кОм. Подключите ко входу усилителя источник постоянного напряжения, встроенный в макет. При двух вариантах пар резисторов цепи обратной связи R_α и R_β измерьте с помощью осциллографа напряжения на входе и выходе усилителя. Коэффициент усиления определяется по формуле $K = U_{\text{вых}}/U_c$.

СНИМИТЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ ДВУХ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ.

Передаточная характеристика - зависимость напряжения на выходе от напряжения на входе. Снимая передающую характеристику, уровень входного напряжения изменяйте в таких пределах, чтобы на характеристике получился участок линейного усиления и участок насыщения.

2.3. Исследование логарифмического усилителя.

СНИМИТЕ ПЕРЕДАТОЧНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ. ПРОВЕРЬТЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЯЗИ $-U_{\text{вых}} \sim \lg U_c$.

Соберите логарифмический усилитель (рис.17,а). Сопротивления резисторов R_H и R_α возьмите равными 10 кОм. Подключив к входу источник постоянного напряжения, снимите передающую характеристику и постройте её, откладывая входное напряжение по оси абсцисс в логарифмическом масштабе, а выходное - линейно по оси ординат.

2.4. Исследование суммирующего усилителя.

ПОЛУЧИТЕ КОЛЕБАНИЕ, ЯВЛЯЮЩЕЕСЯ СУММОЙ СИНУСОИДЫ И МЕАНДРА (ПРЯМОУГОЛЬНОГО КОЛЕБАНИЯ).

Соберите суммирующий усилитель (рис.18). Сопротивления резисторов: $R_H = 10$ кОм; $R_\alpha = 1$ кОм; $R_\beta = 5$ кОм. Синусоидальное напряжение частотой 8 кГц подведите через R_α к инвертирующему входу ОУ. К неинвертирующему входу подведите меандр (напряжение прямоугольной формы) с выхода генератора, встроенного в осциллограф. Убедитесь, что выходное напряжение - результат суммирования синусоиды и прямоугольного колебания. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. - М.: Мир, 1982. - 512 с.
Умцкий В.Н., Усов Р.С., Ферман Г.А. Радиоэлектронные системы с применением цифровых и аналоговых интегральных микросхем. - Л.: ЛПИ, 1983. - 65 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель и программа работы.	3
Сведения об операционных усилителях и методические указания к измерениям	4
Операционный усилитель. Понятие идеального усилителя	4
Свойства типового операционного усилителя	7
Исследование устройств на операционных усилителях.	14
Контрольные вопросы для самопроверки	18
Задание	19
Литература	23