

Министерство науки и образования Украины

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

Радиофизический факультет

Кафедра прикладной электродинамики

Ляховский А.Ф., Чеботарёв В.И., Катрич В.А., Холодов В.И., Думин А.Н.

Лабораторный практикум «Основы радиоэлектроники»

**Часть I
«Усилители»**

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов физических специальностей

Харьков-2001

УДК 621.396.6

Ляховский А.Ф., Чеботарёв В.И., Катрич В.А., Холодов В.И., Думин А.Н.
Лабораторный практикум «Основы радиоэлектроники» Часть I «Усилители»

Методические указания по выполнению лабораторных работ / Под ред.
А.Ф. Ляховского

Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2001.- 48 с.

Copyright © 2001. All Rights Reserved.

В методическом пособии приведены сведения о принципах линейного усиления сигналов основных видов усилительных каскадов, даны задания для подготовки к выполнению и задания по выполнению лабораторных работ. По каждой теме предложены контрольные вопросы.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей и используется при изучении курса «Основы радиоэлектроники».

Рецензенты:

докт. физ.-мат. наук, проф. А.А. Булгаков (ИРЭ НАН Украины),

докт. физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Гордиенко (ХТУРЭ).

Рекомендовано ученым советом радиофизического факультета ХНУ им.
В.Н. Каразина. Протокол № 4 от 20 апреля 2001 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

Усиление сигналов – важнейший процесс в радиоэлектронике. Он заключается в увеличении энергии информационных сигналов. Если при этом входной и выходной сигналы связаны линейной зависимостью, то усиление называют линейным.

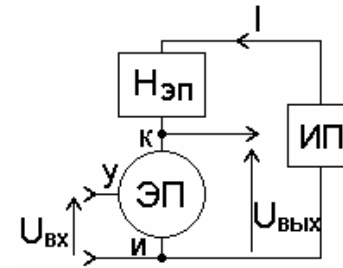


Рис.1

Принцип электронного усиления заключается в управлении посредством электронных приборов электрическими токами и напряжениями, создаваемыми сторонним источником энергии – источником питания.

Элементарная усилительная цепь, обобщённая схема которой представлена на рис.1, состоит из электронного прибора (ЭП), его нагрузки $H_{эп}$ и источника питания ИП, которые образуют замкнутую цепь – контур. Величина тока I в контуре регулируется электронным прибором в зависимости от входного сигнала – входного напряжения $U_{вх}$. Посредством нагрузки электронного прибора $H_{эп}$ изменение тока

преобразуется в выходной сигнал – напряжение $U_{вых}$. Энергия, которую способен выделить выходной сигнал, превосходит энергию входного сигнала, затраченную на управление электронным прибором. Простейшие усилительные цепи обычно называют *усилительными каскадами (усилительными ступенями)*.

Укажем основные свойства главных частей каждого усилительного каскада.

Электронный прибор (ЭП) – управляемая резистивность, регулирующая ток I . Разновидность ЭП и его тип выбирают учитывая энергетические и спектральные характеристики сигналов. Резистивные свойства ЭП доминируют в ограниченном сверху диапазоне частот, характерном для каждого типа приборов. С ростом частоты начинают проявляться особенности физических процессов и конструкции ЭП, придающие ему, помимо резистивных и ёмкостных свойства. Для усиления колебаний в диапазоне частот до 10^{10} Гц в качестве усилительных элементов используют электронные приборы (ЭП) – электронные лампы и транзисторы.

Нагрузка электронного прибора $H_{эп}$ преобразует изменение тока в выходной сигнал. Как правило, им является напряжение $U_{вых}$. И только в оконечных ступенях усиления сигнал – это ток $I_{вых}$, возбуждающий оконечное устройство. Выбор нагрузки ЭП определяется целями и спектральными характеристиками усиливаемых сигналов.

Источник питания ИП – это источник постоянного напряжения $U_{п}$. Его энергия преобразуется в энергию выходного сигнала. Величина $U_{п}$ и полярность подключения источника определяется величиной (уровнем) сигнала и выбором ЭП. При анализе усилительных каскадов источники питания чаще всего представляют идеальными источниками напряжения, поскольку внутреннее сопротивление реальных источников питания мало.

Основным параметром усилителей является коэффициент усиления k , связывающий входной и выходной сигналы. Различают коэффициенты усиления по напряжению ($k = U_{вых} / U_{вх}$), по току и по мощности. Широко используется выражение коэффициента усиления в логарифмическом масштабе (в децибелах)

$$A(\text{дБ}) = 20 \lg k = 20 \lg(U_{вых} / U_{вх}) = 10 \lg(P_{вых} / P_{вх}) .$$

В составе усилительных каскадов, наряду с основными, имеются вспомогательные элементы. С их помощью задаются исходные значения величин постоянных напряжений и токов электродов ЭП в отсутствие входного сигнала, т.е. его режим покоя, обеспечивается стабилизация этого режима, осуществляется связь со смежными цепями и развязка каскадов по цепи питания. К числу вспомогательных элементов относятся: блокирующие и разделительные конденсаторы, резистивные делители напряжения, дроссели, трансформаторы и т.п.

ИНВЕРТИРУЮЩИЙ РЕЗИСТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – ознакомление с принципами схемотехнического построения инвертирующих резистивных усилителей; изучение их работы; исследование режима покоя и режима линейного усиления; определение границ области линейного усиления; наблюдение нелинейных искажений сигналов и ключевого режима.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обобщенная схема усилительного каскада с включением ЭП по схеме с общим инжектором показана на рис. 1. Она обязательно содержит ЭП, нагрузку ЭП и источник питания – источник постоянного напряжения. В данном случае нагрузкой ЭП является постоянный резистор R . Эти основные элементы усилительного каскада образуют замкнутую цепь (контур), в которой может протекать постоянный ток. Электрическое состояние этой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа описывается уравнением

$$E_{\Pi} = U_{\text{ЭП}} + IR . \quad (1)$$

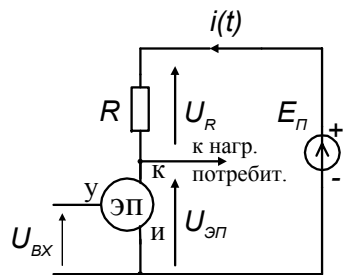


Рис. 1

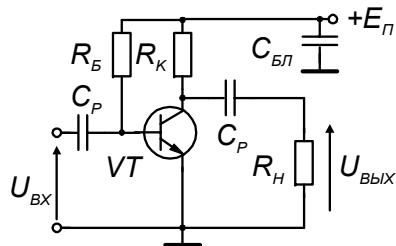


Рис. 2

Изменение силы тока приводит к изменению падений напряжений на резисторе $U_R = RI$ и на коллекторе ЭП $U_{\text{ЭП}} = E_{\Pi} - IR$. Колебание $U_{\text{ЭП}}$ рассматривается как выходной сигнал и направляется в нагрузку усилителя $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ЭП}}$ (потребителю). Переменное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ находится в противофазе с входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$, поэтому усилители, собранные по схеме

с общим инжектором называются *инвертирующими*. Поскольку в ЭП выходные ток и напряжение значительно превышают входные, то мощность выходного сигнала больше мощности входного сигнала.

В радиоэлектронике широко используется линейное усиление, когда выходной и входной сигналы связаны близкой к линейной зависимостью $S_{\text{ВЫХ}} = kS_{\text{ВХ}}$, где k – коэффициент усиления. В инвертирующих усилителях $k > 1$ по напряжению, току и мощности, поэтому такие усилители находят наиболее широкое применение.

Так как зависимости токов от напряжений ЭП описываются нелинейными *вольт-амперными характеристиками* (ВАХ), т.е. ЭП является нелинейным управляемым сопротивлением, то задача получения линейного усиления заключается в правильном выборе исходного состояния ЭП при $U_{\text{ВХ}} = 0$, т.н. *режима покоя*.

На рис. 2 показана простейшая схема усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером. Так как нагрузкой ЭП является резистор R_K , то такой усилитель называется *резистивным*. В режиме покоя $U_{\text{ВХ}} = 0$, и в схеме действует только постоянное напряжение источника питания $E_{\text{П}}$, а в цепях коллектора и базы протекают постоянные токи $I_{\text{Б0}}$, $I_{\text{К0}}$ (токи и напряжения режима покоя условимся обозначать индексом 0). Электрическое состояние усилителя в режиме покоя описывается двумя уравнениями: для цепи базы и для коллекторной цепи. Напряжение покоя на базе относительно эмиттера определяется из уравнения

$$U_{\text{БЭ0}} = E_{\text{П}} - R_{\text{Б}} I_{\text{Б0}}. \quad (2)$$

Так как напряжение смещения $U_{\text{БЭ0}}$, создается за счет протекания базового тока покоя $I_{\text{Б0}}$ через резистор $R_{\text{Б}}$, рассматриваемую схему называют схемой с *фиксированным током базы*. Напряжение покоя на коллекторе относительно эмиттера определяется как

$$U_{\text{КЭ0}} = E_{\text{П}} - R_{\text{К}} I_{\text{К0}}. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) называются *уравнениями нагрузочной линии* входной и выходной цепи. Точку покоя, в окрестности которой при малом входном сигнале возможно линейное усиление, можно определить графическим методом. Для этого на графики выходной (коллекторной) ВАХ наносят нагрузочную линию выходной цепи (3). Типичный вид выходной ВАХ транзистора с ОЭ показан на рис. 3. Точка покоя находится на пересечении нагрузочной линии с коллекторной ВАХ при заданном из (2) напряжении смещения $U_{\text{БЭ0}}$. Для обеспечения линейного усиления значение напряжения смещения выбирают таким, чтобы точка покоя находилась в *средней части рабочей области ВАХ*, в которой коллекторный ток слабо зависит от коллекторного напряжения. Значение сопротивления резистора $R_{\text{К}}$ определяет наклон нагрузочной линии и выбирают его из условий требуемого усиления и допустимых значений $E_{\text{П}} \leq 0,7U_{\text{КВЫХ}}$, $I_{\text{К0}} = E_{\text{П}} / R_{\text{К}} \leq 0,7I_{\text{КВЫХ}}$, $P_{\text{К}} < P_{\text{КВЫХ}}$. Чтобы цепи источника входного сигнала и нагрузки потребителя не нарушали выбранный режим покоя усилителя, эти цепи по постоянному току развязывают с помощью *разделительных конденсаторов* $C_{\text{р}}$.

Если выходную ВАХ дополнить *статической проходной (передаточной) ВАХ* $I_{\text{К}} = F(U_{\text{БЭ}})$ (рис. 3), то можно наглядно (графическим методом) рассмотреть

работу усилительного каскада. Проходную ВАХ строят, используя значения I_K и напряжения

$U_{БЭ}$ в точках пересечения нагрузочной линии с линиями выходной ВАХ. Временные зависимости входного, выходного напряжений и коллекторного тока, дополняющие ВАХ (рис.3), поясняют процесс усиления.

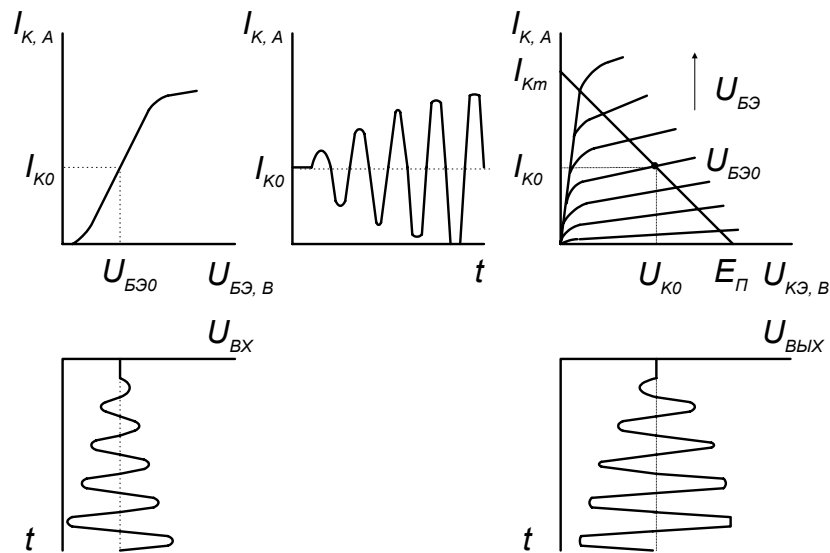


Рис. 3

Усилитель с заданием смещения за счет фиксированного тока базы (рис. 2) работает неустойчиво из-за старения транзистора, колебания температуры, а при смене транзистора из-за разброса тока базы однотипных биполярных транзисторов требует подбора резистора R_B . Более эффективной является схема с *фиксированным напряжением смещения на базе* и цепочкой *термостабилизации* R_3, C_3 (рис. 4). Здесь напряжение смещения на базе относительно корпуса создается *делителем напряжения*, состоящим из резисторов R_{B1} и R_{B2} ($U_{B0} = E_{П} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$). Значения сопротивлений резисторов делителя выбираются такими, чтобы ток делителя превышал ток базы. Существенным недостатком биполярных транзисторов является зависимость их параметров от температуры. Для уменьшения влияния температуры на характеристики усилителя в цепь эмиттера включают резистор R_3 , который шунтируют конденсатором C_3 . Если в схеме усилителя на рис. 2 $U_3 = 0$, то в схеме на рис. 3 напряжение на эмиттере относительно корпуса по постоянной и медленно изменяющейся составляющим эмиттерного тока равно $U_{30} = R_3 I_{30} \approx R_3 I_{K0}$ (т.к. $I_K \gg I_B$, то на практике часто базовым током пренебрегают, полагая $I_3 \approx I_K$). При

наличии цепочки R_3, C_3 напряжение покоя на базе относительно эмиттера становится зависимым от коллекторного тока I_{K0}

$$U_{BЭ0} = U_{B0} - U_{Э0} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} E_{П} - R_3 I_{K0}. \quad (4)$$

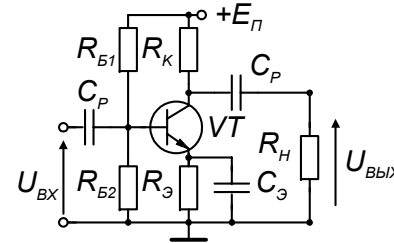


Рис. 4

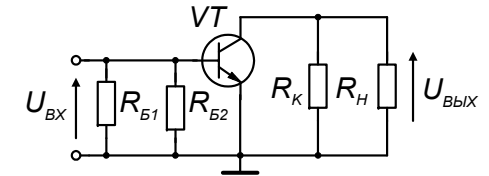


Рис. 5

Сопротивления резисторов R_{B1} , R_{B2} не подвержены температурным изменениям и напряжение на базе относительно корпуса U_{B0} сохраняется постоянным. Увеличение (уменьшение) коллекторного тока I_{K0} из-за повышения (понижения) температуры приводит к возрастанию (уменьшению) падения напряжения на эмиттере $U_{Э0}$. Это вызывает уменьшение (увеличение) напряжения покоя на базе относительно эмиттера $U_{BЭ0}$, а следовательно к уменьшению (увеличению) коллекторного тока I_{K0} , т. е. происходит компенсация температурных изменений коллекторного тока. Напряжение $U_{Э0}$ является напряжением отрицательной обратной связи, стабилизирующим режим покоя усилителя. В отсутствие конденсатора C_3 на резисторе R_3 создается падение напряжения за счет протекания не только постоянного тока режима покоя I_{K0} , но переменного тока, обусловленного усиваемым сигналом I_K . Переменное напряжение $U_3 = R_3 I_K$, являясь напряжением *отрицательной обратной связи*, уменьшает усиваемое напряжение, которое действует между базой и эмиттером $U_{BЭ} = U_{BХ} - U_3$ и, как следствие, уменьшает коэффициент усиления. Для уменьшения действия отрицательной обратной связи на усиление, параллельно резистору R_3 , включают конденсатор C_3 , емкость которого выбирают такой, чтобы его сопротивление на самой нижней частоте спектра усиваемого сигнала ω_H удовлетворяло условию

$$\frac{1}{\omega_H C_3} \ll R_3.$$

В обеих схемах *основными элементами* являются: ЭП, нагрузка ЭП R_K и источник питания $E_{П}$, остальные элементы – *вспомогательные*. Разделительные емкости $C_П$ предназначены для развязки усилителя по постоянной составляющей с цепями входа и выхода.

В линейной теории усилителей анализ процесса усиления осуществляется путем построения и исследования схем, эквивалентных усилительным цепям для режима малых колебаний. При этом сначала строят промежуточную схему в предположении, что источник питания E_H является идеальным источником постоянного напряжения с нулевым внутренним сопротивлением. Например, рассматривая процесс усиления на частотах, на которых сопротивление конденсаторов C_p, C_c пренебрежимо мало, усилителю (рис. 4) можно поставить в соответствие промежуточную схему, показанную на рис. 5. Заменяв в этой схеме биполярный транзистор его эквивалентной схемой замещения в малосигнальном приближении, получим эквивалентную схему (рис. 6) усилителя (рис. 4). Для эквивалентных схем режима колебаний методом узловых напряжений составляют уравнения

$$U_B = U_{BX} \quad (5)$$

$$(G_i + G_K + G_H)U_{BВЫХ} = -SU_{BЭ} \quad (6)$$

Учитывая, что $U_{Э} = 0$ и $U_{BЭ} = U_B - U_{Э} = U_{BX}$ из решения (5) получим соотношение, устанавливающее связь выходного напряжения с входным напряжением

$$U_{BВЫХ} = \frac{-S}{G_i + G_K + G_H} U_{BX} \quad (7)$$

из которого определяем коэффициент передачи (усиления) сигнала инвертирующего резистивного усилителя

$$k = \frac{U_{BВЫХ}}{U_{BX}} = \frac{-S}{G_i + G_K + G_H} \quad (8)$$

$U_{BВЫХ MIN} < U_{BX} < U_{BВЫХ MAX}$ наблюдается линейное усиление. При $U_{BX} < U_{BВЫХ MIN}$

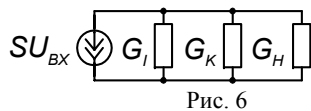


Рис. 6

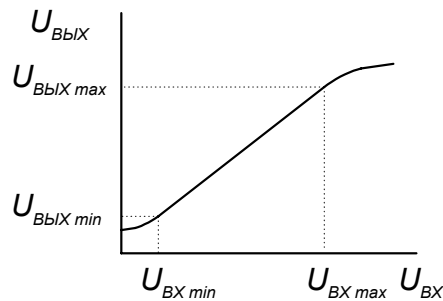


Рис. 7

Поскольку усиление сигнала сопровождается некоторым изменением его формы, то свойства усилителя оцениваются кроме коэффициента усиления еще амплитудной, амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками, которые позволяют судить о вносимых усилителем искажениях. Амплитудной характеристикой (АХ) называется зависимость выходного напряжения от входного $U_{BВЫХ} = f(U_{BX})$. Снимают АХ при гармоническом входном сигнале для одной из частот, лежащих в диапазоне, где усиление практически не зависит от частоты (средние частоты). Типичный вид АХ показан на рис. 7. В пределах

коэффициент усиления падает, а при $U_{BX} = 0$ наблюдается выходной сигнал, обусловленный шумами усилителя. При больших амплитудах входного сигнала $U_{BX} > U_{BX\text{MAX}}$ заметно сказывается нелинейность *вольт-амперной характеристики* (ВАХ) транзистора. При дальнейшем увеличении входного сигнала наступает резкое ограничение выходного напряжения обусловленное тем, что транзистор начинает работать в *ключевом режиме*.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из двух однокаскадных усилителей на биполярных транзисторах. Первый каскад выполнен по схеме с выбором точки покоя за счет фиксированного тока базы. Второй каскад выполнен по схеме с выбором точки покоя за счет фиксированного напряжения на базе и имеет цепь термостабилизации. При отключении емкости в цепи эмиттера второго каскада можно наблюдать влияние отрицательной обратной связи на коэффициент усиления, а при $R_K = R_E$ преобразуется в фазоинвертор.

При выполнении лабораторной работы используются: генератор гармонических сигналов и электронный осциллограф.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Изучить и начертить варианты инвертирующего усилительного каскада на биполярных и полевых транзисторах.
2. Нарисовать вольт-амперные характеристики транзисторов.
3. Провести анализ режима покоя инвертирующего резистивного усилительного каскада на биполярном транзисторе.
4. Провести анализ режима линейного усиления.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Перед включением лабораторной установки уяснить назначение переключателей, регулировок, измерительных приборов, контрольных гнезд!

1. *Исследовать схему усилителя с заданием точки покоя за счет фиксированного тока базы.*

1.1. *Произвести настройку усилителя на максимальный коэффициент усиления.* Для этого подключить генератор ко входу усилителя. Контролируя входной сигнал с помощью осциллографа на базе транзистора, установить гармоническое колебание с частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $U_{BX} = 30$ мВ. После установки заданного U_{BX} , подключить осциллограф к выходу усилителя. Наблюдая на осциллографе форму и амплитуду выходного напряжения $U_{ВЫХ}$, регулировкой R_B , добиться максимальной амплитуды $U_{ВЫХ}$ без искажений. По измеренным $U_{ВЫХ}$, U_{BX} определить коэффициент усиления усилителя.

1.2. *Определить режим покоя усилителя для максимального усиления.* Для этого отключить генератор гармонических колебаний. Измерить постоянные напряжения U_B , U_K и по известным R_B , R_K вычислить токи I_{B0} и I_{K0} .

2. *Исследовать схему усилителя с заданием точки покоя за счет фиксированного напряжения на базе.*

2.1. *Произвести настройку на максимальный коэффициент усиления.*

Методика измерений аналогична п.1.1.

2.2. Определить режим покоя. При $U_{BX} = 0$ измерить постоянные напряжения U_B , $U_{Э}$, U_K и по известным $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, R_K вычислить $I_{Б0}$, I_{K0} .

2.3. Исследовать амплитудную характеристику усилителя. На частоте $f = 1$ кГц, измерить зависимость $U_{ВЫХ} = F(U_{ВХ})$. В процессе увеличения $U_{ВХ}$ проследить за формой $U_{ВЫХ}$, определить амплитуду $U_{ВХ}$, при которой появляются нелинейные искажения $U_{ВЫХ}$ и зарисовать осциллограммы сигналов на входе и выходе (ключевой режим).

2.4. Исследовать влияние сопротивлений R_K и R_H на коэффициент усиления, для чего на частоте сигнала $f = 1$ кГц при $U_{ВХ} = 10$ мВ снять зависимость $U_{ВЫХ}(R_K)$ и $U_{ВЫХ}$ при подключенном R_H .

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых усилительных каскадов.
3. Результаты экспериментальных исследований (значения k_{MAX} ; напряжения и токи режима покоя; график амплитудной характеристики, осциллограммы, замечания о влиянии R_K и R_H на коэффициент усиления).
4. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое линейное усиление?
2. Какие общие и отличительные черты имеют исследуемые усилительные каскады? Укажите назначение элементов схем. Дайте определение процесса усиления.
3. Что такое режим покоя? Почему в режиме покоя при линейном усилении рабочая точка должна находиться в средней части линейной области ВАХ? Что будет, если рабочая точка выбрана на краю линейной области ВАХ?
4. Получите выражение для коэффициента усиления из решения динамической задачи линейной теории усилителей.
5. Какой параметр электронного прибора определяет главным образом величину коэффициента усиления? Какие элементы схемы влияют на коэффициент усиления?
6. По экспериментальным амплитудным характеристикам показать, при каких амплитудах входного сигнала еще сохраняется линейное усиление и почему.

ЛИТЕРАТУРА: [1]–[6].

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ НА РЕЗИСТОРАХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – экспериментальное исследование влияния элементов усилительных каскадов на их частотные характеристики. Ознакомление с приемами коррекции частотных характеристик усилителей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Усилители, в которых в качестве нагрузки ЭП включен резистор, называются резисторными или апериодическими. К ним относятся усилители звуковой частоты, импульсные усилители, видеоусилители.

В апериодических усилительных каскадах электронные приборы чаще всего включают так, что для усиливаемых колебаний их инжекторы соединены с узлом общим для входных и выходных зажимов усилителя. Такое включение электронной лампы называют “с общим катодом”, биполярного транзистора – “с общим эмиттером”, а полевого транзистора – “с общим истоком”. Схемы резисторных каскадов на полевом и биполярном транзисторе представлены на рис. 1 и рис. 2.

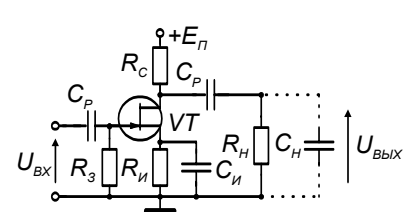


Рис.1.

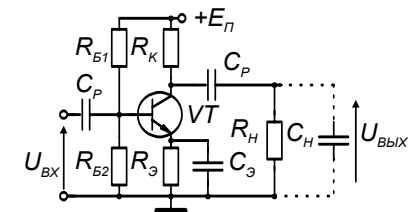


Рис.2.

Как видно из приведенных схем, апериодические усилители содержат как резисторы, так и емкости, поэтому их называют еще усилителями с резистивно-емкостными связями. Поскольку реактивное сопротивление емкости зависит от частоты ($Z_C = 1/(j\omega C)$), то из-за наличия разделительных и шунтирующих емкостей коэффициент усиления апериодического усилителя тоже зависит от частоты.

Разделительные конденсаторы C_p включают для того, чтобы постоянные напряжения, обеспечивающие режим покоя каскада усилителя, не воздействовали на вход и выход усилителя, т.е. осуществляют развязку каскада по постоянной составляющей. Обычно величину емкости C_p выбирают порядка единиц микрофард. Рост сопротивления емкости с понижением частоты приводит к увеличению падения напряжения на разделительной емкости и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления.

Шунтирующие емкости в явном виде в схемах усилителей отсутствуют. В реальных усилительных цепях (в силу протекающих физических процессов) имеются емкости между проводниками, радиодеталями, между элементами конструкций радиодеталей, между электродами ЭП и т.п. Такие емкости называют паразитными. Суммарная емкость $C_{ш}$, шунтирующая сопротивление нагрузки R_H , образованная емкостью нагрузки, емкостью монтажа C_M , междуэлектродными емкостями ЭП $C_{ЭП}$, обычно составляет десятки пикофард. В области высоких частот с ростом частоты

сопротивление емкости $C_{ш}$ становится сравнимым с сопротивлением R_H , а с дальнейшим повышением частоты становится столь малым, что закорачивает (шунтирует) выходной сигнал, снижая тем самым усиление. Другой причиной уменьшения коэффициента усиления с ростом частоты является ухудшение усилительных свойств ЭП, обусловленное его инерционностью (например, в случае электронной лампы – конечным временем пролета носителей заряда через область управляющего электрода).

В варианте усилительного каскада на полевом транзисторе (рис. 1) частотные характеристики определяются элементами: сопротивлением стоковой нагрузки R_C ,

сопротивлением нагрузки каскада, емкостью нагрузки каскада, разделительными емкостями, проводимостями и емкостями физической эквивалентной (моделирующей) схемы транзистора. Элементы R_3 , R_H , C_H являются вспомогательными и служат для обеспечения линейного режима работы транзистора. Эти элементы не оказывают существенного влияния на частотные характеристики каскада.

В варианте усилительного каскада на биполярном транзисторе (рис. 2) частотные характеристики определяются элементами: сопротивлением коллекторной нагрузки R_K , сопротивлением нагрузки каскада R_H , емкостью нагрузки каскада C_H , разделительными емкостями C_P , проводимостями и емкостями физической эквивалентной (моделирующей) схемы транзистора. Элементы $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, R_3 , C_3 являются вспомогательными, служат для обеспечения заданного режима работы транзистора и температурной стабилизации его параметров. Эти элементы не оказывают существенного влияния на частотные характеристики каскада.

Частотная зависимость коэффициента усиления усилителя описывается комплексной передаточной функцией. Как линейный четырехполюсник усилитель характеризуется комплексной передаточной функцией $\dot{K}(\omega) = \dot{S}_{ВЫХ} / \dot{S}_{ВХ}$, связывающей комплексные амплитуды гармонических составляющих выходного и входного сигналов. Зависимость модуля комплексной передаточной функции от частоты $|\dot{K}(\omega)|$ называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), зависимость аргумента комплексной передаточной функции от частоты $\theta(\omega) = \arg \dot{K}(\omega)$ – фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

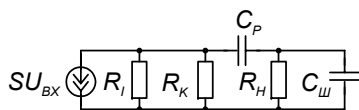


Рис.3.

Комплексную передаточную функцию получают из решения динамической задачи линейной теории усиления. В приближении малого гармонического сигнала на входе, каскаду усилителя ставят в соответствие эквивалентную схему. Вариант полной эквивалентной схемы, учитывающей влияние разделительной и шунтирующей емкостей, для усилительного каскада на биполярном транзисторе представлен на

рис. 3. Для эквивалентной схемы методом узловых напряжений составляют систему уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$\begin{pmatrix} G_i + G_K + j\omega C_P & -j\omega C_P \\ -j\omega C_P & G_H + j\omega C_P + j\omega C_{Ш} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S\dot{U}_{BX} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Из решения системы уравнений (2) методом Крамера передаточная функция каскада по напряжению ($\dot{U}_{ВЫХ} = \dot{U}_2$) определяется выражением:

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{BX}} = \frac{-j\omega C_P S}{(G_i + G_K + j\omega C_P)(G_H + j\omega C_P + j\omega C_{Ш}) - (j\omega C_P)^2}. \quad (3)$$

С учетом неравенства $C_P \gg C_{Ш}$, выражение, определяющее комплексную передаточную функцию, может быть представлено в виде

$$\dot{K}(\omega) = \frac{k}{1 + j(\omega\tau_B - 1/\omega\tau_H)} = \frac{k}{1 + j(\omega/\omega_B - \omega_H/\omega)}, \quad (4)$$

где $k = \frac{-S}{G_i + G_K + G_H}$ – коэффициент усиления напряжения в области средних частот,

$\tau_H = C_P R_H \frac{G_i + G_K + G_H}{G_i + G_K}$, $\tau_B = \frac{C_{Ш}}{G_i + G_K + G_H}$ – постоянные времени перезаряда

емкостей $C_P, C_{Ш}$ через сопротивления, к которым они подключены.

Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада определяется как $|\dot{K}(\omega)|$ из (4) выражением:

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{|k|}{\sqrt{1 + (\omega\tau_B - 1/\omega\tau_H)^2}} = \frac{|k|}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_B - \omega_H/\omega)^2}}, \quad (5)$$

где $\omega_H = 1/\tau_H$, $\omega_B = 1/\tau_B$ – значения частот, при которых коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Частоты ω_H , ω_B определяют полосу пропускания усилительного каскада на уровне $k_{\max}/\sqrt{2} \approx 0,707k_{\max}$ и называются нижней и верхней граничными частотами.

Формулы (4), (5) описывают частотные характеристики любого апериодического усилителя независимо от типа ЭП и способа его включения. График АЧХ, соответствующий выражению (5), представлен на рис. 4. В диапазоне частот можно выделить и порознь рассматривать следующие области частотных характеристик: область средних частот, область высших частот, область низших частот. В области низших частот существенное влияние на частотные характеристики оказывают разделительные емкости каскада. Для области высших частот существенными являются емкости, оказывающие шунтирующее действие (емкости нагрузки и монтажа, межэлектродные емкости электронных приборов и др.). На рис. 5 изображены варианты эквивалентных схем усилительного каскада, соответствующие различным областям частотного диапазона.

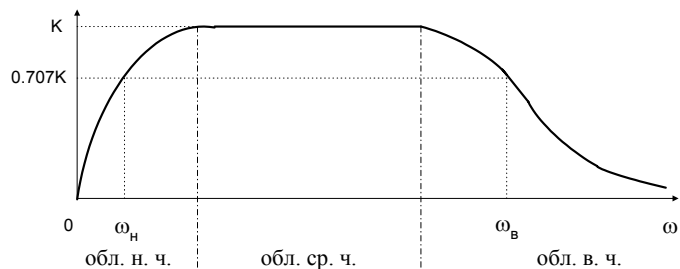


Рис.4.

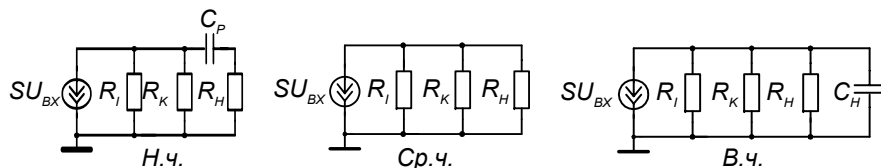


Рис.5.

Нередко в устройствах радиоэлектроники и установках экспериментальной физики существует необходимость усиливать колебания в диапазоне частот от единиц и десятков Гц до сотен и тысяч МГц. Такие усилители называются широкополосными. Основными типами каскадов широкополосного усилителя являются усилители с резистивно-емкостной связью. Специфической особенностью этих каскадов в широкополосных усилителях является наличие дополнительных цепей частотной коррекции, обеспечивающих расширение полосы частот равномерно усиливаемых гармонических составляющих колебаний.

Существует большое количество схем высокочастотной коррекции, представляющих собой как двухполюсные цепи, включаемые параллельно выходной цепи усилительного каскада, так и четырехполюсники, включаемые между электронным прибором и нагрузкой каскада. Общая идея этих схем сводится к компенсации влияния шунтирующих емкостей при помощи индуктивностей. Наиболее простым методом высокочастотной коррекции является включение в коллекторную цепь электронного прибора корректирующей индуктивности (рис. 6). Эквивалентная схема этого каскада для высокочастотной области приведена на рис. 7.

Принцип действия коррекции заключается в следующем. На высших частотах коэффициент усиления каскада на резисторах падает из-за шунтирующего влияния емкости $C_{ш}$. При включении последовательно с R_K индуктивности L в коллекторной цепи каскада элементы R_K , L и $C_{ш}$ образуют колебательный контур, сопротивление которого равно R_K на низших частотах, а на резонансной частоте может быть сделано равным и даже превышающим R_K . Выбрав L так, чтобы резонанс имел место там, где частотная характеристика каскада падает из-за влияния

$C_{ш}$ можно значительно расширить полосу усиливаемых каскадом частот и даже получить подъем частотной характеристики на высших частотах.

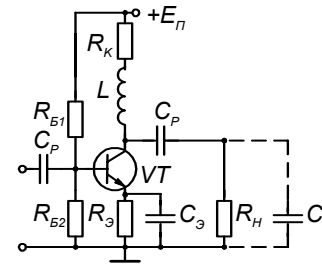


Рис. 6.

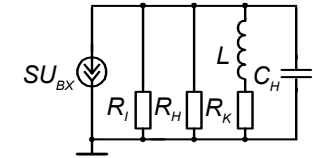


Рис. 7.

Для аperiodических усилителей сопротивление нагрузки ЭП R_K обычно значительно меньше сопротивлений R_i и R_H . В этом случае схема коррекции рис. 6 характеризуется одним безразмерным параметром (коэффициентом коррекции)

$$n = \frac{L}{C_{ш} R_K^2} . \quad (6)$$

Величина n по существу является квадратом добротности колебательного контура, образованного элементами L , $C_{ш}$, R_K . Обычно значение n выбирают в пределах от 0,2 до 0,5. На рис. 8 изображен график АЧХ усилительного каскада с высокочастотной коррекцией. На этом же рисунке приведен график АЧХ каскада без коррекции (пунктирная линия).

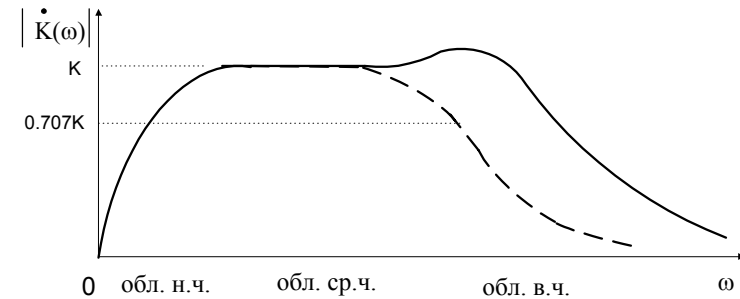


Рис. 8.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из базового устройства, которое представляет собой собранный на шасси усилительный каскад с резистивно-емкостной связью. На верхней панели базового устройства изображена принципиальная схема усилителя, а также расположены переключатели, которые позволяют выбирать различные значения основных элементов схемы и включать цепи ВЧ коррекции. Питание установки осуществляется от лабораторного источника

постоянного напряжения. В состав лабораторной установки входят также измерительные генераторы и электронный осциллограф.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Начертить варианты схем апериодических усилителей на различных электронных приборах. Описать и знать назначение элементов схем.
2. Изучить принцип усиления электрических сигналов. На примере апериодического усилителя изучить и привести в тетради анализ динамической задачи линейной теории усиления.
3. Изучить вид АЧХ апериодического усилителя, влияние на АЧХ элементов схемы.
4. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. На частоте входного сигнала 1 кГц экспериментально снять АХ: зависимость амплитуды выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от амплитуды входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ при $C_{P\text{MAX}}$.
2. Экспериментально снять амплитудно-частотные характеристики $K(\omega) = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ усилительного каскада для значений: $C_{P1}, C_{Ш1}, R_K; C_{P2}, C_{Ш1}, R_K; C_{P1}, C_{Ш2}, R_K; C_{P1}, C_{Ш1}, R_K + j\omega L; C_{P1}, C_{Ш2}, R_K + j\omega L$.
3. Построить графики снятых характеристик и объяснить ход зависимости $|K(\omega)|$ в каждом случае.

Примечание: При построении графиков АЧХ целесообразно использовать по оси абсцисс логарифмический масштаб частоты $\lg f$, поэтому в процессе измерений в пределах каждой декады частот следует брать значения частот кратные 1, 2, 5.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению работы.
2. В виде графиков результаты экспериментальных исследований.
3. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните назначение элементов и принцип действия апериодических усилителей на различных ЭП.
2. Дайте определение АЧХ усилительного каскада, укажите способы ее получения и ее основные частотные области. Как по АЧХ определяется полоса пропускания?
3. Как влияют величины элементов $C_P, C_{Ш}$ и R_K на АЧХ?
4. Почему в апериодических усилителях с ростом частоты наблюдается снижение коэффициента усиления?
5. Как зависят коэффициент усиления и полоса пропускания от величины R_K и R_H ?
6. Объясните действие цепей коррекции.

ЛИТЕРАТУРА: [1]–[3], [5], [7].

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЕ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – экспериментальное исследование влияния отрицательных обратных связей (ООС) на работу апериодического усилителя и его характеристики, ознакомление с методами схемотехнической реализации обратных связей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обратной связью называют явление, при котором результаты какого-либо процесса влияют на его протекание. Обратные связи присущи замкнутым системам. И если, при этом, интенсивность процесса возрастает, то обратную связь называют *положительной*, а в противном случае – *отрицательной*.

В радиоэлектронике обратные связи осуществляют посредством электронных приборов (транзисторов, электронных ламп), в которых величина коллекторного тока зависит от разности напряжений между управляющим и инжекторным электродами, т.е. управляется этой разностью. С помощью обратных связей создают многие полезные устройства аналоговой и цифровой техники. В частности *отрицательную обратную связь* (ООС) используют для стабилизации режимов работы цепей, для уменьшения искажений сигналов в линейных усилителях, для осуществления автоматического управления параметрами радиотехнических устройств и систем промышленной электроники.

Функциональная схема простейшей системы с ОС, содержащая звенья прямой передачи и обратной связи, представлена на рис. 1. Если эти звенья – однонаправленные линейные цепи с комплексными коэффициентами передачи \dot{K} и \dot{B} , связывающими комплексные амплитуды $\dot{S}_{ВХ}$ и $\dot{S}_{ВЫХ}$ сигналов, тогда откуда следует выражение, определяющее комплексный коэффициент передачи системы с ОС

В общем случае усилитель с ОС представляется структурной схемой (рис. 1), которая содержит цепь прямой передачи – усилитель с комплексным коэффициентом передачи $\dot{K} = \dot{S}_{ВЫХ} / \dot{S}'_{ВХ}$ и цепь обратной связи с комплексным коэффициентом обратной передачи $\dot{B} = \dot{S}_{ОС} / \dot{S}_{ВЫХ}$. Коэффициент обратной связи показывает, какая часть сигнала (энергии, напряжения, тока) с выхода усилителя подается на вход. В усилителях обычно используют пассивную цепь ОС. Цепь обратной связи и цепь прямой передачи образуют замкнутый контур, который называют петлей обратной связи.

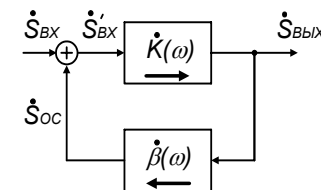


Рис. 1.

Входной сигнал цепи прямой передачи \dot{S}'_{BX} представляет алгебраическую сумму входного сигнала усилителя с ОС \dot{S}_{OC} и сигнала ОС \dot{S}'_{OC} :

$$\dot{S}'_{BX} = \dot{S}_{BX} + \dot{S}'_{OC} = \dot{S}_{BX} + \dot{B}\dot{S}_{ВЫХ}, \quad (1)$$

поэтому сигнал на выходе усилителя будет равен:

$$\dot{S}_{ВЫХ} = \dot{K}\dot{S}'_{BX} = \dot{K}(\dot{S}_{BX} + \dot{B}\dot{S}_{ВЫХ}). \quad (2)$$

Решив (2) относительно $\dot{S}_{ВЫХ}$ получим

$$\dot{S}_{ВЫХ} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K}\dot{B}} \dot{S}_{BX}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что комплексный коэффициент передачи усилителя с ОС $\dot{K}_{OC} = \dot{S}_{ВЫХ} / \dot{S}_{BX}$ связан с комплексными коэффициентами передачи цепей прямой и обратной передачи соотношением:

$$\dot{K}_{OC} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K}\dot{B}}. \quad (4)$$

Произведение $\dot{K}\dot{B}$ называется петлевым усилением, а величина $(1 - \dot{K}\dot{B})$ – глубиной ОС. Петлевое усиление определяет характер обратной связи и коэффициент усиления \dot{K}_{OC} усилителя с ОС. В общем случае, когда петлевое усиление $\dot{K}\dot{B} > 0$, то $K_{OC} > K$ (в системе действует положительная обратная связь (ПОС)), а при $\dot{K}\dot{B} < 0$ – $K_{OC} < K$ (в системе действует отрицательная обратная связь (ООС)). Так как $\dot{K} = ke^{j\varphi_K}$ и $\dot{B} = \beta e^{j\varphi_B}$, где φ_K и φ_B фазовые сдвиги сигнала, вносимые цепями прямой передачи и обратной связи, комплексный коэффициент передачи \dot{K}_{OC} усилителя с ОС можно представить в виде:

$$\dot{K}_{OC} = \frac{ke^{j\varphi_K}}{1 - k\beta e^{j(\varphi_K + \varphi_B)}}. \quad (5)$$

В частности, при $\varphi_K + \varphi_B = 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, \dots$, петлевое усиление $\dot{K}\dot{B} = k\beta$ величина вещественная и положительная, при этом сигнал обратной связи поступает на вход цепи прямой передачи (усилителя) в фазе со входным сигналом (действует ПОС). В случае, когда $0 < k\beta < 1$ имеет место регенеративное усиление при этом $K_{OC} > K$, а при выполнении условия $\dot{K}\dot{B} = 1$ усилитель с ПОС становится неустойчивым и самовозбуждается. При $\varphi_K + \varphi_B = \pi(2n + 1)$ петлевое усиление $\dot{K}\dot{B} = -k\beta$ – величина вещественная и отрицательная, при этом сигнал обратной связи поступает на вход цепи прямой передачи (усилителя) в противофазе с входным сигналом (действует ООС). В этом случае, как следует из (5), коэффициент усиления усилителя с ООС равен

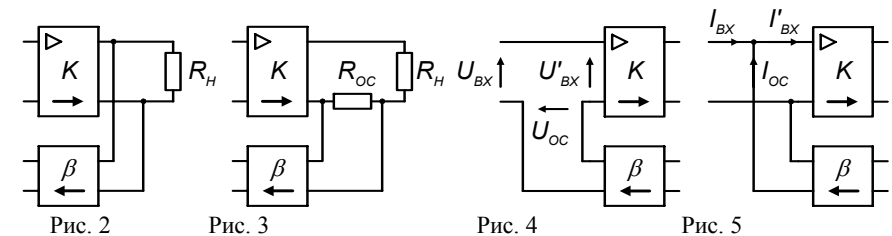
$$k_{OC} = \frac{k}{1 + k\beta}, \quad (6)$$

т.е. коэффициент усиления усилителя уменьшается в $(1 + k\beta)$ раз. Несмотря на уменьшение коэффициента усиления, ООС широко применяется в усилителях, так как улучшает ряд других параметров. В частности, стабилизирует работу усилителя

уменьшая зависимость от изменений параметров транзисторов, колебаний напряжения питания и величины нагрузки, резко уменьшает нелинейные и частотные искажения, вносимые усилителем, ослабляет уровень внутренних помех, расширяет полосу пропускания. При глубокой ООС ($k\beta \gg 1$) коэффициент усиления равен $k_{oc} = 1/\beta$ т.е. определяется только параметрами цепи обратной связи и не зависит от параметров исходного усилителя без ООС.

Различают ОС *внутренние* и *внешние*. Внутренние ОС являются неотъемлемой частью усилителей и обусловлены физическими процессами в электронных приборах, а также емкостными, индуктивными и гальваническими связями между выходными и входными цепями усилителя. ОС, обусловленные такими связями, называют паразитными обратными связями. Обычно паразитные связи в усилителе стараются ослабить настолько, чтобы они практически не сказывались на его свойствах. Так как ОС сильно влияет на характеристики усилителя, ее часто вводят в усилитель преднамеренно для изменения его свойств в нужном направлении. В этом случае для передачи части сигнала с выхода на вход используют внешние цепи обратной связи и такие ОС называют внешними.

В зависимости от способа получения сигнала ОС с выхода усилителя различают обратную связь по напряжению (рис. 2) и по току (рис. 3). Чтобы выяснить в конкретной схеме каким способом получен сигнал ОС можно воспользоваться следующим правилом: если мысленно закоротить нагрузку, то ОС по току сохраняется, а по напряжению – исчезает.



По способу подачи сигнала ОС на вход усилителя различают последовательную (рис. 4) и параллельную (рис. 5) обратные связи. При последовательной ОС на входе усилителя (цепи прямой передачи) выполняется алгебраическое суммирование напряжений. При параллельной ОС - выполняется алгебраическое суммирование токов. Комбинируя способы получения и подачи сигнала ОС получают четыре основных типа ОС: последовательную по напряжению, последовательную по току, параллельную по напряжению, параллельную по току.

Способ получения сигнала ОС влияет на выходное сопротивление усилителя, а способ подачи сигнала ОС на вход влияет на входное сопротивление. ОС по напряжению уменьшает выходное сопротивление, а ОС по току – увеличивает его. В случае последовательной ООС увеличивается входное сопротивление, а в случае параллельной ООС входное сопротивление уменьшается.

Типы ОС проанализируем на примере однокаскадных усилителей рис. 6, 7. В обеих схемах цепь ОС образует резистор R_3 , включенный в цепь эмиттера транзистора. Входное напряжение действует на базу относительно корпуса $U_B = U_{BX}$.

Изменение U_{BX} вызывает изменение напряжения на эмиттере $U_{\text{э}} = R_{\text{э}} I_{\text{э}} = U_{OC}$. Так как для транзистора управляющим является напряжение $U_{B\text{э}}$, то в обеих схемах имеем

$$U_{B\text{э}} = U_B - U_{\text{э}} = U_{BX} - U_{OC}, \quad (7)$$

т.е. в рассматриваемых схемах действует последовательная ООС. Эмиттерный повторитель (рис. 6) является усилителем с последовательной ООС по напряжению (т.к. при $R_H = 0 \rightarrow U_{OC} = U_{B\text{ВЫХ}} = 0$), причем $\beta = 1$.

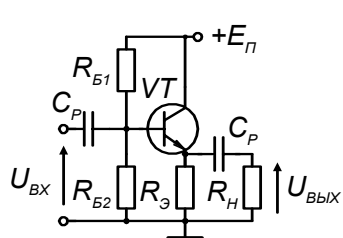


Рис. 6

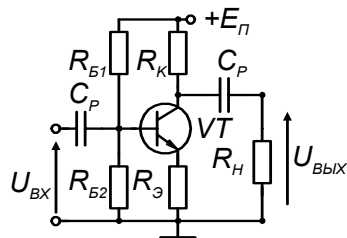


Рис. 7

Усилитель на рис. 7 охвачен последовательной ООС по току, поскольку при $R_H = 0 \rightarrow U_{OC} = U_{\text{э}} \neq 0$, причем $\beta = U_{OC} / U_{B\text{ВЫХ}} = R_{\text{э}} I_{\text{э}} / (-R_{\text{к}} I_{\text{к}}) \approx -R_{\text{э}} / R_{\text{к}}$ (т.к. $I_{\text{к}} \gg I_{\text{б}}$, полагаем $I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$). В рассматриваемых схемах ОС частотнонезависима, поскольку напряжение U_{OC} не зависит от частоты. В усилителях применяют также частотно-избирательную ОС. Например, шунтированием резистора $R_{\text{э}}$ в схеме, изображенной на рис. 7 конденсатором $C_{\text{э}}$ большой емкости ($1/\omega_H C_{\text{э}} \ll R_{\text{э}}$, где ω_H – нижняя частота спектра усиливаемого сигнала), создают ООС по постоянной составляющей тока эмиттера для стабилизации режима покоя усилителя. Кроме внутрикаскадной ООС в многокаскадных усилителях применяют межкаскадную ООС (см. рис. 8). В высококачественных УЗЧ межкаскадную ООС применяют для подавления нелинейных искажений и обеспечения устойчивости.

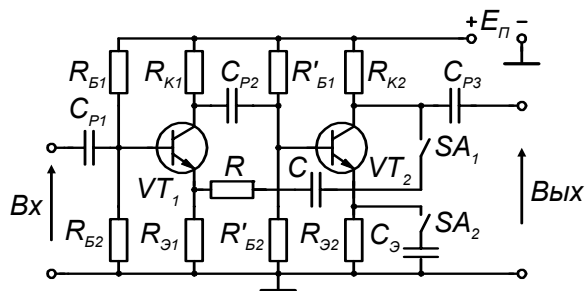


Рис. 8

Обязательным условием нормального функционирования усилителя является его устойчивость. В физическом понимании свойство устойчивости означает, что конечные изменения входного сигнала не вызывают неограниченного изменения выходного сигнала, а после прекращения действия возмущающего воздействия усилитель возвращается к исходному, невозмущенному состоянию.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой двухкаскадный апериодический усилитель, собранный на отдельном шасси по схеме рис. 8.

Переключатель SA_1 позволяет включать (кнопка нажата) или отключать (кнопка отжата) цепь межкаскадной последовательной ООС по напряжению. В эту цепь входят переключатель SA_1 , конденсатор C , резисторы R и $R_{\Sigma 1}$. Переключатель SA_2 отключает (кнопка нажата) или включает (кнопка отжата) конденсатор C_{Σ} , шунтирующий резистор $R_{\Sigma 2}$ в цепи эмиттера транзистора VT_2 . При отключенном блокировочном конденсаторе C_{Σ} (кнопка нажата) второй каскад охвачен частотно-независимой последовательной ООС по току.

Питание усилителя осуществляется от внешнего источника постоянного напряжения 10 В. При выполнении лабораторной работы следует использовать генератор гармонических сигналов и осциллограф.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. По литературным источникам уяснить суть ОС в электронных цепях, получить выражение для коэффициента усиления K_{OC} усилителя с ОС.
2. Сравнить абсолютные и относительные изменения коэффициентов усиления усилителя без ООС ($k_1 = 10, 9, 7, 5, 2$) и усилителя с ООС ($k_2 = 100, 90, 70, 50, 20$; $\beta = 0,09$).
3. Изучить типы ООС, которые применяются в усилителях.
4. Перерисовать схему усилителя лабораторной установки (рис. 8), определить цепи ООС, выделив их более жирными линиями, уяснить тип ООС, получить выражения для коэффициентов обратной связи β .
5. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Исследовать амплитудные характеристики усилителя без ООС и с ООС.

На вход усилителя подать от генератора сигнал частотой 1 кГц. Величину входного и выходного сигналов измерять с помощью осциллографа, подключая его поочередно к входу и к выходу. Входное напряжение изменять от 5 мВ до значений, при которых выходное напряжение перестает расти (наблюдаются нелинейные искажения выходного сигнала).

1.1. Снять амплитудную характеристику усилителя без ООС (кнопки переключателей SA_1 и SA_2 отжаты), с ООС по напряжению (кнопка переключателя SA_1 – нажата, а кнопка SA_2 – отжата), по току (кнопка SA_1 – отжата, а кнопка SA_2 – нажата), смешанная (кнопки переключателей SA_1 и SA_2 нажаты).

1.2. Построить графики амплитудных характеристик. По измеренным амплитудным характеристикам определить средние значения входных напряжений, при которых сохраняется режим линейного усиления усилителя без ООС и с ООС.

2. Исследовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) усилителя без ООС и с ООС.

При измерении АЧХ следует устанавливать средние значения входных напряжений, соответствующие режимам линейного усиления. При постоянной величине входного напряжения исследовать зависимость выходного напряжения от частоты.

2.1. Снять частотную характеристику усилителя без ООС (кнопки переключателей SA₁ и SA₂ отжаты), с ООС по напряжению (кнопка переключателя SA₁ – нажата, а кнопка SA₂ – отжата), по току (кнопка SA₁ – отжата, а кнопка SA₂ – нажата), смешанная (кнопки переключателей SA₁ и SA₂ нажаты) для частот 20, 50, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁷ Гц.

2.3. Построить графики АЧХ. При построении графиков АЧХ следует использовать по оси абсцисс логарифмический масштаб частоты $\lg f$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению лабораторной работы.
2. Графики амплитудных характеристик с определением пределов линейного усиления.
3. Графики АЧХ с определением частотных полос пропускания усилителя.
4. Выводы по проведенным исследованиям.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите классификацию типов обратных связей в усилителях.
2. Определите тип ОС по принципиальной схеме исследуемого усилителя. Докажите, что они отрицательные.
3. Как ООС влияет на входное и выходное сопротивление усилителя?
4. Как ООС влияет на частотные характеристики усилителя?
5. Для каких целей применяют ООС?

ЛИТЕРАТУРА: [1], [2], [4], [8]–[10].

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ (РЕЗОНАНСНЫЙ) УСИЛИТЕЛЬ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - изучение особенностей работы резонансного усилительного каскада; экспериментальное исследование влияния внешних элементов, шунтирующих колебательную систему усилителя, на его параметры и частотные характеристики.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Избирательные усилители применяются в радиопередатчиках и радиоприемных устройствах для усиления сигналов в заданной полосе частот. Использование колебательных систем в усилительных цепях в качестве нагрузки электронного прибора (ЭП) позволяет одновременно осуществлять линейное усиление и частотную избирательность сигналов.

Избирательный усилитель, у которого нагрузкой ЭП является одиночный параллельный колебательный контур, обычно называют резонансным.

Перестраиваемые резонансные усилители применяются в радиоприемниках для усиления сигнала на несущей частоте.

При использовании в качестве нагрузки ЭП перестраиваемых полосовых фильтров (связанных контуров, пьезоэлектрических резонаторов) усилители

называются полосовыми. В супергетеродинных радиоприемниках полосовые усилители применяются для усиления сигналов на промежуточной частоте, которая получается в результате преобразования несущей частоты. В таких приемниках они называются усилителями промежуточной частоты.

Основными параметрами и характеристиками избирательных усилителей являются: максимальный коэффициент усиления по напряжению $k_{MAX} = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$; частота максимального усиления f_0 ; амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), определяющая зависимость коэффициента усиления от частоты; полоса пропускания на уровне $k = 0,707k_{MAX} - \Delta f_{0,707}$; избирательность, которая определяет крутизну спадов АЧХ. Количественно избирательность оценивается коэффициентом прямоуглольности АЧХ, например: $K_n = \Delta f_{0,707} / \Delta f_{0,1}$. Для идеального усилителя $K_n = 1$.

При включении колебательной системы в цепь усилителя ее основные параметры - резонансная частота и добротность изменяются под шунтирующим влиянием ЭП и нагрузки усилительного каскада. Поэтому в зависимости от типа ЭП, нагрузки усилительного каскада и требований к частотной избирательности в усилителях применяют различные способы связи колебательной системы с ЭП и нагрузкой. Некоторые из них для резонансных усилительных каскадов представлены на рис. 1 – 5.

Наибольшее влияние внешних элементов на параметры колебательного контура происходит при непосредственной связи контура с ЭП и нагрузкой каскада (рис. 1). В схемах на полевых транзисторах (рис. 1, 2) колебательный контур полностью включается в стоковую цепь, так как выходное сопротивление полевого транзистора $R_{ВН}$ велико по сравнению с резонансным сопротивлением контура R_3 . В случае биполярного транзистора, имеющего $R_{ВН} < R_3$, применяют автотрансформаторную или трансформаторную связь контура с ЭП (рис. 3, 4). Для подключения нагрузки каскада может использоваться как трансформаторная (рис. 3), так и автотрансформаторная связь (рис. 2, 4). При автотрансформаторной и трансформаторной связях влияние внешних элементов ослабляется, в частности, достигается уменьшение шунтирующего действия активных сопротивлений, вносимых в колебательную систему. Это позволяет сохранить высокое значение ее добротности и обеспечить тем самым заданную полосу частот усиления.

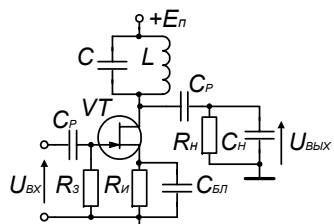


Рис. 1.

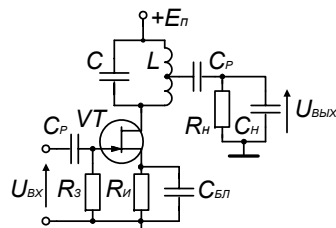


Рис. 2.

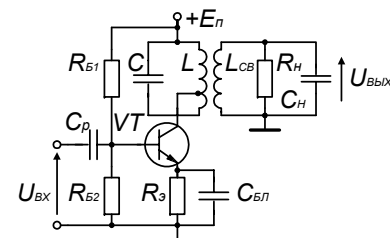


Рис. 3.

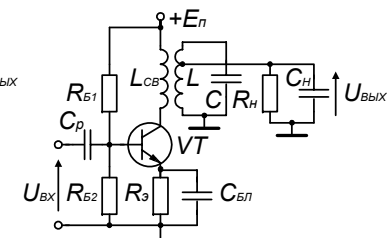


Рис. 4.

Примером резонансного усилителя на биполярном транзисторе с автотрансформаторной связью контура с ЭП и нагрузкой каскада является цепь, схема которой приведена на рис. 5. На этой схеме $R_{Б1}$, $R_{Б2}$ - делитель напряжения, задающий фиксированное напряжение покоя на базе, R_3 , $C_{БЛ}$ - цепочка термостабилизации режима покоя транзистора VT ; C_p - разделительные емкости; L и C - элементы колебательного контура; m_1 и m_2 - коэффициенты включения транзистора и нагрузки каскада в колебательную систему.

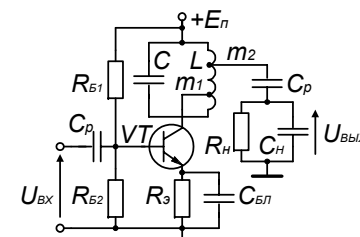


Рис. 5.

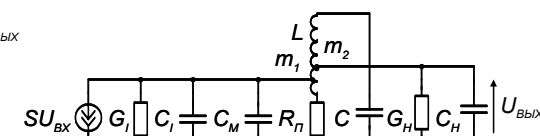


Рис. 6.

Анализ процесса линейного усиления производится в приближении малого сигнала. В этом приближении усилитель моделируется эквивалентной схемой. Эквивалентная схема составляется в предположении, что усилитель питается от идеального источника постоянного напряжения (ИН) E_n , а сопротивление емкостей C_p и $C_{БЛ}$ на усиливаемых частотах пренебрежимо мало. С учетом этих предположений, резонансному усилителю (рис. 5) можно поставить в соответствие эквивалентную схему (рис. 6). Она содержит схему замещения биполярного транзистора в малосигнальном приближении, которая на высоких частотах, кроме источника тока $SU_{ВХ}$ и внутренней проводимости G_i , включает еще внутреннюю емкость транзистора C_i ; емкость монтажа C_M ; элементы колебательного контура – индуктивность L , емкость C и резистор R_n , учитывающий сопротивление потерь катушки индуктивности, а также нагрузку каскада R_n и C_n .

Для упрощения расчета характеристик в эквивалентной схеме модель катушки индуктивности в виде последовательного соединения L и R_n заменим на основании принципа эквивалентности параллельным соединением L и

$G_{II} = R_{II} / (\omega L)^2$ (рис. 7), а элементы, автотрансформаторно подключенные к контуру, используя трансформацию проводимостей и тока (рис. 8, 9), приведем в цепь колебательного контура. После выполнения этих преобразований получим эквивалентную схему (рис. 10), удобную для анализа. Здесь полная эквивалентная емкость $C_{ЭКВ}$ складывается из емкости контура C и вносимых в систему емкостей со стороны ЭП и нагрузки каскада

$$C_{ЭКВ} = C + m_1^2(C_i + C_M) + m_2^2 C_H, \quad (1)$$

а полная эквивалентная проводимость $G_{ЭКВ}$ складывается из собственной проводимости потерь катушки индуктивности G_{II} и вносимых в систему проводимостей со стороны ЭП и нагрузки каскада

$$G_{ЭКВ} = G_{II} + m_1^2 G_i + m_2^2 G_H. \quad (2)$$

Электрическое состояние эквивалентной колебательной системы (рис. 10) описывается уравнением

$$(G_{ЭКВ} + j\omega C_{ЭКВ} + 1/j\omega L)\dot{U}_1 = -m_1 S \dot{U}_{ВХ}, \quad Y_{ЭКВ} \dot{U}_1 = -m_1 S \dot{U}_{ВХ}, \quad (3)$$

где \dot{U}_1 - напряжение на контуре.

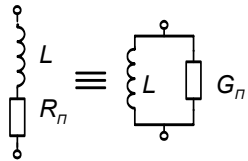


Рис. 7.

$$G_{II} = \frac{(\omega L)}{R_{II}}$$

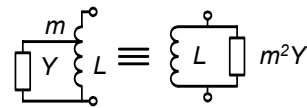


Рис. 8.

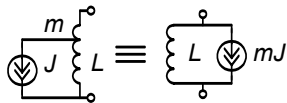


Рис. 9.

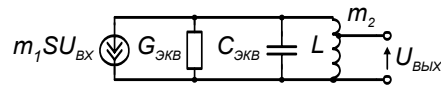


Рис. 10.

Комплексная передаточная функция, устанавливающая связь выходного сигнала с входным, с учетом того, что $\dot{U}_{ВЫХ} = m_2 \dot{U}_1$, определяется выражением

$$\dot{k}(\omega) = \dot{U}_{ВЫХ} / \dot{U}_{ВХ} = -m_1 m_2 S / Y_{ЭКВ} = -m_1 m_2 S Z_{ЭКВ}. \quad (4)$$

Поскольку параметры m_1 , m_2 , S частотонезависимые, комплексное входное сопротивление $Z_{ЭКВ}$ полностью определяет частотную зависимость $\dot{k}(\omega)$. С учетом того, что в малой окрестности резонансной частоты

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{ЭКВ}}}, \quad \left(f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{ЭКВ}}} \right) \quad (5)$$

можно пренебречь частотной зависимостью проводимости потерь катушки индуктивности G_{II} , положив ее равной $R_{II}/(\omega_0 L)^2$, $Z_{ЭКВ}$ представляется в виде

$$Z_{ЭКВ} = \frac{1}{G_{ЭКВ} + j(\omega C_{ЭКВ} - 1/\omega L)} = \frac{R_{ЭКВ}}{1 + jQ_{ЭКВ}(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)} = R_{ЭКВ} N(\omega), \quad (6)$$

где $Q_{ЭКВ} = \frac{\omega_0 C_{ЭКВ}}{G_{ЭКВ}}$ – эквивалентная добротность, $R_{ЭКВ} = \rho Q_{ЭКВ}$ – входное сопротивление эквивалентной колебательной системы на резонансной частоте ($\rho = \sqrt{L/C_{ЭКВ}}$ характеристическое сопротивление), $N(\omega) = \frac{1}{1 + jQ(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)}$.

С добротностью ненагруженного колебательного контура $Q_0 = \omega_0 L/R_{II}$ эквивалентная добротность $Q_{ЭКВ}$ связана соотношением

$$Q_{ЭКВ} = \frac{Q_0}{1 + m_1^2 G_i/G_{II} + m_2^2 G_{II}/G_{II}}. \quad (7)$$

На резонансной частоте коэффициент усиления достигает максимального значения $k_{MAX} = |k_0|$, где

$$k_0 = -m_1 m_2 S R_{Э}. \quad (8)$$

Зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты описывается АЧХ, которая определяется как модуль комплексной передаточной функции

$$|\dot{k}(\omega)| = m_1 m_2 S |Z_{ЭКВ}| = \frac{|k_0|}{\sqrt{1 + Q_{ЭКВ}^2 (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}}. \quad (9)$$

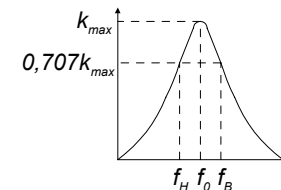


Рис. 11.

Полученные в результате анализа режима линейного усиления соотношения позволяют оценить влияние величины связи контура с ЭП и нагрузки каскада на частотные характеристики усилителя. На практике они находят широкое применение при определении основных характеристик и параметров резонансных усилителей, а также используемых в них колебательных систем. Так, например, АЧХ резонансного усилителя согласно (9) имеет вид зависимости, показанной на рис. 11. Формула (9) определяет также связь значений $Q_{ЭКВ}$, ω_0 и ширины полосы пропускания усилителя

$\Delta\omega_{0,707}$ на уровне $|\dot{k}(\omega)| = k_{MAX}/\sqrt{2} \approx 0,707 k_{MAX}$

$$Q_{ЭКВ} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{0,707}} = \frac{f_0}{\Delta f_{0,707}}. \quad (10)$$

Формула (10) широко используется для определения добротности простейших колебательных систем по экспериментально снятым АЧХ.

Формула (7) позволяет определить добротность ненагруженного контура на основании двух $Q_{ЭКВ}$, измеренных при различных значениях вносимой в контур активной проводимости. Так, например, пусть в усилителе без нагрузки ($G_H = 0$) добротность принимает значение $Q_{ЭКВ1}$ при полном включении ЭП в колебательную систему ($m_1 = 1$) и $Q_{ЭКВ2}$ - при частичном ($m_1 < 1$). Тогда, составив с помощью (7) систему из двух уравнений и решив ее относительно Q_0 , получим:

$$Q_0 = \frac{(1 - m_1^2) Q_{ЭКВ1} Q_{ЭКВ2}}{Q_{ЭКВ1} - m_1^2 Q_{ЭКВ2}}. \quad (11)$$

Подставив в эту формулу результаты измерений $Q_{ЭКВ1}$ и $Q_{ЭКВ2}$, находим значение добротности Q_0 . Аналогичным образом можно определить G_1 или G_H .

Измеряя значения резонансных частот при различных коэффициентах включения m_1 и m_2 , из выражений (1), (5) можно определить значения емкостей C_i , C_M и C_H .

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой выполненный на отдельном шасси резонансный усилитель на биполярном транзисторе с автотрансформаторной связью ЭП и нагрузки каскада с колебательным контуром. Принципиальная схема усилителя изображена на верхней панели. Переключатели SA1, SA2 позволяют установить требуемые значения коэффициентов связи m_1 , m_2 колебательного контура с транзистором и нагрузкой каскада. Переменный конденсатор позволяет изменять емкость контура C .

При выполнении лабораторной работы используются: источник постоянного напряжения, генератор гармонических сигналов, электронный осциллограф.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Изучить разновидности избирательных усилителей радиочастоты, нарисовать в рабочей тетради их принципиальные схемы на различных ЭП.
2. Для эквивалентных моделей катушки индуктивности (рис. 6) определить связь между L , R_H последовательной цепи и L , G_H параллельной цепи, при этом в $Y_{ЭКВ}$ учесть, что $R_H \ll \omega L$.
3. Используя баланс мощностей в цепях первичной и вторичной обмоток идеального трансформатора, вывести формулу, определяющую трансформацию проводимости G_1 из цепи первичной обмотки в цепь вторичной обмотки при $U_1/U_2 = m$.
4. Провести анализ режима линейного усиления резонансного усилителя с полным включением транзистора и нагрузки каскада.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Перед включением лабораторной установки уяснить назначение переключателей, регулировок, измерительных приборов, соединительных клемм и контрольных гнезд.

Амплитуду входного напряжения рекомендуется установить $U_{вх} = 10$ мВ.

При измерении $U_{вых}$ на резонансных частотах подбором чувствительности осциллографа следует добиваться, чтобы размах напряжения занимал больше половины экрана осциллографа. При измерении АЧХ входное напряжение следует поддерживать постоянным.

1. Исследовать шунтирующее влияние транзистора на характеристики резонансного усилительного каскада.

Исследования проводить без нагрузки каскада при $m_2 = 1$.

1.1 Установить $m_1 = 1$. Найти резонансную частоту f_0 , на которой наблюдается максимальное усиление. Измерить $U_{вых}(f_0)$ и определить коэффициент усиления. Снять АЧХ каскада, для чего, плавно изменяя частоту сначала в сторону увеличения, а потом в сторону уменьшения, снимать $U_{вых}$, пока выходное напряжение не уменьшится приблизительно в семь раз от его максимального значения.

1.2 Установить $m_1 = 0,7$. Перестраивая по частоте генератор гармонических колебаний, определить и измерить резонансную частоту f_0 . Измерить $U_{вых}(f_0)$ и $U_{вх}(f_0)$, определить коэффициент усиления. Снять АЧХ каскада.

1.3 Установить $m_1 = 0,5$. Повторить измерения п. 1.2.

2. Исследовать влияние нагрузки каскада на характеристики усилителя.

К выходным клеммам усилителя подключить нагрузку, установить $m_1 = 0,5$.

2.1 Установить $m_2 = 1$. Перестраивая по частоте генератор гармонических колебаний, определить и измерить резонансную частоту f_0 . Измерить $U_{вых}(f_0)$ и $U_{вх}(f_0)$, определить коэффициент усиления. Снять АЧХ каскада.

2.2 Установить $m_2 = 0,7$. Перестраивая по частоте генератор гармонических колебаний, определить и измерить резонансную частоту f_0 . Измерить $U_{вых}(f_0)$ и $U_{вх}(f_0)$, определить коэффициент усиления. Снять АЧХ каскада.

2.3 Установить $m_2 = 0,5$. Перестраивая по частоте генератор гармонических колебаний, определить и измерить резонансную частоту f_0 . Измерить $U_{вых}(f_0)$ и $U_{вх}(f_0)$, определить коэффициент усиления. Снять АЧХ каскада.

3. По результатам измерений построить графики АЧХ. Для каждой из них определить ширину полосы пропускания $\Delta f_{0,707}$ и $Q_{ЭКВ}$. Полученные значения f_0 , $\Delta f_{0,707}$, $Q_{ЭКВ}$ представить в виде таблиц для пунктов 1 и 2. По результатам измерений п. 1 рассчитать Q_0 .

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к работе.
2. Результаты, полученные при выполнении лабораторной работы (графики, таблицы, результаты расчетов).
3. Выводы по результатам проведенных исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой процесс усиления электрических сигналов?
2. Какие элементы включает усилительный каскад? Объясните их назначение.
3. Почему в избирательных усилителях используется частичные связи ЭП и нагрузки каскада с колебательной системой? Укажите виды этих связей.
4. Как, измеряя АЧХ резонансного усилителя, можно определить параметры ненагруженного колебательного контура?
5. Как изменяется коэффициент усиления на резонансных частотах при изменении коэффициентов включения?

ЛИТЕРАТУРА: [1], [2], [5], [12], [13].

ПОВТОРИТЕЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: ознакомление с принципами схемотехнического построения повторителей на биполярном и полевом транзисторах; изучение их работы; исследование режима покоя и режима линейного усиления; определение границ области линейного усиления; определение входного и выходного сопротивлений .

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из известных видов усилительных каскадов является схема с *общим коллектором* (стоком, анодом). Обобщенная схема такого каскада, которая содержит последовательно включенные *основные элементы усилителя*: ЭП, нагрузку ЭП, источник питания – источник постоянного напряжения $E_{п}$, показана на рис. 1. Процесс усиления схемы заключается в том, что входной сигнал путем изменения сопротивления ЭП управляет силой тока в цепи, а, следовательно, и распределением напряжений U_R , $U_{ЭП}$. В данной схеме колебание U_R рассматривается как выходной сигнал и направляется потребителю в нагрузку усилителя. Усилительный каскад с общим коллектором в отличие от каскада с общим эмиттером не меняет полярности сигнала, отчего и называется *повторителем*.

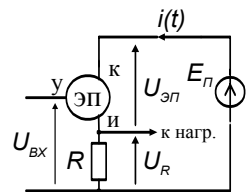


Рис. 1.

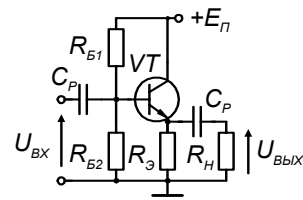


Рис. 2.

Схема на *биполярном транзисторе* (БПТ), показанная на рис. 2, носит название *эмиттерный повторитель*. Кроме основных элементов (ЭП – БПТ, нагрузка ЭП – $R_{э}$, источник питания – $E_{п}$), схема содержит вспомогательные

элементы – делитель напряжения в цепи базы, состоящий из $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, и разделительные емкости C_p . С помощью делителя напряжения задают фиксированное напряжения на базе, которое позволяет выбрать *точку покоя* (режим покоя – $U_{ВХ} = 0$) в линейной области вольт - амперной характеристики транзистора. Разделительные емкости C_p обеспечивают развязку входа и выхода усилителя по постоянной составляющей.

Схема *истокового повторителя* приведена на рис. 3. Основными элементами схемы являются: ЭП – *полевой транзистор* (ПТ) с управляемым р-п переходом, нагрузка ЭП – резистор в цепи истока, источник питания – $E_{П}$. Резистор R_3 , емкости C_p – вспомогательные элементы. Поскольку в ПТ ток затвора отсутствует, резистор R_3 сопротивлением более сотен килоом используют для передачи нулевого потенциала корпуса на затвор. Назначение разделительных емкостей то же, что и в эмиттерном повторителе.

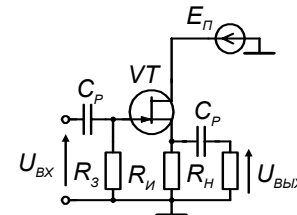


Рис. 3.

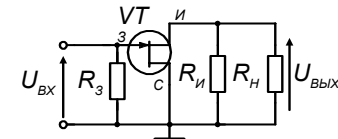


Рис. 4.

Анализ процесса усиления проведем на примере истокового повторителя. Полагая, что усиление рассматривается на частотах, для которых сопротивление разделительной емкости $X_C = 1/\omega C_p$ пренебрежимо мало и внутреннее сопротивление идеального источника постоянного напряжения равно нулю, составим вспомогательную схему повторителя для колебательного процесса (рис. 4). Заменив ЭП его схемой замещения в малосигнальном приближении, получим эквивалентную схему усилительного каскада, показанную на рис. 5. Для эквивалентной схемы на основании метода узловых напряжений получим уравнение, которое имеет вид:

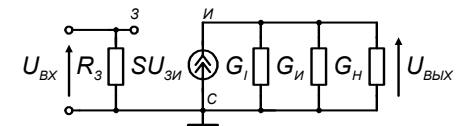


Рис. 5.

$$(G_I + G_C + G_H) \dot{U}_{ВЫХ} = S \dot{U}_{3-И} \quad (1)$$

Из решения уравнения (1) с учетом того, что $\dot{U}_{3-И} = \dot{U}_3 - \dot{U}_И = \dot{U}_{ВХ} - \dot{U}_{ВЫХ}$ получают коэффициент усиления:

$$k_U = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{S}{S + G_i + G_c + G_H}. \quad (2)$$

Как видно из приведенной формулы, повторитель имеет КУ по напряжению меньше единицы, причем он вещественный и положительный, т.е. полярность выходного напряжения совпадает с полярностью входного напряжения. Хотя $k_U < 1$, однако повторитель усиливает входной сигнал по току и мощности.

Следует отметить, что с позиций обратных связей в усилительных цепях, повторитель является примером усилителя охваченного *глубокой последовательной отрицательной обратной связью* (ООС) по напряжению. Благодаря глубокой ООС расширяется динамический диапазон входного сигнала, в пределах которого усилитель сохраняет линейное усиление (в этом можно убедиться, измерив амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$), расширяется полоса усиливаемых частот, а амплитудно-частотная характеристика становится более равномерной. Глубокая ООС последовательного типа обеспечивает повторителю высокое входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХЭП}} / (1 - k_U)$. По способу получения сигнала с выхода обратная связь классифицируется как ООС по напряжению, что обуславливает низкое выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = 1/S$. Высокое входное и низкое выходное сопротивления, широкая полоса пропускания позволяют не нагружая предыдущей цепи, передать практически без искажений сигнал на выходную нагрузку, непосредственное подключение которой без повторителя привело бы к существенным искажениям. Именно эти свойства повторителя обусловили его широкое применение в качестве входных, выходных и буферных каскадов в различных радиоэлектронных устройствах, включая и интегральные микросхемы.

Экспериментально входное и выходное сопротивления повторителя можно определить представив усилитель четырехполюсником с эквивалентной схемой, показанной на рис. 6. Входное сопротивление определяется по уменьшению амплитуды $U_{\text{ВЫХ}}$, обусловленному включением на вход усилителя последовательно с $R_{\text{ВХ}}$ и генератором резистора R_1 . Измерив напряжение $U_{\text{ВЫХ1}}$ без R_1 , а также $U_{\text{ВЫХ2}}$ при подключенном R_1 и постоянном $U_{\text{Г}}$ ($U_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} U_{\text{Г}} / (R_{\text{ВХ}} + R_1)$), с учетом постоянства КУ, входное сопротивление определяется по формуле

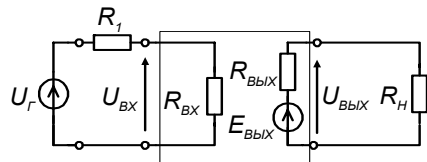


Рис. 6.

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ2}} R_1 / (U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}}). \quad (3)$$

Выходное сопротивление усилителя определяется косвенно по изменению коэффициента усиления под действием изменения R_H . При постоянном $U_{\text{ВХ}}$ надо измерить $U_{\text{ВЫХ}}$ при двух значениях R_H и вычислить выходное сопротивление по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВЫХ1}} / U_{\text{ВЫХ2}} - 1) R_{\text{Н1}} / (R_{\text{Н1}} / R_{\text{Н2}} - U_{\text{ВЫХ1}} / U_{\text{ВЫХ2}}). \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из базового устройства, включающего источник питания; измерительные приборы контроля постоянного напряжения питания, постоянных токов базы, эмиттера, истока; RC-автогенератор гармонических колебаний и сменный набор однокаскадных усилителей. Тип усилителя выбирается закреплением на лицевой панели устройства платы с изображением схемы усилителя подлежащего исследованию. При выполнении лабораторной работы используется омметр, электронный осциллограф.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Нарисовать схемы эмиттерного и истокового повторителей. Изучить и описать назначение элементов схем.
2. Нарисовать вид ВАХ биполярного и полевого транзисторов.
3. Провести анализ режима линейного усиления повторителя. Получить выражение для коэффициента передачи напряжения.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Перед включением лабораторной установки уяснить назначение переключателей, регулировок, измерительных приборов, контрольных гнезд, расположенных на лицевой панели базового устройства! Перед сменой панелей схем усилителей на базовом устройстве выключать сеть!

1. Исследовать эмиттерный повторитель.

Постоянное напряжение питания коллекторной цепи установить равным $E_K = 10$ В, сопротивление нагрузки – максимальным.

1.1. Произвести настройку усилителя на максимальный коэффициент усиления. Переключатель S3 перевести в положение "выкл" (не в положение S3). Подключить генератор ко входу усилителя (гнездо 4). Контролируя входной сигнал (гнездо U_B) с помощью осциллографа, установить гармоническое колебание с частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $U_{BX} = 100$ мВ. После установки заданного U_{BX} , подключить осциллограф к выходу (гнезда 11, 12 на нагрузке). Наблюдая на осциллографе форму и амплитуду выходного напряжения, регулировкой $R_{Д1}$, $R_Э$ добиться максимальной амплитуды $U_{ВЫХ}$ без искажений. По измеренным $U_{ВЫХ}$, U_{BX} определить коэффициент усиления.

1.2. Определить режим покоя усилителя. Отключить генератор гармонических колебаний. Измерить постоянные токи I_B , $I_Э$, постоянные напряжения U_B , $U_Э$, $U_{БЭ}$.

1.3. Исследовать амплитудную характеристику усилителя. Изменяя амплитуду входного сигнала на частоте $f = 1$ кГц, измерить зависимость $U_{ВЫХ} = F(U_{BX})$. В процессе увеличения U_{BX} проследить за формой $U_{ВЫХ}$, амплитудой U_{BX} , при которой появляются нелинейные искажения $U_{ВЫХ}$. Зарисовать форму сигналов на входе и выходе.

1.4. Определите входное сопротивление усилителя по уменьшению амплитуды $U_{ВЫХ}$, обусловленное включением на вход усилителя последовательного резистора

$R_1 = R_{Г_{МАХ}} + R_{ИЗМ}$. При постоянной амплитуде сигнала на выходе генератора $U_Г$ измерить амплитуды напряжений на выходе усилителя:

$U_{ВЫХ1}$ – без резистора R_1 ($U_Г = 1В$ подать на гнездо 4);

$U_{ВЫХ2}$ – при включенном R_1 ($U_Г = 1В$ подать на гнездо 1).

Сопротивление резистора $R_1 = R_{Г_{МАХ}} + R_{ИЗМ}$ измерить омметром при отключенных генераторе и входе усилителя. По измеренным $U_{ВЫХ1}$, $U_{ВЫХ2}$, R_1 входное сопротивление усилителя вычисляется по формуле (3).

1.5. Определите выходное сопротивление по изменению коэффициента усиления при изменении R_H . При постоянной амплитуде входного сигнала ($U_{ВХ} = U_Г = 1В$ подать на гнездо 4) измерьте выходное напряжение:

$U_{ВЫХ1}$ – при $R_{H1} = 10$ кОм;

$U_{ВЫХ2}$ – при $R_{H2} = 0,3$ кОм.

Сопротивления измерять омметром при R_H , отключенном от выхода усилителя (переключатель S2 в среднем положении). По измеренным $U_{ВЫХ1}$, R_{H1} , $U_{ВЫХ2}$, R_{H2} , воспользовавшись формулой (4), вычислите выходное сопротивление.

Ручкой регулировки E_H установите $E_K = 0$ В. Выключите сеть. Снимите плату с изображением схемы эмиттерного повторителя.

2. *Исследование истокового повторителя.*

Установите плату с изображением истокового повторителя. Переключатель контроля E_H поставьте в положение E_C . Включите сеть. Ручкой регулировки E_H установите $E_C = 10$ В.

2.1. Настройте усилитель на максимальный коэффициент усиления аналогично п.1.1. (регулировку производите резистором R_H). Определите коэффициент усиления по напряжению.

2.2. Определите режим покоя повторителя аналогично п. 1.2. Измерьте U_3 , U_H , а затем определите $U_{ЗИ}$.

2.3. Исследуйте амплитудную характеристику аналогично п.1.3.

2.4. Определите $R_{ВХ}$ поступая аналогично п.1.4.

2.5. Определите $R_{ВЫХ}$ поступая аналогично п.1.5.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых усилительных каскадов.
3. Результаты экспериментальных исследований (значения $k_{МАХ}$; рассчитанные значения $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$; графики амплитудных характеристик, осциллограммы).
4. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Общие и отличительные черты повторителей на биполярном и полевом транзисторах. Назначение элементов схем.
2. Дайте определение линейного усиления. Из решения динамической задачи линейной теории усилителей получите выражение для коэффициента усиления повторителя.
3. Используя ВАХ ЭП, из графического решения статической задачи линейной теории усилителей поясните роль положения рабочей точки в режиме покоя на форму усиленного сигнала.
4. Какой параметр электронного прибора определяет главным образом величину коэффициента усиления? (Какие элементы схемы влияют на коэффициент усиления?)
5. Объясните отличие характеристик эмиттерного и истокового повторителей.

ЛИТЕРАТУРА: [1]–[6].

УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА (УПТ)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – ознакомление с принципами схемотехнического построения усилителей постоянного тока; изучение принципа действия и экспериментальное исследование дифференциального усилителя и УПТ, выполненных на дискретных элементах и в виде интегральной схемы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В устройствах автоматического контроля и регулирования часто регистрируются значения таких величин, как мощность, угол сдвига фаз, давление, температура, световой поток, прозрачность и многие другие. Эти электрические и неэлектрические величины во многих случаях удобно преобразуются в медленно изменяющиеся токи или напряжения, частота которых составляет всего лишь единицы или даже доли герца. Для усиления таких медленно изменяющихся напряжений или токов необходимы усилители, полоса пропускания которых имеет нижнюю граничную частоту $f=0$ Гц.

Усилители, имеющие равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) до самых низких частот, включая $f=0$ Гц, называют усилителями постоянного тока (УПТ), независимо от того, какая из величин – ток или напряжение подлежит усилению.

Усилители постоянного тока широко используются в электронных вычислительных устройствах, в измерительной технике, медицине, биологии. Электрические сигналы, воздействующие на вход УПТ, во многих случаях малы по величине. Обычно с помощью УПТ приходится усиливать напряжения порядка десятка микровольт, а токи порядка 10^{-15} - 10^{-16} А. Для усиления столь слабых сигналов одного каскада оказывается недостаточно, поэтому приходится применять несколько каскадов УПТ. В многокаскадных УПТ для связи между каскадами не могут быть использованы реактивные элементы (конденсаторы, трансформаторы), поэтому остается пригодной *непосредственная гальваническая* связь. Такая связь вносит в УПТ ряд специфических трудностей, связанных с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих напряжения и тока, необходимых для обеспечения нужного режима работы транзисторов, используемых в усилителях. Как и в

апериодических, резонансных и других усилителях, характеристики УПТ должны отвечать ряду требований линейного усиления: 1) в отсутствие входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал; 2) при изменении знака входного сигнала должен изменять знак выходной сигнал; 3) напряжение на выходе должно быть пропорционально входному напряжению. Второе и третье требования в УПТ выполняются при работе усилителя в режиме А. Для выполнения первого условия необходимо отделить полезный сигнал от постоянных составляющих токов и напряжений транзисторов.

Простейший вариант УПТ с гальванической связью между каскадами показан на рис. 1. Здесь усилительные каскады выполнены по схеме с общим эмиттером. Напряжение сигнала, усиленное предыдущим каскадом, непосредственно поступает на вход последующего каскада. При этом на базу следующего транзистора VT2, кроме полезного сигнала, подается постоянное напряжение коллектора предыдущего транзистора VT1. В приведенной схеме компенсация постоянной составляющей выходного напряжения предыдущего каскада достигается с помощью резистора $R_{Э2}$ последующего транзисторного каскада. Так, например, сопротивление резистора $R_{Э2}$ подбирается такой величины, чтобы постоянное падение напряжения на нем было больше падения напряжения на $R_{Э1}$ на разность напряжений коллектор-эмиттер предыдущего и база-эмиттер последующего транзистора $U_{Э2} = U_{Э1} + (U_{КЭ1} - U_{БЭ2})$. Напряжение $U_{БЭ2}$ должно соответствовать точке покоя второго каскада. Очевидно, что потенциалы коллекторов последующих транзисторов должны быть все более высокими. Это обстоятельство требует уменьшения сопротивлений $R_{К}$ и увеличения сопротивлений $R_{Э}$ последующих каскадов ($R_{К3} < R_{К2} < R_{К1}$ и $R_{Э3} > R_{Э2} > R_{Э1}$). Поскольку на сопротивлении эмиттерных резисторов создается напряжение отрицательной обратной связи (ООС), то с увеличением сопротивлений $R_{Э}$ глубина ООС возрастает. В результате коэффициент усиления последующих каскадов становится все более низким. Таким образом, создание многокаскадного УПТ с высоким коэффициентом усиления представляет собой весьма сложную задачу.

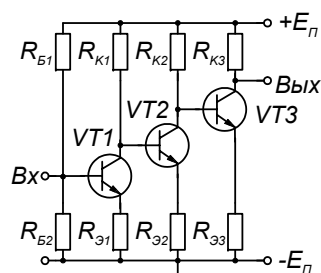


Рис. 1.

Важной и сложной проблемой является обеспечение высокой стабильности и чувствительности УПТ. Если в области высоких частот АЧХ УПТ не отличается от характеристик апериодических усилителей, то в области низких частот он должен усиливать сигналы вплоть до $f_H = 0$. Всякие медленные изменения постоянных составляющих $U_{К}$ и $U_{Б}$ из-за нестабильности источников питания, старения транзисторов, изменения температуры окружающей среды и т.п. принципиально не

отличаются от полезного сигнала. При этом нарушается компенсация и на выходе усилителя появляется напряжение при отсутствии входного сигнала. Изменения выходного напряжения с течением времени, которые не связаны с входным напряжением и обусловленные внутренними процессами в усилителе, называют *дрейфом нуля* усилителя.

Различают абсолютный дрейф нуля на выходе УПТ и дрейф, приведенный ко входу. Абсолютный дрейф нуля представляет собой максимальное изменение выходного напряжения при короткозамкнутом входе за определенный промежуток времени. Приведенный ко входу дрейф равен отношению абсолютного дрейфа к коэффициенту усиления по напряжению $U_{др.вх} = U_{др.вых} / k$. Величина $U_{др.вх}$ ограничивает минимально различимый сигнал, т.е. определяет чувствительность усилителя. Для борьбы с дрейфом нуля применяют целый ряд мер: 1) стабилизацию напряжения источников питания, стабилизацию температурного режима и тренировку транзисторов; 2) использование дифференциальных (балансных) схем УПТ; 3) преобразование усиливаемого напряжения в переменное и усиление переменного напряжения с последующим детектированием. *Дифференциальные усилители* (ДУ) строятся по принципу балансного моста (рис. 2), плечами которого являются R_{K1} , R_{K2} и внутренние сопротивления транзисторов VT1, VT2. К одной из диагоналей моста подведено напряжение источника питания, а в другую диагональ включен нагрузочный резистор R_H . В таких усилителях подбирают пару транзисторов со строго идентичными характеристиками, устанавливают одинаковыми их режимы, R_{K1} , R_{K2} выбирают одинаковыми. На резисторе $R_Э$ создается падение напряжения за счет токов эмиттеров транзисторов $U = (I_{Э1} + I_{Э2}) R_Э$, которое используется в качестве напряжения ООС. ДУ имеет два входа $U_{ВХ1}$, $U_{ВХ2}$ и два выхода $U_{К1}$, $U_{К2}$. Входной сигнал может подаваться тремя способами: 1) симметричным двухфазным $U_{ВХ1} = -U_{ВХ2}$; 2) несимметричным однофазным $U_{ВХ1} > 0$, при этом второй вход замкнут на корпус через резистор или накоротко; 3) симметричным синфазным $U_{ВХ1} = U_{ВХ2}$. Разностный (дифференциальный) входной сигнал обеспечивают первый и второй способы, синфазный входной сигнал – третий способ.

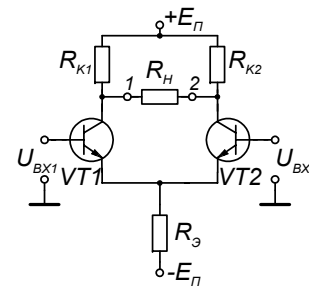


Рис. 2

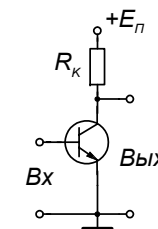


Рис. 3а

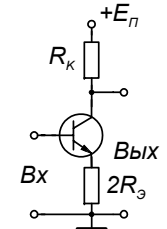


Рис. 3б

Для ДУ полезным входным сигналом является разностный сигнал. Синфазный сигнал – сигнал помех. Он обусловлен нестабильностью напряжения источника питания, температурной нестабильностью параметров транзисторов и резисторов. Выходной сигнал в ДУ может сниматься с коллектора одного из

транзисторов. При работе в режиме дифференциального усиления используют один выход – диагональный. В этом случае выходное напряжение равно

$$U_{ВЫХ} = U_{12} = U_{К1} - U_{К2} = k_P (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}). \quad (1)$$

Качество работы ДУ характеризуется коэффициентом усиления разностного сигнала k_P и коэффициентом ослабления синфазного сигнала $k_{ОС.СФ.} = k_P / k_C$, где k_C – коэффициент усиления синфазного сигнала.

Для разностного входного сигнала каждое плечо ДУ представляет собой резистивный усилитель с общим эмиттером (см. рис. 3а) с коэффициентом усиления

$$k_{РП} = -S R_K, \quad (2)$$

где S – крутизна проходной ВАХ транзистора, R_K – сопротивление в цепи коллектора.

При идеальной симметрии плеч коэффициент усиления ДУ равен

$$k_P = 2 k_{РП} = -2 S R_K. \quad (3)$$

Для синфазного входного сигнала каждое плечо ДУ представляет резистивный усилитель, охваченный глубокой ООС с коэффициентом ОС $\beta = 2 R_Э / R_K$ (см. рис. 3б). Коэффициент передачи усилителя с ОС определяется выражением

$$k = \frac{k_0}{1 - k_0 \beta}. \quad (4)$$

Так как $k_0 = k_{РП}$, то коэффициент усиления синфазного сигнала одного плеча ДУ равен

$$k_{СП} = \frac{-S R_K}{1 + 2 S R_K R_Э / R_K} = \frac{-S R_K}{1 + 2 S R_Э}, \quad (5)$$

и тогда коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$k_{ОС.СФ.} = 1 + 2 S R_Э. \quad (6)$$

В качественных ДУ $k_{ОС.СФ.}$ равен 80-120 дБ.

Как видно из (6), синфазный сигнал будет подавляться тем сильнее, чем больше $R_Э$. Поэтому часто в схемах ДУ на дискретных элементах, а в схемах ДУ в интегральном исполнении практически всегда, вместо $R_Э$ применяют стабильный источник тока (см. рис. 8).

Главным преимуществом ДУ является малый дрейф нуля. Если у одиночного биполярного транзистора температурный дрейф составляет 2,5 мВ/К, то у современных ДУ в интегральном исполнении – 1-10 мкВ/К.

Характерный вид амплитудной характеристики ДУ $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ приведен на рис. 4. При амплитуде входного разностного сигнала не больше 0,1 В ДУ обеспечивает линейное усиление $U_{ВЫХ} = k_P U_{ВХ}$. При амплитуде входного разностного сигнала превышающем 0,1В происходит ограничение амплитуды выходного сигнала. ДУ на дискретных элементах даже при тщательном подборе транзисторов имеет значительно худшие температурные параметры, чем ДУ в интегральном исполнении. В интегральных схемах (ИС) резисторы и транзисторы изготавливаются в одних технологических условиях, поэтому имеют близкие параметры. Кроме того, они находятся настолько близко друг к другу, что при изменении окружающей температуры и разогреве ИС протекающими токами их температура почти одинакова.

В современных радиотехнических устройствах в качестве УПТ широко применяются операционные усилители (ОУ) в виде интегральных схем (ИС).

ОУ – это усилитель постоянного тока в интегральном исполнении с двумя входами и одним выходом, обладающий большим значением коэффициента усиления (k_0 порядка $10^4 - 10^5$), высоким входным сопротивлением ($R_{ВХ} = 10^5 - 10^6$ Ом), низким

выходным сопротивлением ($R_{ВЫХ} = 10 - 100 \text{ Ом}$) и предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами при работе в схемах с ОС.

Одно из схемных обозначений ОУ общего назначения дано на рис. 5. Напряжение на выходе ОУ зависит от напряжений, поступающих на два входа: *инвертирующий* $U_{ВХ}^-$, помечаемый на схемах кружком, и *неинвертирующий* $U_{ВХ}^+$, и определяется соотношением $U_{ВЫХ} = k_0(U_{ВХ}^+ - U_{ВХ}^-)$. В ОУ обычно применяются два источника питания, имеющие относительно земли одинаковые по величине, но разные по знаку постоянные напряжения. Такое питание обеспечивает работу ОУ с сигналами разной полярности, а при отсутствии входного сигнала входные и выходное напряжения относительно корпуса равны нулю. Это позволяет включать ОУ в цепи непосредственно, без применения разделительных конденсаторов. Так как ОУ содержит ДУ, то его передаточная (амплитудная) характеристика подобна амплитудной характеристике ДУ, приведенной на рис. 4.

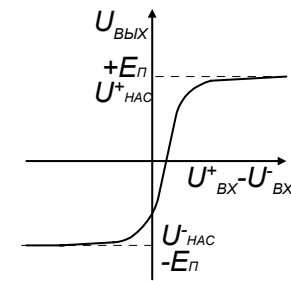


Рис. 4

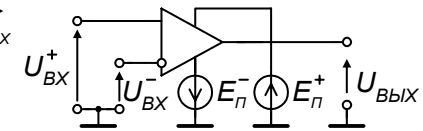


Рис. 5

Современные ОУ в интегральном исполнении содержат десятки транзисторов и их принципиальные схемы достаточно сложны.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка выполнена в виде настольного переносного прибора. Она содержит следующие функциональные узлы:

- 1) УПТ на транзисторах;
- 2) УПТ на интегральной микросхеме;
- 3) цепь деления входного и питающего напряжений;
- 4) цепь нагрузки УПТ на транзисторах;
- 5) цепь нагрузки УПТ на ИС;
- 6) блок питания.

На лицевой панели прибора расположены:

- 1) принципиальная схема УПТ на транзисторах;
- 2) принципиальная схема УПТ на ИС;
- 3) контрольные гнезда с номером, соответствующим контрольным точкам на принципиальной схеме.

Также на ней расположены с соответствующими надписями:

- тумблер - СЕТЬ - для включения стенда;
- индикатор контроля включения;

- тумблер S1 - для подключения УПТ на транзисторах к источнику сигнала или к корпусу;
- тумблер S2 - для подключения УПТ на ИС к источнику сигнала или к корпусу;
- тумблер S3 - для подключения второго каскада УПТ на транзисторах к выходу первого или к корпусу;
- тумблер S4 - для подключения цепи нагрузки к УПТ на транзисторах;
- тумблер S5 - для подключения цепи нагрузки к УПТ на ИС;
- тумблер S6 - для подключения измерительного прибора к цепям питания УПТ;
- ручка регулятора U_{BX} - для изменения уровня входного сигнала;
- ручки регуляторов R_{H1} , R_{H2} - для изменения сопротивления нагрузки УПТ;
- ручки регуляторов E_{I1} и E_{I2} - для изменения питающих напряжений;
- ручка регулятора R_{CB} - для изменения сопротивления цепи связи между вторым и третьим каскадами;
- ручка регулятора R_{g2} - для согласования каскада с внутренним сопротивлением источника сигнала;
- ручки регуляторов R_1 , R_2 - для изменения межэмиттерных связей;
- встроенный вольтметр для измерения питающего напряжения.

УПТ на транзисторах представляет собой трехкаскадную схему усилителя. Первые два каскада – дифференциальные усилители, а третий – инвертирующий усилитель с ООС. Входной сигнал подается на одну из баз первого каскада. В цепь второй базы включен переменный резистор для согласования входа каскада с сопротивлением источника сигнала. Эмиттерные резисторы в обоих каскадах способствуют повышению стабильности схемы, т.к. они создают ООС. Симметричный вход первого каскада обеспечивает компенсацию дрейфа нуля. С выхода первого каскада сигнал подается на базы второго.

Усиленный сигнал снимается с одного из коллекторов второго каскада, что ухудшает стабильность схемы за счет нескомпенсированного дрейфа нуля, и через цепочку связи подается на вход третьего каскада. Наличие третьего усилительного каскада увеличивает стабильность схемы за счет ООС, компенсирующей потенциал на коллекторе VT5. Наличие цепочки связи между вторым и третьим каскадами снижает коэффициент усиления схемы в целом. УПТ на ИС использован для сравнения с аналогичными параметрами УПТ на транзисторах. В УПТ на ИС использована микросхема типа КР544УД2А, включенная по схеме инвертирующего усилителя. Основные характеристики усилителя - коэффициент усиления, линейность АЧХ и т. д. – в схеме УПТ на ИС реализуются проще, с меньшими потерями энергии.

Подготовка к работе

1. Изучить теоретический материал. Нарисовать в рабочей тетради разновидности схем дифференциальных усилителей (ДУ), вид АЧХ УПТ.
2. Проанализировать процесс усиления дифференциального усилителя разностного и синфазного сигналов. Для разностного и синфазного входных сигналов нарисовать эквивалентные схемы одного плеча ДУ и получить коэффициент усиления. Нарисовать вид АЧХ УПТ.
3. Задав S в пределах 5-50 мА/В, рассчитать $k_{OC.cф.}$ при $R_3=(2-5)$ кОм.
4. По литературным источникам выяснить способ увеличения $k_{OC.cф.}$.

Лабораторное задание и методические указания

Прежде чем приступить к выполнению работы, проанализировать принципиальную схему установки, уяснить роль регуляторов и переключателей.

На внешнем вольтметре при измерении входного напряжения необходимо устанавливать предел измерений 1 В, а при измерении выходного напряжения необходимо устанавливать предел измерений 10 В.

Для исследования дифференциального усилителя и УПТ на дискретных элементах ручкой регулятора - $E_{П1}$ по встроенному вольтметру установить напряжение питания минус 12,8 В.

1. Исследовать дифференциальный усилитель.

Отключить второй каскад УПТ. Для этого тумблер S3 перевести в положение 2. Ручку регулятора R_{g2} установить в крайнее правое положение.

1.1 Выполните балансировку ДУ. Для этого с помощью внешнего вольтметра убедиться, что $U_{ВХ}=0$. (Если переключатель S1 находится в положение 1, ручкой регулятора $U_{ВХ}$ добиться $U_{ВХ}=0$). Подключить внешний вольтметр к контрольным гнездам 2,3. Ручкой регулятора R_1 произвести балансировку усилителя, добиваясь минимального абсолютного значения показаний внешнего вольтметра (менее 0,01 В).

1.2 Исследовать режим покоя усилителя. Для этого измерить напряжения на коллекторах и эмиттерах транзисторов V_{T1} , V_{T2} относительно корпуса. Учитывая, что $R_{K1} = R_{K2} = 8,2\text{кОм}$; по найденным U_{K1} , U_{K2} и $E_{П1}$ определить токи покоя транзисторов.

1.3 Исследовать дрейф нуля ДУ. При сбалансированном усилителе и $U_{ВХ}=0$ произвести измерение выходного напряжения на гнездах 2, 3 при изменении напряжения $E_{П1}$ в пределах от 12,8 В до 5 В.

1.4. Снять амплитудные характеристики ДУ и каждого его плеча. При измерении амплитудных характеристик для каждого заданного значения $U_{ВХ}$ измерять напряжения $U_{ВЫХ}$ ДУ на гнездах 2, 3 и U_{K1} , U_{K2} относительно корпуса.

1.5. По измеренным значениям $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ определить коэффициент усиления по напряжению.

2. Исследовать многокаскадный УПТ на дискретных транзисторах.

Подключить второй каскад УПТ. Для этого переключатель S3 перевести в положение 1. Переключатель S4 установить в положение $R_{П1}$. Ручки регуляторов $R_{СВ}$, R_{g2} , $R_{П1}$ установить в крайнее правое, R_2 – в среднее положение.

2.1 Произвести балансировку УПТ. Выставив $U_{ВХ}=0$ как в п. 1.1, ручками регуляторов R_1 (грубо) и R_2 (плавно) произвести балансировку усилителя, добиваясь минимального абсолютного значения показаний внешнего вольтметра (на контрольном гнезде 11 относительно корпуса), не более 0,01 В.

2.2. Исследовать режим покоя усилителя. Для этого произвести измерение напряжений коллекторов, баз и эмиттеров всех транзисторов относительно корпуса. Определить для всех транзисторов разности потенциалов и токи покоя, учитывая, что $R_{K1} = R_{K2} = 8,2\text{кОм}$; $R_{K3} = R_{K4} = 2,7\text{кОм}$; $R_{K5} = 4,7\text{кОм}$.

2.3. Исследовать дрейф нуля. Для сбалансированного усилителя и $U_{ВХ}=0$ измерить зависимость выходного напряжения на гнезде 11 относительно корпуса от изменения напряжения $-E_{П1}$ в пределах 12,8 В ... 5 В.

2.4. Снять амплитудную характеристику усилителя. По измеренной амплитудной характеристике определить коэффициент усиления и область линейного усиления.

3. Исследовать УПТ на ИС.

Ручкой регулятора $-E_{П2}$ по встроенному вольтметру установить напряжение питания - 12,8 В. Переключатель S2 установить в положение 1, переключатель S5 в положение

R_{H2} . Ручки регуляторов U_{BX} и R_{H2} установить в крайнее правое положение. С помощью внешнего вольтметра убедиться, что на гнезде 14 относительно корпуса $U_{BX}=0$, а на гнезде 15 выходное напряжение минимальное.

3.1 Исследовать дрейфа нуля. Внешним вольтметром измерить зависимость $U_{ВЫХ}$ от изменения напряжения $-E_{H2}$ в пределах 12,8 В ... 5 В.

3.2. Снять амплитудную характеристику усилителя. По измеренной амплитудной характеристике определить коэффициент усиления и область линейного усиления.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению работы.
2. Результаты экспериментальных исследований режима покоя и дрейфа нуля в виде таблиц и графики амплитудных характеристик.
3. Выводы по проведенной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое усиление сигналов? В чем состоят особенности работы УПТ ?
2. Что такое дрейф нуля в УПТ ?
3. Объясните работу каскада дифференциального усилителя (ДУ), укажите его основные характеристики.
4. В чем состоят преимущества УПТ на ДУ по сравнению с компенсационным УПТ?
5. ОУ, его характеристики и основные схемы включения. Какие преимущества УПТ на ОУ по сравнению с УПТ на ДУ, выполненного на дискретных элементах?

ЛИТЕРАТУРА: [1], [4], [14]–[16].

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – ознакомление с интегральными операционными усилителями и принципами построения электронных схем на их основе. Экспериментальное исследование свойств, параметров и характеристик основных разновидностей схем на основе операционных усилителей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Операционный усилитель (ОУ) – это выполненный в виде интегральной микросхемы высококачественный усилитель постоянного тока с двумя входами и одним выходом, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами при работе в схеме с обратными связями. ОУ обладает большим коэффициентом усиления ($k_0 = 10^4 \dots 10^5$), высоким входным сопротивлением ($R_{вх} = 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}$) и низким выходным сопротивлением ($R_{вых} = 10^1 \dots 10^2 \text{ Ом}$).

В конце 40-х годов термин "операционный усилитель" обозначал дорогой прецизионный ламповый усилитель постоянного тока, который применяли в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций. Успехи интегральной технологии привели к созданию дешевых полупроводниковых ОУ в виде интегральных микросхем. Реализация различных устройств на ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах, а по габаритам, массе и

стоимости ОУ сейчас мало отличаются от дискретного транзистора. Многосторонние возможности схем на ОУ вытесняют схемы на дискретных элементах и ОУ становятся базовыми узлами аналоговой схемотехники.

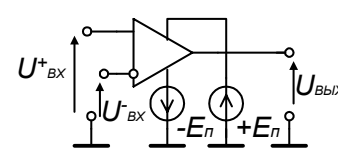


Рис. 1.

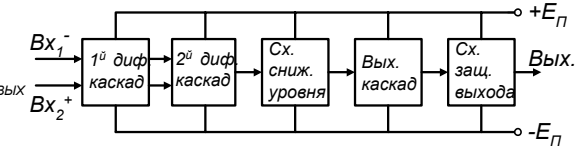


Рис. 2.

Схемное обозначение ОУ общего назначения дано на рис.1, структурная схема представлена на рис. 2. Входной каскад ОУ выполняется в виде *дифференциального усилителя* и поэтому имеет два входа: *инвертирующий*, помеченный на схемах кружком (см. рис. 1), и *неинвертирующий*. Дифференциальному усилителю присущи следующие свойства, определяющие его применение в ОУ: нечувствительность к однополярным (синфазным) входным сигналам и к колебаниям напряжения источников питания, а также высокая *температурная стабильность*. Принципиальная схема простейшего дифференциального усилителя представлена на рис. 3. На рис. 4а приведена типовая схема включения ОУ общего назначения типа К140УД1, а также его принципиальная схема (рис. 4б). Для питания ОУ обычно используют два *разнополярные* источника постоянного напряжения. Это обеспечивает возможность работы ОУ с сигналами различной полярности и позволяет исключить разделительные емкости, поскольку при отсутствии входных сигналов входы и выход находятся под нулевым потенциалом. Как правило, ОУ в интегральном исполнении работают при напряжениях питания от 5 до 20 вольт.

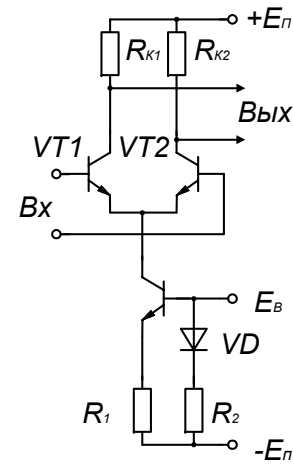


Рис. 3.

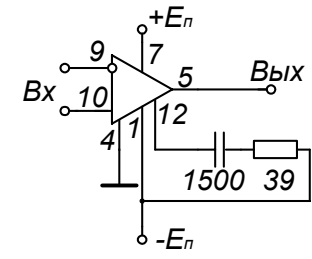


Рис. 4а.

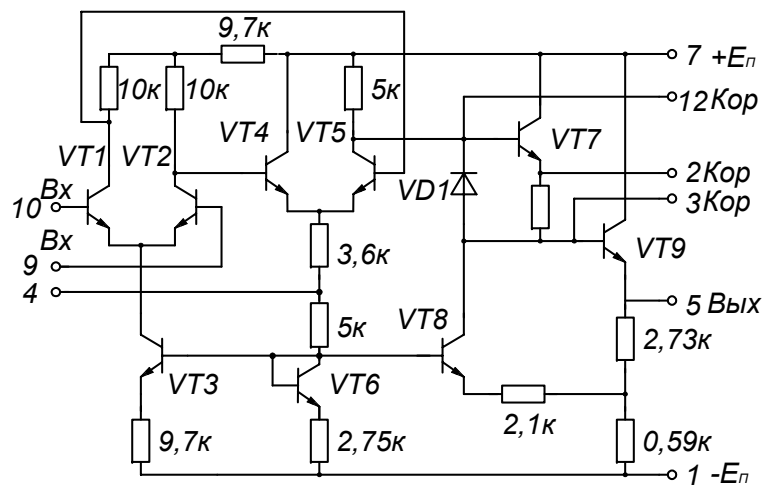


Рис. 46.

Передаточная характеристика ОУ приведена на рис. 5. На ней выделяется область линейного усиления и области насыщения. У реального ОУ передаточная характеристика смещена в ту или иную сторону от нуля на величину, составляющую обычно несколько милливольт, поэтому во многих интегральных ОУ предусмотрены клеммы подачи напряжения смещения нуля.

Для упрощения анализа колебаний в цепях, содержащих ОУ в качестве усилительного элемента, пользуются представлением об идеальном ОУ. У идеального ОУ полагается коэффициент передачи бесконечно большим, входное сопротивление также бесконечно большим, а выходное сопротивление – равным нулю. При этом реальный ОУ замещается эквивалентной схемой идеального ОУ, приведенной на рис. 6, и цепь анализируется методами теории цепей или пользуются принципом виртуального замыкания входных клемм ОУ: напряжение между инвертирующим и неинвертирующим входами равно нулю, а вследствие бесконечно большого входного сопротивления ток, который ответвляется в это сопротивление равен также нулю.

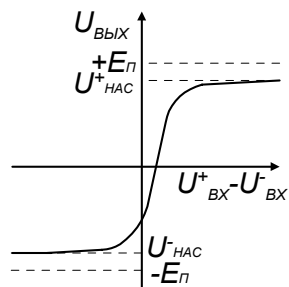


Рис. 5.

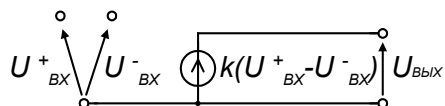


Рис. 6.

Электронные схемы на ОУ, как правило, используют *внешние обратные связи*. Известно, что коэффициент передачи k цепи с обратной связью (см. рис. 7) равен

$$k = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = k_0/(1 - k_0\beta), \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент передачи (усиления) прямого звена,
 β – коэффициент передачи звена обратной связи.

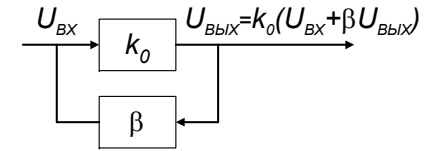


Рис. 7.

Отрицательная обратная связь (ООС) имеет место при условии $k_0\beta < 0$. При этом $k < k_0$. Если к тому же выполняется сильное неравенство $k_0\beta \gg 1$, тогда коэффициент передачи определяется приближенно $k \approx -1/\beta$. Поскольку ОУ имеет высокий коэффициент передачи, то свойства электронных цепей на ОУ определяются обратными связями и тем точнее, чем выше коэффициент передачи используемого ОУ.

Ниже приведены некоторые разновидности схем на ОУ, которые часто используются на практике.

1. Компаратор (рис. 8)

Поскольку линейная область передаточной характеристики ОУ является весьма малой (порядка 10...50 мкВ), то при подаче на входы ОУ напряжений, разность которых превышает эту величину, выходное напряжение принимает одно из значений насыщения: $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{НАС}}^-$ при $U_{\text{ВХ}}^+ < U_{\text{ВХ}}^-$ и $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{НАС}}^+$ при $U_{\text{ВХ}}^+ > U_{\text{ВХ}}^-$. Обычно на один из входов компаратора подают исследуемый сигнал, а на другой – опорное напряжение.

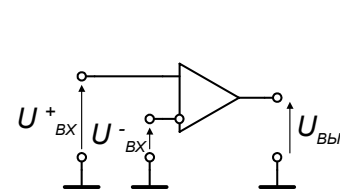


Рис. 8.

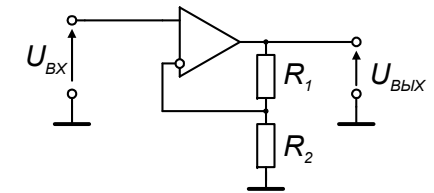


Рис. 9.

2. Неинвертирующий усилитель (рис. 9)

На основании формулы (1) и учитывая, что $U_{\text{ВЫХ}} = k_0(U_{\text{ВХ}}^+ - U_{\text{ВХ}}^-)$, а $U_{\text{ВХ}}^- = U_{\text{ВЫХ}} R_2 / (R_1 + R_2)$ получаем коэффициент передачи неинвертирующего усилителя

$$k = k_0 / (1 + k_0 R_2 / (R_1 + R_2)) \quad (2)$$

При $k_0 \gg 1$

$$k = 1 + R_1 / R_2 \quad (3)$$

3. Инвертирующий усилитель (рис. 10)

Поскольку $U_{ВХ}^+ = 0$, а $U_{ВХ}^- = U_{ВХ} R_2 / (R_1 + R_2) + U_{ВЫХ} R_1 / (R_1 + R_2)$ и учитывая, что $U_{ВЫХ} = k_0 (U_{ВХ}^+ - U_{ВХ}^-)$, на основании (1) коэффициент передачи напряжения схемы, приведенной на рис. 10, определяется формулой

$$k = -k_0 / (1 + (1 + k_0) R_1 / R_2). \quad (4)$$

При $k_0 \gg 1$

$$k = -R_2 / R_1. \quad (5)$$

4. Инвертирующий сумматор (рис. 11)

Напряжение на выходе инвертирующего сумматора на основании принципа наложения записывается в виде

$$U_{ВЫХ} = \sum_n k_n U_{ВХn}, \quad (6)$$

где k_n – коэффициенты передачи напряжения по соответствующему входу, равные согласно (5) $k_n = -R_2 / R_{1n}$.

Неинвертирующая и инвертирующая схемы рис. 9, 10 являются основными схемами устройств, выполняемых на ОУ с ООС. Причем вместо резистивностей R_1 , R_2 могут включаться комплексные сопротивления или трехполюсники с определенными передаточными характеристиками, что придает схемам на ОУ те или иные функциональные свойства. Поэтому наряду с рассмотренными схемами, на основе ОУ создают усилители-вычитатели, прецизионные аттенюаторы, логарифмические и антилогарифмические усилители, разнообразные активные фильтры, модуляторы и демодуляторы, аналоговые делители и умножители, функциональные преобразователи, генераторы гармонических колебаний, генераторы колебаний сложной формы, мультивибраторы, таймеры, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи и др.

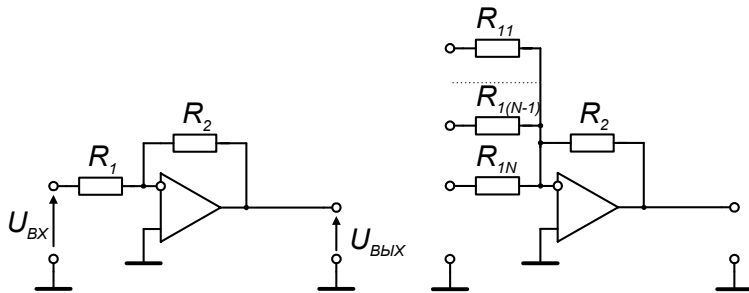


Рис. 10.

Рис. 11.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд выполнен в виде настольного переносного прибора и содержит набор схем устройств на основе ОУ К553УД2.

Набор схем устройств на основе ОУ включает: компаратор, инвертирующий усилитель, неинвертирующий усилитель, инвертирующий сумматор, интегратор, триггер Шмитта, ждущий мультивибратор, автогенераторный мультивибратор, генератор пилообразного напряжения, генератор треугольного напряжения.

Выбор требуемого устройства производится путем установки на лицевой панели стенда сменной панели с изображением исследуемой схемы.

Для обеспечения работы стенд содержит вспомогательные устройства:

РС-автогенератор гармонических колебаний на основе моста Вина с частотой колебаний $f = 1 \text{ кГц}$, формирователь временных интервалов, устройство выбора полярности, которые выполнены на ОУ, а также блок питания.

Питание исследуемых схем на основе ОУ осуществляется от компенсационного стабилизатора напряжения $\pm 15 \text{ В}$. Стабилизатор выполнен на транзисторах и ОУ К553УД1А.

На передней панели стенда с соответствующими надписями расположены:

- тумблер ВКЛ включения стенда;
- лампочка СЕТЬ контроля включения;
- вольтметры " $U_{\text{вх}}$ ", " $U_{\text{вых}}$ " для измерения входных и выходных постоянных напряжений с лампочками индикации полярности этих напряжений;
- переключатель "ИСТ1", "ИСТ2" для подключения вольтметра " $U_{\text{вх}}$ " к соответствующему источнику постоянного напряжения;
- потенциометры, регулирующие величину постоянного напряжения источников сигналов;
- переключатели источников сигналов;
- цифровой индикатор (секундомер);
- назначение гнезд и других переключателей указано в функциональных зонах исследуемых схем.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Изучить и нарисовать в рабочей тетради структурную схему ОУ общего назначения и принципиальные схемы простейших дифференциального и операционного усилителей.
2. По литературе изучить и нарисовать в рабочей тетради основные схемы на ОУ, записать их коэффициенты передачи.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Внимательно ознакомиться с назначением органов управления, расположенных на передней панели стенда. Ручки управления установить в среднее положение.

1. Исследование компаратора

Установить и закрепить на лицевой панели стенда накладную панель с изображением компаратора, нажать кнопку с индексом "К" переключателя выбора вида исследуемой схемы в функциональной зоне 1. Включить питание лабораторного стенда. Подать на *инвертирующий* вход опорное постоянное напряжение ($U_1 = [\text{текущее число месяца}] / 10$). Плавно изменяя напряжение на *неинвертирующем* входе от минимального до максимального значения, по показаниям вольтметров " $U_{\text{вх}}$ ",

" $U_{\text{вых}}$ " нарисовать график передаточной характеристики компаратора. На этом же графике изобразить передаточную характеристику для другого опорного напряжения на инвертирующем входе ($U_2 = -[\text{текущее число месяца}]/10$).

Подавая на *неинвертирующий* вход указанные выше опорные постоянные напряжения (U_1 и U_2), аналогичным образом изобразить на графике передаточные характеристики компаратора. Проанализировать передаточные характеристики компаратора. Выключить питание лабораторного стенда.

2. Исследование инвертирующего усилителя.

Установить и закрепить на лицевой панели стенда накладную панель с изображением инвертирующего усилителя. Нажать кнопку с индексом "ИУ" переключателя выбора вида исследуемой схемы в функциональной зоне 1. Включить питание лабораторного стенда.

1.1. Подавая на вход усилителя регулируемое постоянное напряжение, снимите передаточные характеристики усилителя $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$ для трех значений коэффициента усиления – $KU = 1, 10, 100$. При $KU = 1$ и 10 $U_{\text{вх}}$ изменять от -2 В до $+2$ В, при $KU = 100$ $U_{\text{вх}}$ изменять от $-0,5$ В до $+0,5$ В. По результатам измерений определить область линейного усиления. При заданном $R_1 = 10$ кОм и известных KU рассчитать значения R_3, R_4, R_5 .

1.2. Подать на вход усилителя гармонический сигнал. Для этого необходимо нажать кнопку подачи нерегулируемого синусоидального сигнала (~) соответствующего источника напряжения. С помощью осциллографа исследовать входной и выходной сигналы для трех значений KU , при этом определить значения KU в области линейного усиления и сравнить с заданными. Зарисовать характерные осциллограммы $U_{\text{вых}}$ для $KU = 100$. Выключить питание лабораторного стенда.

3. Исследование неинвертирующего усилителя.

Закрепить на лицевой панели стенда накладную панель с изображением неинвертирующего усилителя. Нажать кнопку с индексом "НУ" переключателя выбора вида исследуемой схемы в функциональной зоне 1. Включить питание лабораторного стенда.

Провести исследования аналогично п.1.1 и п.1.2. При заданном $R_1 = 10$ кОм и известных KU рассчитать значения R_2, R_3 . Выключить питание лабораторного стенда.

4. Исследование инвертирующего сумматора.

Установить и закрепить на лицевой панели стенда накладную панель с изображением сумматора. Включить питание лабораторного стенда.

4.1. Нажатием кнопки $R3$ переключателя $S1$ в функциональной зоне 3 установить требуемый KU ОУ. Используя методику, изложенную в п.1., снять передаточные характеристики сумматора, убедиться в суммировании сигналов. Установить другой KU ОУ нажатием кнопки $R4$ переключателя $S1$ и повторить измерения согласно п.1. Выключить питание лабораторного стенда.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты подготовки к выполнению работы.
2. Исследуемые схемы на базе ОУ.
3. Результаты экспериментального исследования схем.
4. Выводы по проведенной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое ОУ и каково его место в современной схемотехнике?
2. Что такое дифференциальный усилитель и почему он используется в ОУ?
3. Нарисуйте структурную схему ОУ общего назначения.
4. Нарисуйте схемы на основе ОУ: компаратора, инвертирующего и неинвертирующего усилителя, сумматора. Получите для них коэффициенты передачи.
5. Объясните причину различия передаточных характеристик усилителей на ОУ при различных коэффициентах усиления схем.
6. Как влияет КУ сумматора и уровень входных сигналов на правильность выполнения операции сложения сумматора на ОУ?

ЛИТЕРАТУРА: [1], [4], [7], [17]–[20].

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электронный осциллограф – один из наиболее универсальных измерительных приборов, предназначенный для наблюдения электрических сигналов и измерения их характеристик.

Любой электронный осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), канала X горизонтального отклонения луча и канала Y вертикального отклонения луча (рис. 1). Анализируемые электрические сигналы через вход Y подаются на канал вертикального отклонения Y и наблюдаются на люминесцентном экране электронно-лучевой трубки. Развертка во времени по оси X осуществляется пилообразным напряжением генератора развертки, усиленным усилителем X . Нужная скорость развертки устанавливается соответствующим переключателем, шкала которого оцифрована в единицах «время/см» (с/см, мс/см, мкс/см). Неподвижность изображения на экране обеспечивается синхронизатором, совмещающим начало развертки с определенным уровнем или фазой исследуемого процесса.

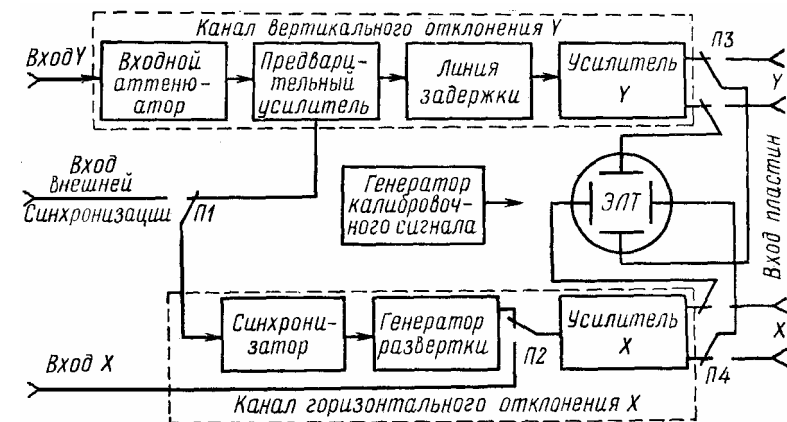


Рис. 1

Канал вертикального отклонения Y обеспечивает согласование уровня исследуемого сигнала с чувствительностью пластин вертикального отклонения луча ЭЛТ. При постоянном калиброванном коэффициенте усиления усилителя (предварительный усилитель и усилитель Y) это достигается выбором степени ослабления входного аттенуатора, шкала которого оцифрована в единицах «В/см».

Перед измерением параметров сигналов необходимо настроить осциллограф и, тем самым, убедиться в его исправности. Для этого следует замкнуть его входные клеммы, что соответствует подаче нулевого потенциала на вход, и при помощи регуляторов горизонтального и вертикального смещения луча получить на экране горизонтальную прямую, при этом ручки регулировки яркости луча, «уровень» и «стабильность» должны быть выведены в крайне правое положение. После того как горизонтальная прямая будет расположена в центре экрана, необходимо уменьшить яркость луча – это позволит при помощи ручки «фокусировка» добиться минимальной толщины линии развертки, что обеспечит максимальную точность измерения напряжения. Далее нужно разомкнуть входные клеммы осциллографа, при этом горизонтальная линия может немного исказиться. Если коэффициент усиления канала Y достаточно высок, то прикосновение к сигнальной (красной, «горячей») клемме, подключенной к центральному проводнику коаксиального кабеля, приведет к сильному искажению горизонтальной линии на экране осциллографа и изображение станет дрожащим. Это осциллограф реагирует на небольшие напряжения, наводимые на нашем теле посторонними электромагнитными полями. Прикосновение к клемме заземления (синей, «холодной»), подключенной к внешнему экранирующему проводнику коаксиального кабеля, приводит к противоположному эффекту – исчезновению искажений, на экране будет видна такая же четкая горизонтальная линия, какую наблюдали, когда клеммы были замкнуты.

Масштаб изображения по вертикали (В/см, мВ/см, мкВ/см) и горизонтали (с/см, мс/см, мкс/см) изменяется при помощи переключателей, принимающих фиксированные значения, но на большинстве осциллографов имеются ручки для некалиброванного изменения масштаба изображения по вертикали и горизонтали, как правило, они располагаются на одной оси с соответствующими переключателями калиброванных значений. Перед проведением измерений необходимо убедиться, что регуляторы некалиброванных значений не используются, для чего их надо повернуть в крайне левое положение до щелчка.

Как правило, при измерениях сигналов представляет интерес только переменная составляющая напряжения, и способность осциллографа игнорировать постоянную его составляющую (пьедестал) существенно ускоряет проведение измерений. Но, если необходимо измерять не только параметры переменного напряжения, но и его постоянную составляющую (или просто постоянное напряжение), нужно перевести переключатель на лицевой панели осциллографа из положения \sim в положение \simeq . В данном режиме при каждом изменении чувствительности входного усилителя необходимо подстраивать нуль – отсоединяться от измеряемой схемы, замыкать входные клеммы осциллографа и ручкой вертикального отклонения луча перемещать горизонтальную прямую точно в центр экрана.

Если параметры измеряемых сигналов заранее неизвестны, то вначале устанавливается минимальная чувствительность осциллографа ко входному сигналу (максимальное значение В/см), и только после этого подается сигнал на осциллограф.

Если размеры изображения слишком малы, вплоть до того, что оно просто не изменяется, то необходимо чувствительность входного усилителя увеличивать до тех пор, пока высота изображения займет более половины высоты экрана осциллографа.

Далее нужно добиться, чтобы изображение на экране было неподвижным. Необходимо выбрать режим синхронизации изображения, который называется «внутренняя синхронизация». Это значит, что моменты времени, в которые луч будет начинать свое движение по экрану будут задаваться самим входным сигналом, в отличие от режима «внешняя синхронизация», когда начало развертки луча задается каким-то отдельным синхронизирующим сигналом. Если заранее приблизительно известен период входного сигнала, лучше перед измерением задать такой масштаб по горизонтали, чтобы на длине экрана помешался один или несколько периодов сигнала. Далее, попеременно вращая влево ручки «уровень» и «синхронизация» на небольшие углы, добиваемся, чтобы изображение на экране стало неподвижным и не двоилось. Если в какой-то момент изображение исчезло, необходимо ручки «уровень» и «синхронизация» вращать вправо до появления сигнала, и, если изображение по прежнему нестабильно, нужно снова вращать эти ручки влево, но в другой последовательности и с меньшим шагом. Чем больше размер изображения по вертикали и чем точнее оно выставлено в центр экрана осциллографа, тем легче оно синхронизируется.

Генератор синусоидального напряжения – прибор, предназначенный для получения сигнала синусоидальной формы с заданной величиной напряжения и периодом.

Сигнал на выходе такого генератора характеризуется двумя параметрами – напряжением и частотой. Большинство генераторов позволяют варьировать эти параметры в очень широких пределах и устанавливать с большой точностью, поэтому для изменения каждого из них используется не один, а, по крайней мере, два регулятора. Один из них позволяет изменять напряжение или частоту плавно, задавая любое значение в пределах декады ($\max/\min \sim 10$). Второй задает напряжение или частоту ступенчато – переключение на следующее положение изменяет их в 10 раз, поэтому каждому положению соответствует множитель, на который нужно умножать показания первого регулятора.

Иногда ступенчатые регуляторы градуируют несколько другим образом, когда задают не множитель, а диапазон изменения величины, либо только ее верхний предел. Тогда показания снимают не путем умножения на множитель, а пересчетом показаний первого регулятора, с учетом, что его максимальное отклонение соответствует значению, на которое указывает второй регулятор.

Многие генераторы не имеют встроенного вольтметра, и регулятор плавного изменения выходного напряжения может не иметь градуировки. В этом случае напряжение на выходе генератора нужно контролировать внешним вольтметром или осциллографом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чеботарев В.И. и др. Усилители. Схемотехника каскадов. Учеб.-мет. пособие. – Харьков: ХНУ, 2001. – 26 с.
2. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства. -М.: Сов.радио, 1983.- 264 с.
3. Комлык В.В. Радиотехника и радиоизмерения. -Киев.: Виц. шк., 1984. – 333 с.

4. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники.-М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
5. Проектирование усилительных устройств / Под ред. Н.В. Терпугова-М.: Высш.шк., 1982. – 547 с.
6. Чеботарев В.И. Теоретические основы радиотехники. Учеб. пособие, ч.1- Харьков: ХГУ, 1989.-100 с.
7. Гусев В.Д., Гусев Ю.М. Электроника. - М.: Высш. школа, 1991.- 621 с.
8. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебн./Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. Под ред. О.П. Глудкина – М.: Горячая Линия – Телеком, 1999. – 768 с.
9. Хотунцев Ю.Л., Лобарев А.С. Основы радиоэлектроники: Учебн. – М.: Агат, 1998. –288 с.
10. Осипенко Г.С. Усилительные устройства – М.: Радио и связь, 1989. – 399 с.
11. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебн. – М.: Высш. шк., 1988 – 448 с.
12. Воллернер Н.Ф. Радиоприемные устройства. - К.: Виц. шк., 1993. –391 с.
13. Гершензон Е.М., Полянина Г.Д., Соина Р.В. Радиотехника - М.: Просвещение, 1986. – 318 с.
14. Ворсих Н.Н., Ляшко М.Н. Основы радиоэлектроники. Минск: Выш. шк., 1992 – 381 с.
15. Усилители постоянного тока / Гальперин М.В. и др.- М.: Энергия. 1978. -247 с.
16. Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В. Операционные усилители и их применение. М.: Радио и связь. 1989. -120 с.
17. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.
18. Банк М.У. Аналоговые интегральные схемы в радиоаппаратуре. - М.: Радио и связь, 1981. – 415 с.
19. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы: Справочное пособие / Под ред. С.В. Якубовского. - М.: Радио и связь, 1984.-432 с.
20. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. - М.: Мир, 1988.