Академия России

Кафедра Физики

**Реферат на тему:**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ**

**Орел 2009**

Содержание

Вступление

1. Постановка задачи

2. Анализ статического режима работы

3. Анализ динамического режима работы

Библиографический список

## Вступление

Усиление электрических сигналов является фундаментальным и исключительно важным свойством аппаратурных средств обработки сигналов, которое очень широко используется для совершенствования технических показателей самых различных радиотехнических устройств. Усилители находят самое широкое применение и как самостоятельные устройства, и как составные части более сложных устройств. Кроме аппаратуры связи их используют в бытовой электронике, звуковом кино, радиолокации, медицине, технике измерений, автоматике и т.д. На основе усилительных каскадов строится большинство аналоговых электронных устройств посредством добавления тех или иных обратных связей. Особое значение усилительные устройства имеют в радиоприемных трактах, поскольку на входы радиоприемников поступают сигналы очень малой мощности, а оконечные устройства требуют мощности, на несколько порядков большей.

## 1. Постановка задачи

Эффект увеличения мощности полезного сигнала при сравнительно точном сохранении его формы (и спектрального состава соответственно) называют усилением, а устройство, реализующее этот эффект, усилительным. Принцип электронного усиления заключается в том, что с помощью активного электронного прибора (усилительного элемента УЭ) энергия постоянного источника напряжения преобразуется в энергию полезного электрического колебания по закону изменения входного сигнала. Для управления процессом преобразования энергии на вход усилительного элемента подают малую мощность *Р*ВХ. Таким образом, при усилении источник сигнала малой мощности *Р*ВХ управляет работой усилительного элемента по преобразованию большой мощности источника питания *Р*0 в мощность выходного колебания *Р*ВЫХ, выделяемого в нагрузке усилительного устройства. Безусловно, *Р*ВЫХ < *Р*0, но в оконечных каскадах усилителей эти мощности близки по величине, и отношение *Р*ВЫХ/*Р*0 определяет коэффициент полезного действия усилителя *η*.

Поскольку в данной лекции речь пойдет о различных методах анализа усилительных каскадов, необходимо разобраться с основными понятиями. Анализ (от греч. analysis - разложение, расчленение) - метод научного исследования, состоящий в мысленном разложении сложного объекта на более простые составные части с целью оценки эффективности и качества функционирования этого объекта.

В данном случае речь идет об оценке качества работы типовых усилительных каскадов с транзистором в роли активного электронного прибора (усилительного элемента) и гармоническим сигналом на выходе. Так как основное предназначение усилителя - это получение на выходе сигнала большей мощности, чем на входе, то оценка качества усилительного каскада будет заключаться в решении следующих задач:

1. Во-первых, это традиционная задача анализа электрических цепей - определить реакцию цепи на заданное воздействие. Поскольку в качестве воздействия используется моногармонический сигнал

(6.52)



то в случае идеальной работы усилительного каскада на выходе также должен быть моногармонический сигнал

(6.53)



где *k* - коэффициент пропорциональности, определяющий степень усиления (чаще всего *k* > 1).

В реальных схемах усилительных каскадов выходной сигнал, как правило, отличается по форме от входного. Происходит это из-за нелинейности характеристик усилительного элемента (УЭ), а проявляется в зависимости усилительных свойств транзистора от амплитуды воздействия.

Таким образом, форма выходного сигнала будет отличаться от гармонической и спектр его обогатится соответственно новыми спектральными составляющими, которых не было во входном сигнале. Такие искажения, как нам уже известно, носят название нелинейных и оцениваются с помощью коэффициента гармоник *К*Г. Кроме нелинейных усилительный каскад вносит так называемые линейные (т.е. не связанные с искажением формы и обогащением спектра) или частотные искажения. Суть их заключается в том, что из-за наличия реактивностей в схеме усилительного каскада (в основном, это емкости разделительных и блокировочных конденсаторов, а также различные паразитные емкости и индуктивности) коэффициент пропорциональности *k* в выражении (6.53) является частотно-зависимым, т.е. имеет комплексный характер. В результате амплитуда и начальная фаза выходного сигнала не являются постоянными величинами, как во входном сигнале, а изменяются в зависимости от частоты воздействия.

2. Таким образом, вторая задача анализа - оценить величину искажений (линейных и нелинейных), которые усилительный каскад вносит в усиливаемый сигнал.

Для того чтобы решить эти две задачи, надо вычислить основные параметры и характеристики усилительного каскада, позволяющие оценить в количественной форме степень усиления и искажений гармонического входного сигнала. Кроме того, необходимо вычислить те параметры и характеристики усилительного каскада, которые определяют влияние данного усилителя на предшествующие и последующие каскады, а также дают возможность оценить степень зависимости данного усилительного устройства от аналогичных влияний (это в основном входное и выходное сопротивления усилителя).

3. Таким образом, третья задача анализа - определить основные характеристики (передаточную, импульсную, переходную, амплитудную) и параметры (входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления, коэффициенты линейных и нелинейных искажений) усилительного каскада.

Рассмотренные задачи анализа относятся к так называемому динамическому режиму работы усилительного каскада (ДРРУ), т.е. режиму, когда на вход подается гармонический сигнал, требующий усиления. Таких режимов может быть несколько, в зависимости от того, какую долю периода усиливаемого колебания ток протекает через усилительный элемент: режимы А, В, С, Д, АВ и др. Работа усилительного каскада может быть:

без отсечки выходного тока УЭ (режим А);

с отсечкой *θ* = 90° (режим В);

*θ* < 90° (режим С);

*θ* > 90° (режим АВ);

ключевой режим (Д) и т.д.

Чтобы обеспечить работу усилительного каскада в том или ином динамическом режиме, надо правильно выбрать положение исходной рабочей точки (РТ) на статических вольт-амперных характеристиках УЭ, необходимо обеспечить стабильность этой РТ, малую зависимость положения РТ от свойств конкретного УЭ и условий его работы.

Таким образом, прежде чем приступать к анализу динамического режима работы усилителя, необходимо оценить качество статического режима, т.е. режима работы при отсутствии входного сигнала, когда все токи в схеме усилительного каскада определяются действием постоянных источников напряжения. В процессе анализа статического режима необходимо определить положение исходной РТ, оценить стабильность этого положения при различных возмущающих факторах, вычислить значения постоянных токов и напряжений в схеме.

В основе анализа статического и динамического режимов работы транзисторного усилительного каскада лежат методы последовательного упрощения схемы усилителя схемами замещения и использование теории активных линейных четырехполюсников. Транзистор как усилительный элемент может рассматриваться как зависимый источник сигнального напряжения или тока (управляемый генератор сигнального напряжения или тока) или как нелинейное сопротивление постоянному току, мгновенное значение которого изменяется по закону входного гармонического колебания.

Наиболее распространенной схемой усилительного каскада, увеличивающего напряжение входного сигнала, является усилитель, выполненный по схеме с общим эмиттером, типовая схема которого показана на рисунке 6.10.



Рис.6.10. Усилитель с общим эмиттером

*Характеристика схемы:* транзисторный резистивный усилитель напряжения с общим эмиттером, автоматическим напряжением смещения, последовательным коллекторным питанием и резистивно-ёмкостной связью с последующим каскадом.

*Назначение элементов:*

транзистор *VT* *n-p-n* типа - усилительный элемент. Преобразует энергию источника постоянного напряжения *Е*К в энергию колебаний в нагрузке по закону изменения входного гармонического колебания;

резистор *R*К - сопротивление нагрузки усилительного элемента. На нем выделяется усиленное напряжение сигнала;

*С*Р - разделительный конденсатор (десятые доли мкФ). Обеспечивает разделение цепей данного и последующего каскадов по постоянному току;

*R*Ф, *С*Ф - фильтр низкой частоты (сотни ом, десятки микрофарад). Устраняет протекание переменной составляющей через источник постоянного напряжения *Е*К, исключая бесполезные потери на его внутреннем сопротивлении, а также минимизирует паразитную связь между различными каскадами через общий источник *Е*К на частоте усиливаемого сигнала;

*R*Б1, *R*Б2 - базовый делитель (от единиц до десятков килоом), обеспечивает фиксированное напряжение смещения базы;

*R*Э, *С*Э - цепь автоматического базового смещения (сотни ом, десятки микрофарад). Совместно с базовым делителем резистор *R*Э реализует схему эмиттерно-базовой стабилизации тока коллектора;

*Е*К - источник питания. Обеспечивает необходимые постоянные напряжения на переходах транзистора для обеспечения активного режима его работы;

*R*H, *C*H - эквивалентная нагрузка.

## 2. Анализ статического режима работы

Статический режим работы характеризуется отсутствием на входе усилителя гармонического сигнала (). Через транзистор и другие элементы схемы протекают постоянные токи, обусловленные действием *Е*К. Если учесть то обстоятельство, что сопротивление конденсатора для постоянного тока бесконечно велико, то все емкости в схеме на рисунке 6.10 можно заменить разрывом цепи. Тогда эквивалентная схема усилительного каскада для статического режима примет вид, как на рисунке 6.11.



Рис.6.11. Эквивалентная схема усилителя в статическом режиме

Выбранный режим работы обеспечивают включенные в схему резисторы, для правильного выбора которых необходимо знать цепи протекания постоянного тока в схеме.

*Цепь тока базы:* + *Е*К → *R*Ф → *R*Б1 → база-эмиттер → - *Е*К → + *Е*К.

*Цепь делителя:* + *Е*К → *R*Ф → *R*Б1 → *R*Б2 → - *Е*К → + *Е*К.

*Цепь тока коллектора:* + *Е*К → *R*Ф → *R*К → коллектор-база-эмиттер → *R*Э → → - *Е*К → + *Е*К.

В этой схеме базовый вывод транзистора питается от низкоомной цепи *R*Б1, *R*Б2 (базовый делитель), которая задает постоянное напряжение на базе В. Для стабилизации режима работы ток делителя *I*Д необходимо выбирать в 3 - 10 раз больше тока базы:



(6.54)



Поскольку величина *R*Ф выбирается таким образом, чтобы *U*Rф ≤ 0,1*Е*К, неравенство (6.54) можно переписать в виде

(6.55)



Для стабилизации режима работы необходимо также выбирать сопротивление в коллекторной цепи транзистора по условию

. (6.56)



Для кремниевых транзисторов малой и средней мощности, если постоянный ток коллектора колеблется в пределах = (0,5 - 50) мА, напряжение *U*БЭ ≈ 0,6 В.



При этом постоянный ток эмиттера необходимо выбирать больше амплитуды переменного тока в нагрузке *Im*Н:

(6.57)



Выполнив эти условия, нестабильность напряжения *U*БЭ или тока *I*Б будет практически не оказывать влияния на основные характеристики усилительного каскада, а коэффициент усиления постоянного напряжения *KU*П не превысит

. (6.58)



При фиксированных значениях *Е*К потенциал базы практически не зависит от тока базы *I*Б, т.е. от свойств конкретного транзистора.

Поэтому схема такого усилительного каскада носит название схемы с фиксированным базовым смещением.

Теперь рассмотрим как работает цепь эмиттерно-базовой стабилизации тока коллектора, которую еще называют температурной стабилизацией режима. Эта цепь состоит из *R*Б1, *R*Б2, *R*Э.

Допустим, что температура увеличилась. Это приведет к увеличению тока коллектора, тогда

*I*К *I*Э (*UR*э = *R*Э*I*Э) (*U*БЭ = *UR*б2 - *UR*э) *I*Б *I*К *I*К *const*.

Так как сопротивления базового делителя *R*Б1, *R*Б2 от температуры не зависят, то ток делителя *I*Д = *const*, следовательно, *UR*б2 = *const*.

Для количественной оценки стабилизации применяют коэффициент нестабильности, который приближенно можно вычислить по формуле:

, (6.59)



где .



Обычно *К*Н = (1,5 - 6). Для данной схемы он может составить *К*Н = (3 - 6).

Вышеприведенные формулы и рассуждения соответствуют линейному (активному) режиму работы транзистора, поэтому при их практическом применении следует убедиться в том, что транзистор не находится в состоянии насыщения.

## 3. Анализ динамического режима работы

При рассмотрении динамического режима полагаем, что статический режим обеспечен, на вход усилительного каскада (Рис.6.10) подано гармоническое напряжение с частотой *ω*:



Считается, что режим работы транзистора - малосигнальный (фактически линейный), т.е. сигнальные значения выходных токов Δ*I*ВЫХ и напряжений Δ*U*ВЫХ малы по сравнению с их значениями *I*ВЫХ и *U*ВЫХ в исходной РТ.

При малосигнальном режиме работы транзистора взаимосвязи и взаимозависимости между его токами и напряжениями определяются постоянными коэффициентами, не зависящими от уровня сигналов (малосигнальными параметрами). Основное применение находит система *h*-параметров:

(6.60)



где *I*ВХ, *I*ВЫХ, *U*ВХ, *U*ВЫХ - комплексные амплитуды сигнальных токов и напряжений.

*h*11 имеет смысл входного сопротивления база-эмиттер (при коротком замыкании входной цепи), для современных транзисторов составляет около 1 кОм; *h*12 - коэффициент обратной связи по напряжению (при разомкнутой входной цепи), характеризует внутреннюю связь между выходной и входной цепями транзистора, является безразмерной величиной, очень мал по величине (порядка 10-3); *h*21 - коэффициент передачи тока базы (при коротком замыкании входной цепи, характеризует усилительную способность усилительного элемента, совпадает с коэффициентом транзистора, который входит в паспортные данные транзистора и обозначается *h*21Э), также величина безразмерная; *h*22 - выходная проводимость транзистора (при разомкнутой входной цепи), зависит от угла наклона выходной характеристики транзистора. Величина, обратная *h*22, называется выходным сопротивлением транзистора: *r*ВЫХ = 1/*h*22, типовое значение которого составляет около 10 кОм.

Существенным отличием усилительных приборов от пассивных элементов и цепей является их свойство однонаправленности передачи сигналов, которое может быть охарактеризовано неравенством |*h*21| >> |*h*12|.

Входное гармоническое напряжение (Рис.6.10) через *C*Э прикладывается к участку база-эмиттер транзистора и вызывает изменения тока базы, который в свою очередь вызывает изменения коллекторного тока. Таким образом в составе коллекторного тока появляется переменная составляющая с частотой входного гармонического воздействия и амплитудой . Источником этой составляющей является транзистор. Учитывая, что сопротивление емкостей *С*Э, *С*Ф, *С*Р для переменного напряжения с частотой ничтожно малы, можно представить схему замещения усилительного каскада по переменному току (Рис.6.12).



Рис.6.12. Схема замещения усилителя по переменному току

В этой схеме с целью упрощения не показаны сопротивления базового делителя, фильтра и в цепи эмиттера.

*Цепь прохождения переменной составляющей тока коллектора*:

.



Так как сопротивлениями емкостей *С*Э, *С*Ф, *С*Р можно пренебречь, то резисторы *R*К и *R*Н оказываются включенными по переменной составляющей параллельно и на них создается падение напряжения

. (6.61)



В свою очередь

.



Теперь формулу 6.61 можно переписать в следующем виде:

.



Выходное напряжение оказывается в

(6.62)



раз больше входного. В этом и состоит эффект усиления. Также необходимо подчеркнуть, что выходное напряжение оказывается сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на 180, на что указывает знак "минус" в формулах.

Анализ свойств различных схемных построений осуществляют на основе соотношений и положений теории четырехполюсника и эквивалентных схем каскадов (Рис.6.13).



Рис.6.13. Эквивалентная схема каскада

При этом УЭ рассматривают в виде четырехполюсника, к выходным клеммам которого 2-2` подключена нагрузка *R*Н, а к входным 1-1` - источник сигнала с ЭДС *Е*С и сопротивлением *Z*С, а для анализа используют известные методы расчета электрических цепей.

Принципы приведенных расчётов могут быть распространены и на случаи, когда условия малосигнальности не выполняются (если отклонения Δ*I*ВЫХ, Δ*U*ВЫХ превышают 20 - 30% от *I*ВЫХ, *U*ВЫХ в исходной РТ). Необходимо использовать усредненные значения *h-*параметров, под которыми понимают полусуммы их значений, отвечающих крайним отклонениям выходных токов и напряжений, наблюдаемых в процессе усиления сигналов.

Вышеприведенные рассуждения справедливы для случая, когда сопротивлениями разделительных и блокировочных конденсаторов можно пренебречь в силу их малых значений (в эквивалентных схемах замещения эти конденсаторы заменяются короткими замыканиями). На низких частотах выполнить условия пренебрежимо малого значения емкостного сопротивления не удается, в результате чего в усилительном каскаде возникают низкочастотные искажения. Для снижения этих искажений требуется увеличение емкостей конденсаторов *С*Р, *С*Б, что не всегда выполнимо из конструктивных или экономических соображений. Поэтому номиналы *С*Р, *С*Б выбирают исходя из предельно допустимых частотных искажений.

Эквивалентная схема сигнальной цепи, содержащей разделительный конденсатор, приведена на рисунке 6.14, при этом рисунок 6.14, а соответствует случаю, когда сигнальные изменения представлены с помощью генератора тока, а рисунок 6.14, б - с помощью генератора ЭДС.



а б

Рис.6.14. Эквивалентные схемы сигнальной цепи с конденсатором *С*Р

Оба представления взаимно эквивалентны. Рассмотрим передаточные свойства этой цепи на участке 1 - 2.

На средних частотах, когда сопротивление *С*Р пренебрежимо мало, коэффициент передачи частотно независим и равен

(6.63)



По мере понижения частоты сопротивление конденсатора растет, и общее выходное напряжение цепи падает. Коэффициент передачи разделительной цепи для низких частот будет равен

(6.64)



где - постоянная времени разделительной цепи.



Анализ выражения (6.64) показывает, что влияние разделительной цепи на низких частотах сказывается уменьшением модуля коэффициента передачи (график на Рис.6.15) и появлением дополнительного фазового сдвига (Рис.6.16).



Рис.6.15. График |*K*| Рис.6.16. График *θ (ω)*

Если задаваться некоторой нижней границей частотного диапазона *ω*Н, можно определить коэффициент частотных искажений МН для заданной схемы:

(6.65)



или определить минимальную величину емкости разделительного конденсатора, при которой частотные искажения не превысят предельно допустимых:

(6.66)



Влияние блокировочных конденсаторов на низких частотах сводится к тому, что сопротивление блокируемой цепи становится ненулевым, имеет комплексный характер, а это приводит к дополнительному спаду АЧХ и фазовым сдвигам. Для схемы с ОЭ выбор величины *С*Б осуществляется исходя из заданной величины частотных искажений МН:

(6.67)



Кроме того необходимо отметить, что если приводимая в справочниках информация не является для практических расчетов достаточной, то используют рассмотрение свойств усилительных приборов, основанное на использовании их физических эквивалентных схем. Одной их наиболее используемых моделей в данном случае является модель Эберса-Молла, определяющая взаимосвязь выходного тока транзистора и разности потенциалов на его эмиттерном переходе. Применение данной модели предлагается изучить самостоятельно по пособию: Богданов Н.Г., Лисичкин В.Г. Основы радиотехники и электроники. Часть 6.: - Орел: ВИПС, 1999. - С.74-80.

## Библиографический список

1. Стеблянко В.Д. Усилители электрических сигналов. Курс лекций. Орел- С.18-40.
2. Павлов В.Н., Ногин Б.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. - М.: Радио и связь, 1997. - С.23-70