

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»



М. Е. Капралов

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания
к выполнению курсовой работы
для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

Об издании – [1](#), [2](#)

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.382.049.77(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией радиотехнического факультета (протокол № 5 от 10.04.2019)

Кафедра энергетики и электроники радиотехнического факультета

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Директор ООО «РадиоЛэб»

М. Ю. АЛИЕВ;

Начальник участка КИПиА СООО «ЛЛК-НАФТАН»

И. О. СМОРЫГО-АНДРЕЕВ

Содержат общие указания к выполнению курсовой работы, методики расчета каскадов усилителя звуковой частоты и импульсных усилителей на биполярных транзисторах, а также приложение и список литературы для ознакомления.

Предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

© Капралов М. Е., 2020

© Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Схемотехника аналоговых устройств» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Михаил Егорович КАПРАЛОВ

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания
к выполнению курсовой работы
для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»

Редактор *И. Н. Чапкевич*

Подписано к использованию 19.05.2020.
Объем издания: 2,29 Мб. Заказ 304.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ.....	5
Цель курсовой работы	5
Содержание и тематика работы	5
Порядок выполнения курсовой работы	6
Оформление курсовой работы	7
Методические указания к проектированию	8
1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАСКАДОВ УСИЛИТЕЛЯ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	18
1.1. Расчет выходных каскадов	18
1.2. Расчет фазоинверсных каскадов.....	24
1.3. Расчет входных каскадов и каскадов предварительного усиления	27
1.4. Расчет схемы стабилизации режима	30
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	31
2.1. Расчет импульсного усилителя с емкостной нагрузкой, выполненного на биполярном транзисторе.....	31
2.2. Расчет предварительных каскадов импульсного усилителя.....	35
2.3. Расчет вспомогательных цепей импульсного усилителя.....	39
ЛИТЕРАТУРА	40
Приложение	41

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Цель курсовой работы

Основной целью курсовой работы по дисциплине «Схемотехника аналоговых устройств» является углубление и закрепление знаний студентов по курсу, приобретение опыта самостоятельной работы по проектированию электронных усилителей и других аналоговых устройств. Эта работа – завершающий этап изучения дисциплины, которая имеет как самостоятельное применение, так и является базовой для изучения других дисциплин.

Студент должен получить опыт не только по расчету отдельных каскадов усилителей, но и обоснованному выбору структурной схемы усилителя, элементов схем, удовлетворяющих заданным требованиям.

Выполнение курсового задания должно научить студента работать со справочной литературой и ГОСТами, использовать при расчете характеристики активных элементов, а также графики и таблицы, облегчающие инженерные расчеты.

Работа должна представлять собой законченное описание спроектированного устройства, содержать техническое задание, обоснование схемы и отдельных её каскадов, расчет элементов схемы, сравнение полученных результатов с техническим заданием.

Содержание и тематика работы

Каждый студент выполняет работу согласно индивидуальному заданию, которое получает от преподавателя-консультанта, или выполняет самостоятельно, из рекомендуемых вариантов приложения.

Задание содержит перечень исходных данных для проектирования. Некоторые данные по указанию консультанта могут быть выбраны студентом самостоятельно при обосновании такого выбора с учетом предъявленных требований. Курсовая работа может быть выполнена по следующим темам:

- Усилитель звуковой частоты (УЗЧ) с трансформаторным выходом.
- УЗЧ с бестрансформаторным выходным каскадом.
- УЗЧ для бытовой аппаратуры (конкретное задание типа РЭА).
- УЗЧ на интегральных микросхемах и операционных усилителях с выходным каскадом на дискретных элементах.
- Импульсный усилитель на дискретных полупроводниковых усилительных элементах.

Кроме перечисленных тем, студенту может быть предложено проектирование, изготовление и отладка действующего макета усилителя, используемого в учебных целях или НИР на кафедре и в университете.

Готовая работа (пояснительная записка и графическая часть) представляется на рецензию преподавателю-консультанту. Отрецензированная работа с исправленными возможными замечаниями представляется к защите. Проводится дифференцированный зачет с выставлением оценки. На защите студент должен кратко изложить суть проделанной работы и ответить на вопросы комиссии по теме курсовой работы.

Порядок выполнения курсовой работы

В курсовой работе должны быть представлены материалы по обоснованному выбору схемы, типов и режимов работы активных элементов, а также подробный электрический расчет проектируемого устройства.

Проектирование устройства начинается с обоснования его структурной схемы. Расчет принципиальной схемы усилителя ведется покаскадно (в направлении от выхода ко входу усилителя) вследствие того, что условия работы каждого предшествующего каскада определяются схемой, режимом работы усилительного элемента и характеристиками следующего каскада (например, входным сопротивлением, емкостью, током и т.д.). В соответствии с этим, общий порядок расчета усилителя может быть следующим:

- 1) выбор схемы выходного каскада;
- 2) выбор типов активных элементов выходного каскада и исходных режимов их работы;
- 3) расчет характеристик выходного каскада (входных сопротивлений, тока, напряжения, коэффициентов усиления); расчет элементов схемы (расчет характеристик выходного каскада ведется графоаналитическим методом);
- 4) расчет схемы обеспечения режима работы каскада и его стабилизации;
- 5) расчет вносимых выходным каскадом нелинейных (для УЗЧ) и частотных искажений (для импульсного усилителя – ИУ);
- 6) расчет схем коррекции каскадов (при необходимости – для импульсных и широкополосных усилителей);
- 7) выбор типа предвыходного и предварительных каскадов усиления и исходных режимов для них;
- 8) расчет элементов и характеристик предвыходного и предварительных каскадов усиления;
- 9) расчет схем стабилизации режимов всех каскадов усиления;

10) расчет нелинейных искажений (УЗЧ) и глубины отрицательной обратной связи (ООС);

11) расчет частотных искажений усилителя или элементов схем, вызывающих эти искажения;

12) расчет характеристик усилителя и сравнение их с указанным в техническом задании;

13) выполнение графической части работы.

Оформление курсовой работы

Курсовая работа представляет собой законченное описание спроектированного усилителя, содержащее техническое задание, обоснование схемы и отдельных ее каскадов, расчет элементов схемы (за исключением элементов интегральных схем), сравнение полученных результатов с техническим заданием, и состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка к курсовой работе должна содержать:

- утвержденное техническое задание;
- титульный лист;
- оглавление;
- структурную схему усилителя и ее обоснование;
- ориентировочную принципиальную схему;
- распределение ожидаемых частотных или временных искажений по отдельным каскадам и цепочкам;
- обоснование выбора типа активных элементов и таблицу параметров этих элементов;
- выбор режима работы каждого каскада;
- электрический расчет принципиальных схем каскадов;
- выбор и расчет цепей ООС (при необходимости);
- расчет результирующих характеристик усилителя;
- технические требования к источнику питания (уровень помех, необходимость стабилизации и т.д.);
- сравнение заданных и полученных при расчете характеристик усилителя и заключение о результатах проектирования;
- список использованной литературы.

Пояснительная записка должна быть разборчиво написана на одной стороне листа формата А4 (210 × 297 мм) чернилами или набрана на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, сброшюрована в тетрадь или переплетена. Текст пояснительной за-

писки (20 – 30 листов) должен состоять из озаглавленных разделов. Нумерация страниц приводится внизу страницы. Поля: верхнее/нижнее – 2 см; левое – 3 см; правое – 1,5 см.

В текст каждого раздела необходимо включить принципиальную схему рассчитываемого каскада (или узла) и соответствующие характеристики усилительного элемента с необходимыми построениями. Схемы и характеристики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге, пронумерованы и иметь пояснительные надписи, допускается сканирование вольт-амперных характеристик элементов схем.

Выбор каждого усилительного элемента или номинала элемента электрической схемы обязательно обосновывается.

Формулы, по которым ведется расчет, должны быть приведены в тексте полностью, с объяснениями буквенных сокращений, используемых впервые. Результаты вычислений должны быть приведены с точностью не менее трех значащих цифр (545000 или 5,45 или 0,545) и снабжены основными или производными единицами размерности (мА, Ом, кОм и т.п.).

В тексте записки указывается литература, из которой взят используемый метод расчета данного каскада или элемента.

Графическая часть проекта должна содержать структурную и принципиальную схемы разрабатываемого усилителя, а также эскиз общего вида. Структурная и принципиальная схемы, эскиз общего вида усилителя вычерчиваются карандашом или тушью на листе чертежной бумаги (обычно это формат А2, 420 × 594) в соответствии с ГОСТами ЕСКД; допускается выполнение схем и эскиза на плоттере.

Элементы принципиальной схемы нумеруются сверху вниз и слева направо в порядке возрастания номера элементов каждого типа.

Перечень элементов составляется согласно ГОСТу.

Выполненный курсовой проект предоставляется на рецензию руководителю-консультанту. После рецензирования проект подписывается рецензентом и предьявляется к защите.

Методические указания к проектированию

При выполнении проекта студент должен проявить самостоятельность мышления, творческий инженерный подход к решению задачи, отказаться от простого копирования приведенных в учебниках примеров расчета отдельных каскадов. Выбор технических решений всех узлов усилителя должен обуславливаться технической и экономической целесообразностью воплощения.

При расчете схем стабилизации рабочей точки следует учитывать изменения температуры окружающей среды, а также разброс параметров транзисторов. Наиболее полный расчет схем стабилизации рабочей точки приведен в [1; 2].

Основной литературой по проектированию транзисторных усилителей низкой частоты являются источники [2; 3].

Вопросы расчета усилителя низкой частоты (УНЧ) с выходным каскадом по бестрансформаторной схеме и вопросы выбора структурной схемы рассмотрены в работе [3]. Основная задача проектирования УНЧ – обеспечение требуемой мощности в нагрузке при заданных нелинейных и частотных искажениях и минимальном числе каскадов усиления.

Современные УНЧ должны обеспечивать усиление мощности от 10^4 до 10^6 раз. Такое усиление обычно можно получить от усилителя с тремя-четырьмя каскадами усиления. Энергия для питания всех цепей УНЧ поступает от одного источника питания со следующими номиналами выходного напряжения: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 60 В. Используется также напряжение 15 вольт и бортовое напряжение 27 вольт. Напряжение источника питания указывается в техническом задании.

Значительное место в проектировании УНЧ занимают выбор и расчет структурной схемы, который начинается с выбора и предварительного расчета выходного каскада, что необходимо для разработки требований к предыдущим каскадам.

Схему выходного каскада выбирают по заданной мощности, сопряженной нагрузке R_n и коэффициенту нелинейных искажений K_r , определяют способ подключения нагрузки (непосредственно или через трансформатор); схему каскада (однотактная, двухтактная); схему включения транзистора и режим работы (А, АВ или В).

При этом учитывают следующее:

1) схемы включения с общим эмиттером (ОЭ) обеспечивают максимальный коэффициент усиления по мощности, но дают значительные нелинейные искажения;

2) схемы включения с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК) обеспечивают малые значения нелинейных искажений, но коэффициент усиления по мощности мал;

3) в режиме А обеспечиваются меньшие нелинейные искажения, чем в режимах АВ и В, но КПД каскадов в режиме А существенно меньше, чем в режимах АВ и В.

Рекомендуется применять:

а) при выходной мощности $P_{вых}$ до 50 мВт – однотактную схему на маломощном транзисторе в режиме А;

б) при $P_{\text{вых}}$ до 500 мВт – одноктактную схему в режиме А транзисторов средней мощности;

в) при $P_{\text{вых}}$ до 2 Вт – двухтактную схему в режиме АВ или В на транзисторах средней мощности;

г) при $P_{\text{вых}} > 2$ Вт – двухтактную схему в режиме АВ или В на транзисторах большой мощности.

Выбор выходного каскада производится с учетом следующих условий:

– Трансформаторный каскад обеспечивает оптимальное согласование выходного сопротивления каскада $R_{\text{вых}}$ с сопротивлением нагрузки R_n , однако он громоздок и дорог. В УНЧ с таким каскадом трудно реализовать глубокую ООС.

– Бестрансформаторный каскад обеспечивает широкий диапазон усиливаемых частот, может быть выполнен в миниатюрном исполнении, позволяет реализовать в УНЧ глубокую ООС, но требует принятия специальных мер по защите выходных транзисторов от короткого замыкания в нагрузке и защите нагрузки от неисправностей в усилителе, а также использования источника питания бóльшего напряжения, чем трансформаторный.

– Предвыходной каскад в УНЧ с двухтактным каскадом должен быть фазоинверсным. В трансформаторных УНЧ фазоинверсный каскад может быть резистивным (если входная мощность оконечного каскада не превышает 1-2 мВт) и трансформаторным. В последнем случае фазоинверсный каскад рассчитывают как усилитель мощности, нагруженный на входное сопротивление выходного каскада.

Роль фазоинверсного каскада в усилителе могут выполнять комплементарные пары транзисторов. Эти пары могут быть использованы в качестве выходных каскадов при соответствующих параметрах. Предварительные каскады обычно выполняют по схеме с ОЭ на транзисторах малой мощности. При необходимости согласования высокого внутреннего сопротивления источника сигнала R_u с входным сопротивлением усилителя $R_{\text{вх}}$, первый каскад выполняют по схеме с ОЭ с местной ООС по току для увеличения $R_{\text{вх}}$.

В УНЧ применяют низкочастотные или среднечастотные германиевые и кремниевые транзисторы. При выборе транзисторов учитывают частотные свойства f_{h21} транзистора, мощность, рассеиваемую на коллекторе $P_{k \text{ max}}$, допустимое значение тока $I_{k \text{ max}}$.

Не рекомендуется применять мощные транзисторы в маломощных схемах, где $I_{k \text{ раб}}$ соизмерим с обратным током I_k , что приводит к неустойчивости каскада, а также применять высокочастотные транзисторы в низкочастотных схемах, что может вызвать самовозбуждение усилителя.

Общее число каскадов усилителя оценивают, сравнивая требуемый коэффициент усиления по мощности K_p с расчетным (общим) для всех необходимых каскадов $K_{p, \text{расч}}$:

$$K_p = P_H / P_{\text{вх}},$$

$$K_{p \text{ расч}} = K_{p \text{ вых}} \cdot K_{p \text{ пред вых}} \cdot K_{p \text{ вх}}.$$

Если $K_{p \text{ расч}} < K_p$, то вводят один или два дополнительных каскада предварительного усиления.

Для оценки трансформаторного каскада используют оценочные формулы. Для выходного каскада:

$$K_{p \cdot \text{вых}} \approx 0,9 U_{\text{ок}} h_{21 \text{ э min}} \eta_{\text{тр}} / U_{\text{вх}} - \text{схема ОЭ};$$

$$K_{p \cdot \text{вых}} \approx 0,9 U_{\text{ок}} \eta_{\text{тр}} / U_{\text{вх}} - \text{схема ОБ};$$

$$K_{p \cdot \text{вых}} \approx 0,9 h_{21 \text{ э min}} \eta_{\text{тр}} - \text{схема ОК}.$$

Для бестрансформаторного усилителя:

$$K_{p \text{ вых}} \approx 0,7 h_{21 \text{ э min}}.$$

Для составного транзистора выходного каскада, состоящего из двух транзисторов:

$$h_{21 \text{ э min}} \approx h'_{21 \text{ э}} \cdot h''_{21 \text{ э}},$$

где: $h'_{21 \text{ э}}$ и $h''_{21 \text{ э}}$ – коэффициенты усиления по току каждого из двух транзисторов.

Для фазоинверсных каскадов:

$$K_p \approx h_{21 \text{ э min}} - \text{для резистивного каскада};$$

$$K_p \approx 5 h_{21 \text{ э min}} \cdot U_{\text{ок}} - \text{для трансформаторного каскада по схеме с ОЭ},$$

где $U_{\text{ок}}$ – исходное напряжение на коллекторе соответствующего транзистора.

Для простых резистивных каскадов:

$$K_p = 0,3 h_{21 \text{ э min}}^2 - \text{схема с ОЭ};$$

$$K_p = 0,7 h_{21 \text{ э min}} - \text{схема с ОК},$$

где: $U_{\text{ок}}$ – исходное напряжение на коллекторе соответствующего транзистора;

$\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансформатора (0,7 – 0,9);

$h_{21 \text{ э}}$ – коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ;

$U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} R_{\text{вх}}$ – амплитуда требуемого входного напряжения окончательного каскада (оценивается по входной характеристике).

Частотные искажения между каскадами и элементами каскадов определяют после выбора функциональной схемы и составления на основе ориентировочной принципиальной схемы.

При этом учитываются следующие соотношения:

$M_{н. тр} = (1 - 1,5)$ дБ (для трансформатора);

$M_{н. ср} = (0,2 - 0,6)$ дБ (для разделительных конденсаторов);

$M_{н. сз} = (0,3 - 1,0)$ дБ (для конденсатора в цепи эмиттера).

Коэффициент нелинейных искажений чаще всего относят к выходному каскаду.

Принципиальную схему усилителя рассчитывают с учетом распределения частотных искажений, начиная с выходного каскада. Рабочую точку (РТ) того или иного транзистора в любых каскадах выбирают на нагрузочной характеристике по **постоянному** току, принимая во внимание следующие соображения:

- режим работы каскада (А, В, АВ, С, В, D);
- коэффициент полезного действия каскада;
- величину нелинейных искажений;
- допустимые параметры для данного усилительного прибора (напряжение на коллекторе, ток коллектора, допустимую мощность рассеяния и др.).

Наклон нагрузочной характеристики по постоянному току определяется сопротивлением в коллекторно-эмиттерной цепи по постоянному току. В трансформаторных каскадах, обычно, – это сопротивление первичной обмотки трансформатора постоянному току и сопротивление в цепи эмиттера постоянному току, как правило невысокое, и в итоге положение нагрузочной характеристики по постоянному току для данного каскада на вольтамперной характеристике будет приближаться к вертикальному, имея небольшой наклон. В бестрансформаторных каскадах, даже при наличии в цепи эмиттера выравнивающих сопротивлений малого номинала, она будет почти вертикальной.

Через выбранную рабочую точку проводится нагрузочная характеристика по переменному току. Важно, чтобы входные и выходные сигналы не выходили за пределы нагрузочной характеристики по переменному току, что следует проверять при окончательном расчете. В противном случае необходимо изменить номиналы элементов и, возможно, режим работы усилительного прибора вплоть до его замены. В трансформаторных каскадах нагрузочную характеристику по переменному току на вольтамперной характеристике выходного транзистора проводят наиболее оптимальным образом, независимо от нагрузки, учитывая все особенности данного усилительного прибора, в том числе предельную рассеиваемую мощность на коллекторе, а также имеющийся опыт проектировщика. Нагрузка по переменному току в этом случае, как правило, не совпадает с заданной нагрузкой, и ее согласовывают с помощью согласующего трансформатора. Поэтому считается, что трансформаторный каскад имеет идеальное согласование с нагрузкой. В бестрансформаторных каскадах наклон

нагрузочной характеристики по переменному току обусловлен величиной нагрузки и потому жестко ограничен.

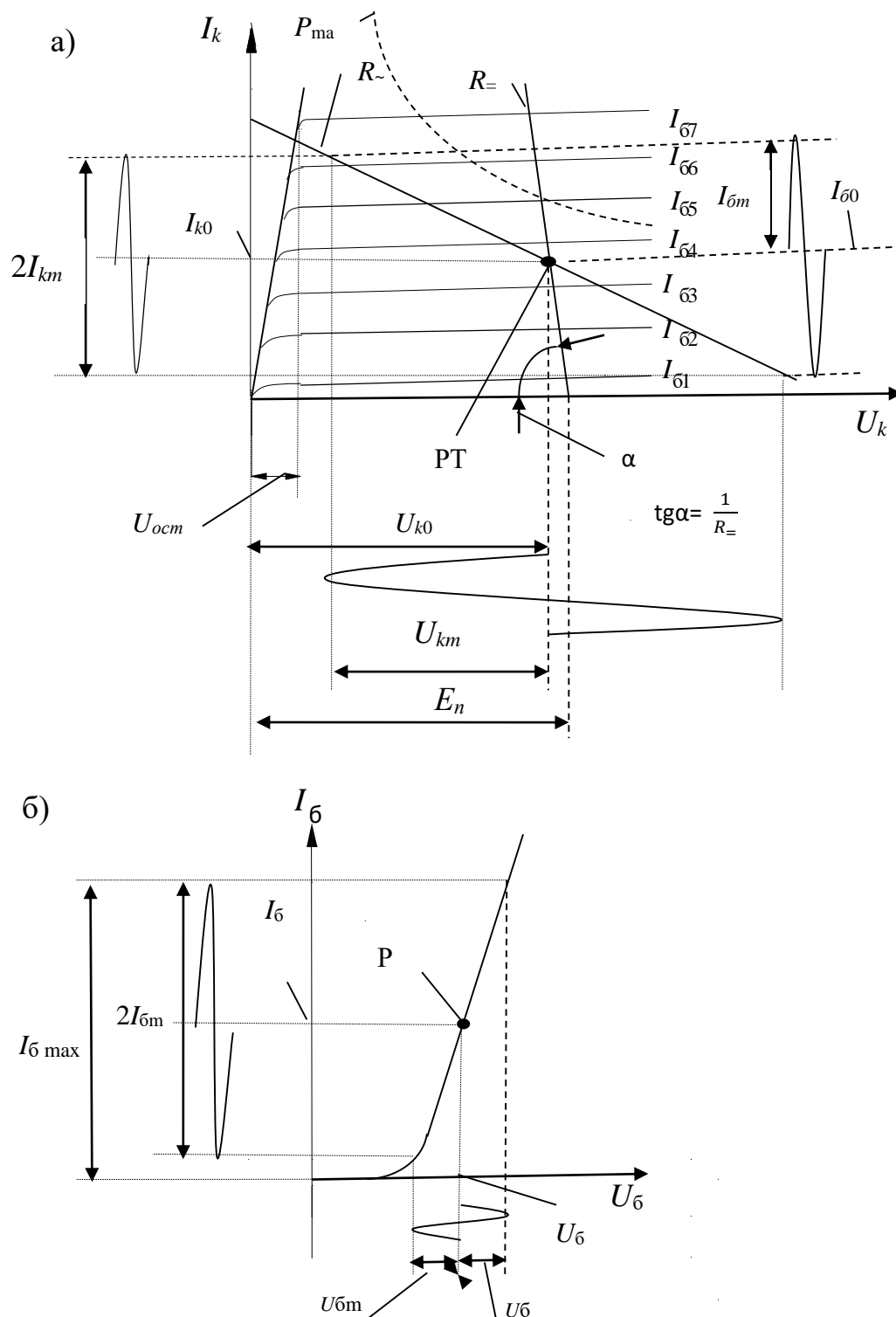


Рисунок 1. – Иллюстрация работы трансформаторного каскада усиления по выходным (а) и входным (б) вольтамперным характеристикам биполярного транзистора в режиме А

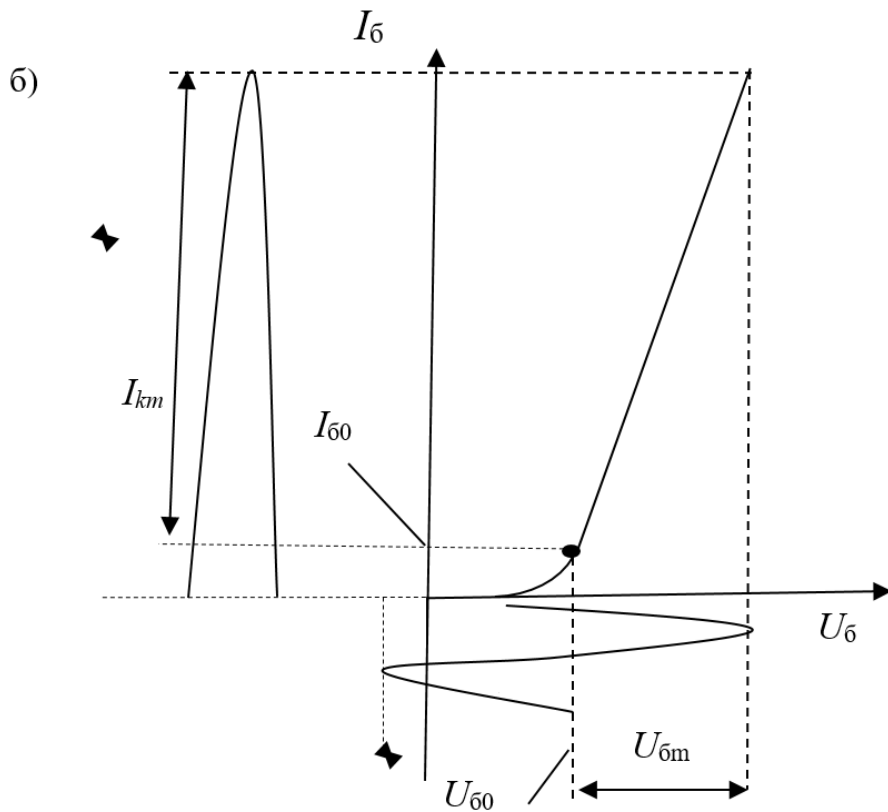
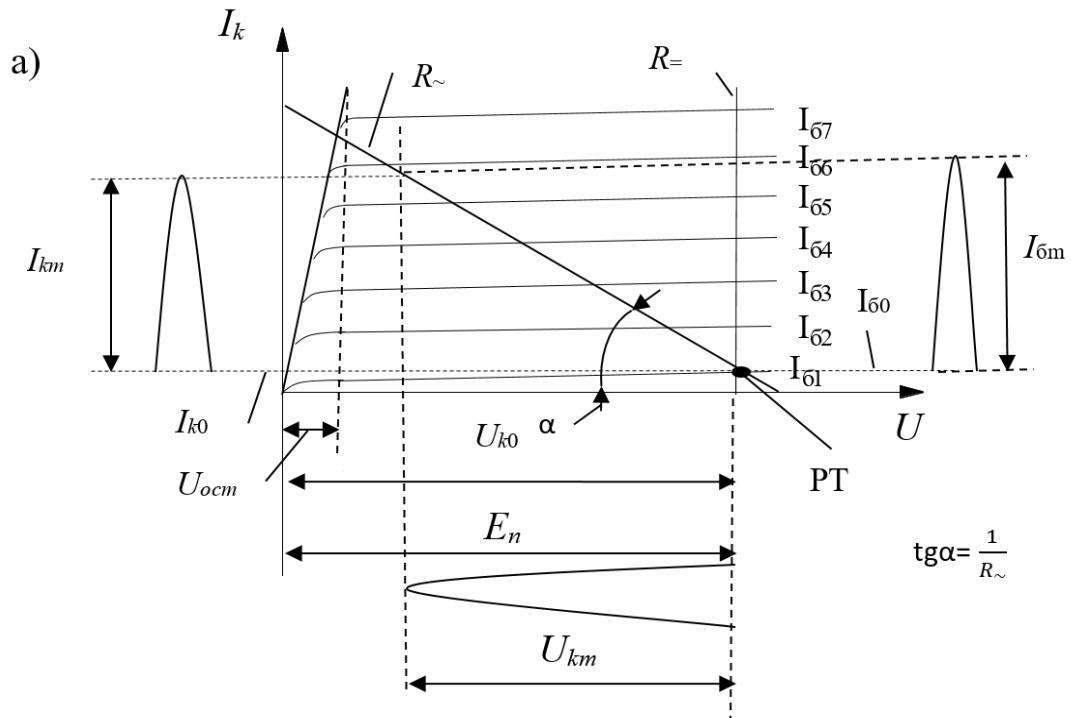


Рисунок 2. – Иллюстрация работы одного транзистора в двухтактном каскаде с отсечкой по выходным (а) и входным (б) вольтамперным характеристикам биполярного транзистора в режиме АВ

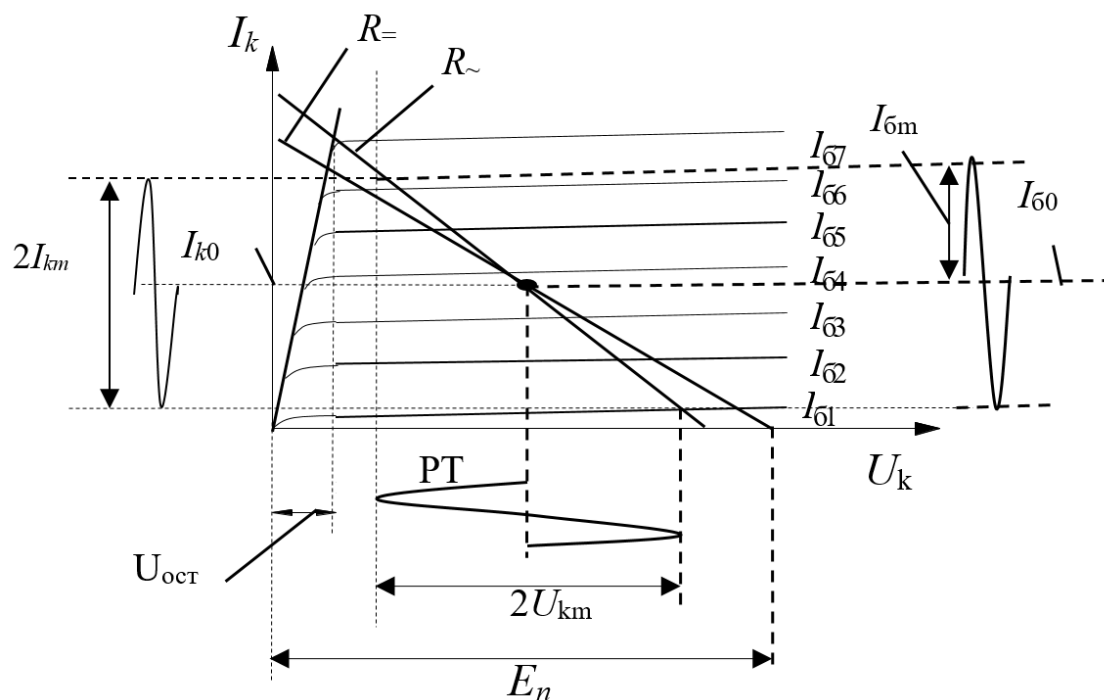


Рисунок 3. – Иллюстрация работы резистивного каскада усиления по выходным вольтамперным характеристикам биполярного транзистора в режиме А

Графическая иллюстрация режимов работы каскадов приведена на рисунках 1 – 3 с использованием входных и выходных вольтамперных характеристик транзисторов. Резистивные усилители обычно используют в каскадах предварительного усиления. Режимы с отсечкой – в двухтактных каскадах. По входным характеристикам и сигналам работа трансформаторного и резистивного каскадов практически не отличаются.

Схемы стабилизации рабочей точки могут быть выбраны и рассчитаны с учетом рекомендаций, изложенных в [1; 2].

После расчета резисторов (конденсаторов) их величина выбирается по номиналу в соответствии с ГОСТом. В дальнейших расчетах следует использовать эти выбранные значения номиналов.

После расчета всех каскадов оценивают нелинейные искажения с использованием методик, изложенных, например, в [3]. Если расчетное значение K_T превышает заданную величину, то решают вопрос о введении ООС или изменении схемы выходного каскада. При расчете частотных искажений по верхней частоте в выходных каскадах учитывают только влияние транзистора, а в предварительных, в основном, – влияние емкости нагрузки.

Методика проектирования импульсных и широкополосных усилителей слабо отличается от обычных и изложена в [1].

Основная задача проектирования импульсного или широкополосного усилителя – обеспечить заданную амплитуду и полярность выходного импульса при удовлетворении требований к параметрам выходного сигнала: времени установления фронта t_y , спаду вершины импульса Δ , выбросу переходной характеристики δ .

Проектирование начинается с выбора функциональной схемы. При этом определяют тип выходного и входного каскадов, распределяют общее время установления фронта между каскадами.

При высокоомной или емкостной нагрузках выходной каскад чаще всего делают по схеме с общим эмиттером (исток) или общим катодом (в ламповых схемах). При низкоомной нагрузке (кабель) в качестве выходного каскада часто используют повторители. Вследствие высокой крутизны биполярных транзисторов в таких схемах, выходной каскад может быть реализован по схеме ОЭ. Тогда сопротивление резистора в коллекторной цепи выбирают равным сопротивлению согласованной нагрузки ($\rho_{\text{каб}}$), обеспечивая согласование на входе кабеля.

При распределении t_y между каскадами на выходной каскад (если он не повторитель) обычно отводят не более $0,6 t_y$, время установления входной цепи не должно существенно превышать t_y каскада предварительного усиления.

Для уменьшения t_y выходного каскада выбирают усилительный элемент с большим импульсом тока или вводят высокочастотную коррекцию. В случае высокоомной или емкостной нагрузки эффективно действует индуктивная (параллельная) коррекция.

Для уменьшения t_y входной цепи в транзисторных схемах применяют ООС по току в первом каскаде усиления или используют повторитель в качестве первого каскада, что бывает необходимым при высоких значениях внутреннего сопротивления $R_{\text{и}}$ источника сигнала. В ламповых схемах (на пентодах) первый каскад мало влияет на параметры входной цепи.

Расчет усилителя начинается с выбора усилительного элемента.

По частотным свойствам транзистор должен удовлетворять требованию $f_T \geq 3/t_y$. По предельному значению напряжение между электродами:

$$U_{\text{кэ max}} > E_m > U_{\text{вых}}.$$

Для ламп и полевых транзисторов, также по импульсу тока:

$$\Delta I \geq 2,2 U_{\text{вых}} C_n / t_y.$$

Затем рассчитывают выходной каскад и входную цепь.

Расчет выходного каскада производится графоаналитическим методом с использованием усредненных за время действия импульса параметров

транзистора. Если выходным каскадом является повторитель, для которого можно принять $t_{y.вых} = 0$, то предвыходной каскад рассчитывается как выходной каскад, нагруженный на вход повторителя.

В результате расчета выходного каскада и входной цепи для этих элементов схемы определяют $t_{y.вых}$, $t_{вх}$, $K_{вых}$, $K_{вх}$ цепи. При расчете выходного каскада определяют необходимость введения высокочастотной коррекции, которая вводится, если условие $t_{y.вых} \leq 0,6 t_y$ не выполняется.

Далее оценивают время установления и коэффициент усиления каскадов предварительного усиления: $t_{уст.} = \sqrt{t_{y.усил}^2 - t_{y.вых}^2 - t_{y.вх}^2}$;

$$K = K_0 / K_{вх.ц} \cdot K_{вых},$$

где $K_0 = U_{вых} / U_{вх}$.

По значению $t_{уст}$ и K оценивают общее число предварительных каскадов. При этом учитывают требуемую полярность выходного импульса. Затем рассчитывают время установления и коэффициент усиления единичного каскада предварительного усиления:

$$t_{y.1} = t / \sqrt{n}, K_1 = \sqrt[n]{K}.$$

По величине $t_{y.1}$ судят о необходимости введения высокочастотной коррекции в предварительных каскадах. Затем составляют принципиальную схему усилителя, рассчитывают схемы высокочастотной коррекции и вспомогательные цепи (переходные, фильтровые и емкости в цепи эмиттера), добиваясь, чтобы суммарный спад вершины импульса $\Sigma \Delta_{сп}$ был меньше заданного на усилитель.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАСКАДОВ УСИЛИТЕЛЯ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

1.1. Расчет выходных каскадов

Расчет выходного бестрансформаторного каскада в режиме АВ изложен учебнике [2]. Расчет трансформаторного выходного одноконтурного каскада в режиме А также изложен в других работах. Остановимся на расчете двухконтурного трансформаторного выходного каскада в режиме АВ схемы ОЭ, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.1, а).

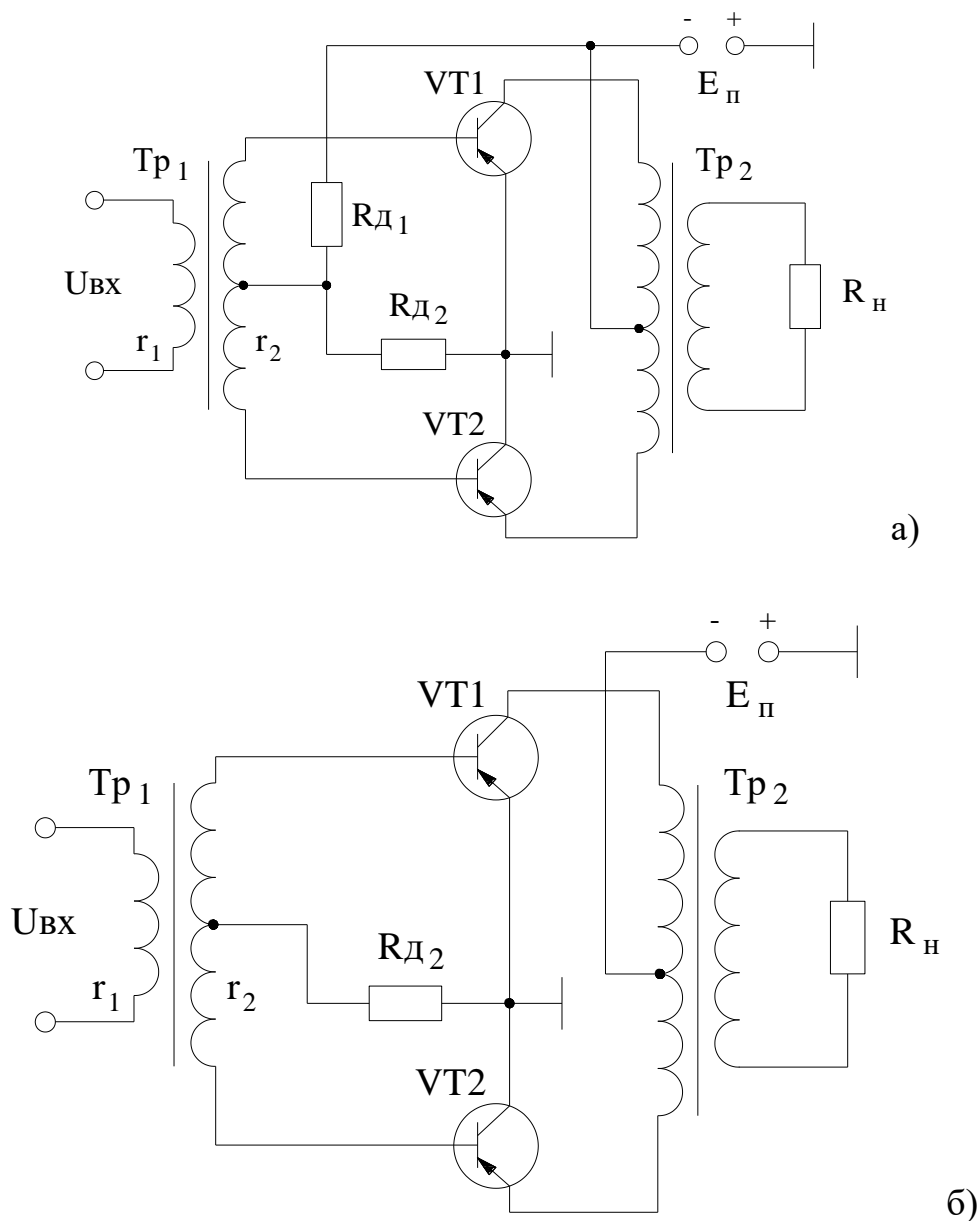


Рисунок 1.1. – Двухтактный выходной трансформаторный каскад

Порядок расчета

Исходными данными для расчета являются: P_n – мощность, развиваемая на нагрузке; R_n – сопротивление нагрузки; F_{\max}, F_{\min} – полоса усиливаемых частот; M_n – коэффициент частотных искажений в области низких частот, отводимый на каскад.

1. Оценивают требуемую выходную мощность транзисторов:

$$P_{\sim} = P_n / \eta_{mp},$$

где P_n – мощность, развиваемая на нагрузке;

η_{tr} – КПД трансформатора Тр2; $\eta_{tr} \approx (0,7 - 0,9)$.

2. Выбирают транзисторы:

– по выходной мощности $P_{k \max} > 0,25 P_{\sim}$; $P_{k \max}$ – допустимая мощность рассеивания на коллекторе транзистора (справочная величина), при рабочей температуре $t_{cp}^{\circ}C > 25^{\circ}$ P_{\max} уточняют, снижая ее; при этом следует учитывать наличие (отсутствие) теплоотвода;

– по допустимому значению напряжения $U_{k \max} > 2E_{п}$. ($U_{k \max}$ – справочное значение);

– по частоте $f_{h21\delta} > 2 - 4 F_{\max}$, где $f_{h21\delta}$ – граничная частота транзистора (справочное значение); F_{\max} – верхняя граница спектра усиливаемого сигнала.

3. Выбирают исходный режим транзисторов:

$$U_{k0} \leq (0,35 - 0,45)U_{k \max}; I_{k0} \leq (0,05 - 0,1)I_{k \max},$$

U_{k0}, I_{k0} – напряжение и ток в исходной рабочей точке.

4. Рассчитывают требуемое сопротивление переменному току в каждом плече:

$$R_{\sim} = 0,5(U_{ок} - U_{ост})^2/P_{\sim},$$

где $U_{ост}$ – минимальное допустимое напряжение на коллекторе транзистора при заданной нагрузке.

5. Строят нагрузочную характеристику выбранного двухтактного каскада на выходных характеристиках транзистора (рисунок 1.2) и входную характеристику транзистора (рисунок 1.3).

По построенной нагрузочной характеристике определяют графическим способом амплитуду выходного напряжения $U_{км}$ и тока $I_{км}$, а затем находят расчетную выходную полезную мощность на нагрузке:

$$P_{\sim \text{расч}} = 0,5 I_{км} \cdot U_{км}; P_{\sim \text{расч}} > P_n;$$

По входной характеристике определяют требуемую амплитуду входного напряжения:

$$U_{бм} = U_{б\max} - U_{б0},$$

и требуемую амплитуду входного тока:

$$I_{бм} = I_{км} / h_{21\delta \min}.$$

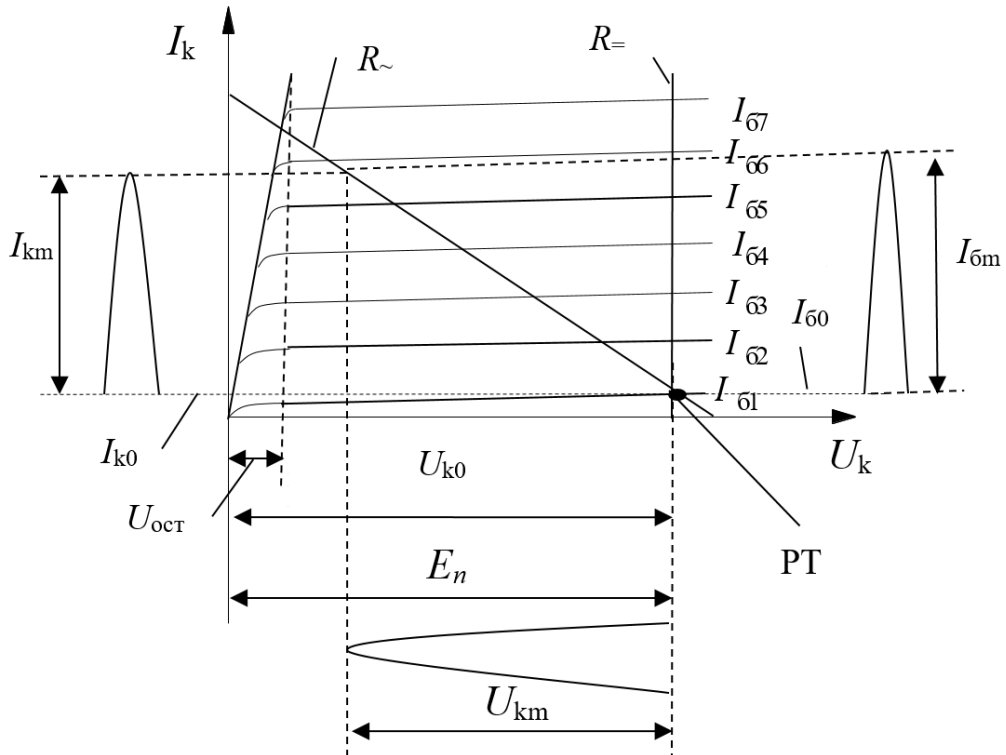


Рисунок 1.2. – Выходная (нагрузочная) характеристика двухтактного каскада с отсечкой тока (режим АВ)

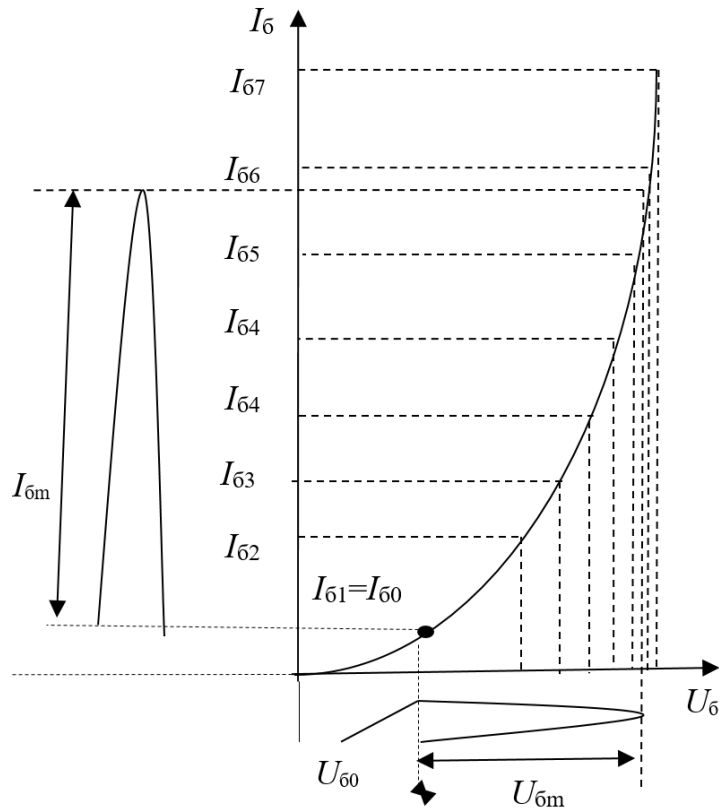


Рисунок 1.3. – Входная характеристика биполярного транзистора двухтактного каскада с отсечкой тока (режим АВ)

Входное сопротивление транзистора $R_{вх.т} = U_{бм} / I_{бм}$; $I_{бм}$ снимается с входной характеристики.

6. Рассчитывают делитель смещения. Исходя из величины тока делителя $I_{дел} = (1 \div 3) I_{бм}$, находят $R_{д2} = U_{б0} / I_{дел}$, $R_{д1} = (E_{п} - U_{б0}) / (I_{дел} + 2I_{б0})$.

Выбирают номиналы ГОСТа резисторов $R_{д2}$, $R_{д1}$ с учетом мощности, рассеиваемой на резисторе.

7. Рассчитывают входное сопротивление плеча и требуемую входную мощность. Для схемы, изображенной на рисунке 1.1, а):

$$R_{вх.пл} = \frac{R_{вх.м} \cdot R_{д2} \cdot R_{д1}}{R_{д2} \cdot R_{вх.м} + R_{д2} \cdot R_{д1} + R_{д1} \cdot R_{вх.м}} ; P_{вх} = 0,5 I_{вх.пл} \cdot U_{бм} ,$$

где:
$$I_{вх.пл} = I_{бм} + \frac{U_{бм}}{R_{д2}} + \frac{U_{бм}}{R_{д1}} .$$

Для схемы, указанной на рисунке 2.1, б):

$$R_{вх.пл} = \frac{U_{вх.каск}}{I_{бм}} = \frac{U_{бм} + I_{бм} \cdot R_{д2}}{I_{бм}} = R_{вх.т} + R_{д2}$$

$$P_{вх} = 0,5 I_{бм} \cdot U_{вх.каск} .$$

8. Рассчитывают коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{н} / P_{вх} .$$

9. Ведут электрический расчет трансформатора Тр2.

Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$0,5 \cdot n = \sqrt{\frac{R_{н}}{\eta_{тр} R}} ,$$

где R – выбранное расчетное сопротивление для транзистора одного плеча ($R = R_{\sim}$).

Индуктивность первичной обмотки трансформатора Тр2 $L_1 = 4L_{1нл}$, при

$$L_{нл} = \frac{0,16(R - r_{1н})}{F_{\min} \sqrt{M_{н.тр}^2 - 1}} ,$$

где: $r_{1н}$ – активное сопротивление половины первичной обмотки трансформатора Тр2:

$$r_{1н} = 0,58 R_{\sim} (1 - \eta_{тр});$$

F_{\min} – нижняя граница спектра усиливаемых частот;

$M_{н.тр}$ – коэффициент частотных искажений в области нижних частот, отведенный на рассчитываемый трансформатор.

Сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$r_2 = 0,42R_n(1 - \eta_{тр}) / \eta_{тр}.$$

10. Рассчитывают коэффициент частотных искажений по верхней частоте

$$M_B = \sqrt{1 + \frac{F_{\max}}{f h_{21э}}}$$

11. КПД каскада определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_n}{(0,637I_{км} + I_{дел}) \cdot E_{п}}.$$

12. Рассчитывают нелинейные искажения каскада, для чего строят динамическую сквозную характеристику плеча, используя входные и выходные характеристики транзистора. При этом для каждой j -й точки нагрузочной характеристики рассчитывают

$$E_{\sim ucmj} = U_{\delta\alpha j} + I_{\sim \delta j} R_{ucm}.$$

Снимая значения I_{kj} для каждой точки выходной характеристики, а также $U_{\delta\alpha j}$ и $I_{\sim \delta j}$ с входной характеристики, строят зависимость $I_{kj} = f_1(E_{\sim ucmj})$.

Применяя метод пяти ординат, оценивается уровень нелинейных искажений. (Определяются: ток в рабочей точке Γ_0 и токи, соответствующие максимуму Γ_{\max} и минимуму Γ_{\min} входного напряжения, а также токи, соответствующие половине максимального Γ_1 и минимального Γ_2 входных напряжений). В случае симметричного двухтактного каскада метод пяти ординат преобразуется в метод трех ординат с использованием коэффициента несимметрии (рассматривается один транзистор).

По сквозной характеристике (рисунок 1.4) графическим способом находят Γ_{\max} , Γ_1 , Γ_0 . Учитывая, что $\Gamma_0 = 0$, далее рассчитывают значения тока гармоник с учетом асимметрии плеч:

$$I_{m1} = \frac{2}{3} (\Gamma_{\max} + \Gamma_1);$$

$$I_{m2} = b \Gamma_{\max} / 2;$$

$$I_{m3} = (\Gamma_{\max} - 2\Gamma_1) / 3;$$

$$I_{m4} = b (\Gamma_{\max} - 4\Gamma_1) / 6,$$

где: b – коэффициент асимметрии (0,1 – 0,25) в зависимости от схемы включения транзисторов и $R_{ист}$;

$R_{ист}$ – сопротивление по переменному току той части схемы, что включена параллельно входному сопротивлению транзистора $R_{вх.т.}$.

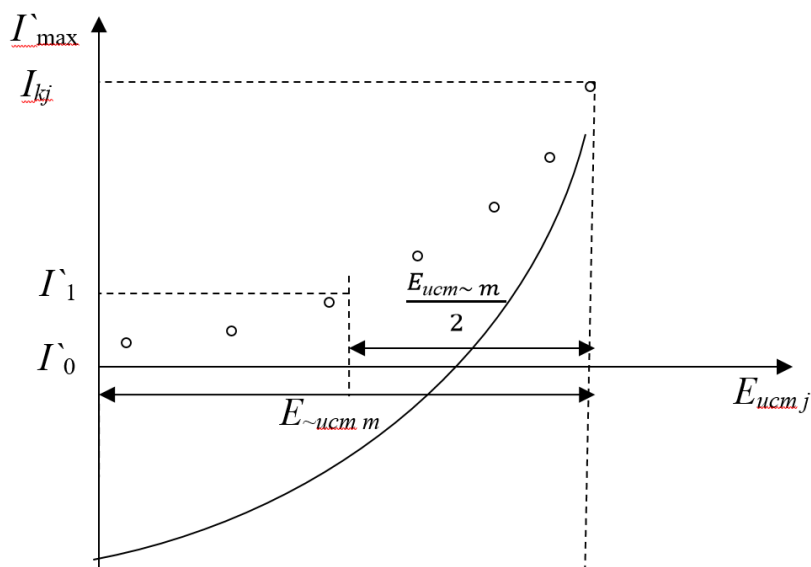


Рисунок 1.4. – Проходная (сквозная) характеристика каскада

Для схемы 1.1, б): $R_{ист} = (R_{вых.т.пр.} + r_1) \cdot (n \cdot 0,5)^2 + R_{д2} + r_2 \cdot 0,5$,

где: $R_{вых.т.пр.}$ – выходное сопротивление транзистора предвыходного каскада;
 r_1 – омическое сопротивление первичной обмотки трансформатора Тр1;
 $r_2 \cdot 0,5$ – омическое сопротивление половины вторичной обмотки трансформатора Тр1;

$n \cdot 0,5$ – коэффициент трансформации по отношению к половине вторичной обмотки трансформатора Тр1.

Для схемы 1.1, а): вместо $R_{д2}$ в предыдущей формуле применяют параллельное включение $R_{д1}$ и $R_{д2}$, т. е. $R = R_{д1} \cdot R_{д2} / (R_{д1} + R_{д2})$.

Рассчитывают коэффициент гармоник каскада:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{(bI_{2m})^2 + I_{3m}^2 + (bI_{4m})^2}{I_{1m}}}$$

Если $K_{\Gamma} > K_{зад}$, то следует пересмотреть схему включения транзисторов выходного каскада или увеличить E_n .

Примечание. При включении транзисторов по схеме с общей базой общий порядок расчета мало отличается от приведенного. При этом используются входные и выходные характеристики, соответствующие этому способу включения транзистора.

1.2. Расчет фазоинверсных каскадов

Трансформаторный фазоинверсный каскад (ФИК), используемый при входной мощности выходного каскада $P_{\text{вх.пл}} > 1-2$ мВт, рассчитывается как трансформаторный усилитель мощности в режиме А, у которого нагрузкой плеча вторичной обмотки трансформатора является входное сопротивление плеча выходного каскада, то есть $R_{\text{н}} \cdot 0,5 = R_{\text{вх.пл}}$. При этом выходная мощность должна быть не менее требуемой входной мощности выходного каскада – $P_{\text{вх}}$, а выходное напряжение – не менее требуемого на входе выходного каскада. Расчет усилителя мощности в разных режимах представлен, например, в [3].

Рассмотрим расчет фазоинверсного резистивного каскада (рисунок 1.5), учитывая характеристики выходного каскада: $R_{\text{вх.пл}}$, $U_{\text{вх.пл}}$, $I_{\text{вх.пл}}$, а также полосу усиливаемых частот (F_{min} , F_{max}) и коэффициент частотных искажений, отводимых на фазоинверсный каскад (ФИК).

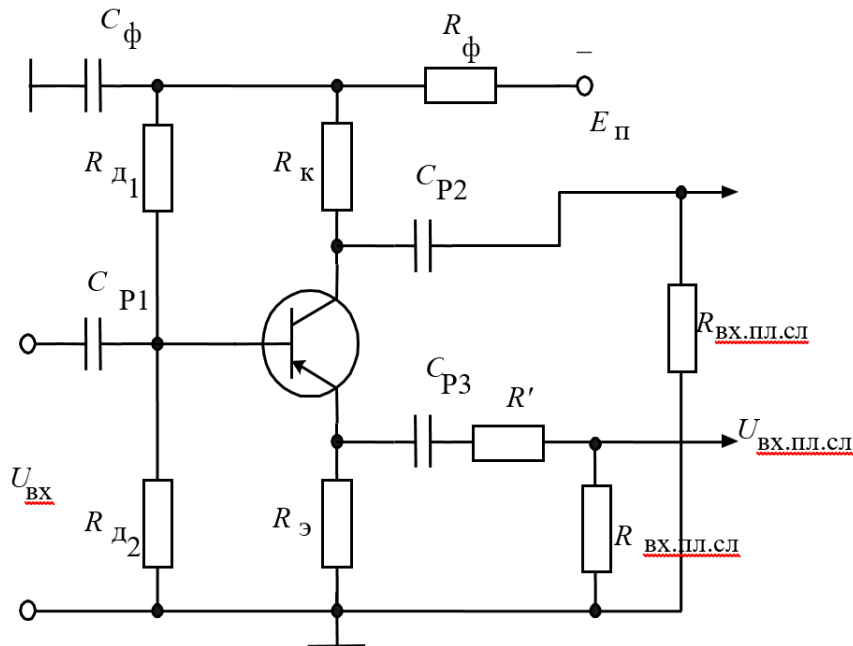


Рисунок 1.5. – Фазоинверсный резистивный каскад

В этой схеме резистор R' включается для выравнивания выходных сопротивлений эмиттерного и коллекторного плеч, так как выходное сопротивление эмиттерного плеча существенно меньше выходного сопротивления коллекторного плеча, равно, примерно, $R_{\text{к}}$.

Порядок расчета

1. Выбирают транзистор:

по максимальному напряжению $U_{\text{к max}} > E_{\text{п}}$ каскада;

по максимальному току $I_{\text{к max}} > (2,2 \div 2,5) I_{\text{вх пл}}$;

по частоте $f_{\text{h21э}} \geq 3-4 F_{\text{max}}$.

2. Выбирают режим работы транзистора:

$$I_{к0} = (1,2 \div 1,5)I_{\text{ВЫХ.ПЛ}};$$

$$U_{к0} = E_{\Pi} / 4.$$

3. Рассчитывают R_k и R_3 :

$$R_k = R_3 = 0,3E_{\Pi} / I_{к0}.$$

4. Используя статистические выходные характеристики, определяют I_{60} и U_{60} для заданного режима или рассчитывают

$$I_{60} = I_{к0} / h_{21э}, \text{ где } h_{21э} = \sqrt{h_{21э \text{ min}} \cdot h_{21э \text{ max}}}.$$

Величиной U_{60} задаются для германиевых транзисторов в пределах 0,15 – 0,25 В, для кремниевых транзисторов – от 0,5 – 0,7 В.

5. Рассчитывают коэффициенты усиления по току и напряжению:

$$K_I = h_{21э \text{ min}} R_{э\sim} / R_{\text{ВХ.Т.СЛ}}, K = h_{21э \text{ min}} R_{э\sim} / R_{\text{ВХ.Т.ИНВ}},$$

где $R_{э\sim} = R_3 \cdot R_{\text{ВХ.ПЛ}} / (R_3 + R_{\text{ВХ.ПЛ}})$ – эквивалентное сопротивление нагрузки цепи эмиттера;

$R_{\text{ВХ.Т.СЛ}}$ – входное сопротивление транзистора следующего выходного каскада; входное сопротивление транзистора ФИК с учетом влияния ООС определяется выражением:

$$R_{\text{ВХ.Т.ИНВ}} = r_6 + \left(\frac{26}{I_{к0}} + R_{э\sim} \right) (h_{21э} + 1).$$

Здесь $I_{к0}$ в мА.

6. Рассчитывают требуемые входные амплитуды тока и напряжения:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ.ПЛ}} / K; I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ.ПЛ}} / K_I$$

7. Рассчитывают схему стабилизации рабочей точки транзистора. Задаются током делителя $I_{\text{ДЕЛ}} = (3 \div 10)I_{60}$ или $I_{\text{ДЕЛ}} = (0,1 \div 0,2)I_{к0}$.

Определяют $R_{д2}$, $R_{д1}$:

$$R_{д2} = \frac{U_{60} + I_{к0}R_3}{I_{\text{ДЕЛ}}}, R_{д1} = \frac{E_k - R_{д2}I_{\text{ДЕЛ}}}{I_{\text{ДЕЛ}} + I_{60}}.$$

8. Рассчитывают разделительные емкости C_{p2} , C_{p3} :

$$C_{p2} = \frac{0,16}{F_{\text{min}} (R_k + R_{\text{вх.пл}}) \sqrt{M_{\text{нс2}}^2 - 1}}; C_{p3} = \frac{0,16}{F_{\text{min}} (R_{\text{вх.пл}} + R_{\text{вх.инв}}) \sqrt{M_{\text{нс3}}^2 - 1}};$$

где: $M_{\text{нс2}}$ и $M_{\text{нс3}}$ – коэффициенты частотных искажений, отведенные на разделительные емкости, в области малых частот.

Выходное сопротивление нижнего плеча фазоинверсного каскада $R_{\text{ВХ.ИНВ}}$ определяется выражением

$$R_{\text{вых.инв.}} = \frac{R'_H [r_{\sigma} + \frac{26}{I_{\text{к0}}}(h_{21э} + 1)]}{1 + h_{21э}},$$

где: $R'_H = \frac{R_{\text{дел}} \cdot R_{\text{к.пред}}}{R_{\text{дел}} + R_{\text{к.пред}}}$ – внутреннее сопротивление эквивалентного источника сигнала для ФИК;

$$R_{\text{дел}} = \frac{R_{\text{д1}} \cdot R_{\text{д2}}}{R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}}} \text{ – эквивалентное сопротивление делителя смещения;}$$

$R_{\text{к.пред}}$ – сопротивление в цепи коллектора каскада, предшествующего ФИК.
 9. Рассчитывают частотные искажения каскада в области высоких частот. Оценивают емкость, нагружающую каждое плечо инверсного каскада:

$$C_0 = C_{\text{эб.т.сл}} = \frac{0,16}{f_{h21\text{'сл}} h_{21\text{'эсл}} r_{\text{эсл}}},$$

где $r_{\text{эсл}} = \frac{26}{I_{\text{ок.сл}}[\text{МА}]}$.

Коэффициент частотных искажений

$$M_{\epsilon} = \sqrt{1 + (2\pi F_{\text{max}} C_0 \cdot R_{\text{экв}})^2}$$

где $R_{\text{экв}} = \frac{R_{\text{вых.инв}} \cdot R_{\text{э~}}}{R_{\text{вых.инв}} + R_{\text{э~}}}$.

10. Оценивают C_{p1} :

$$C_{p1} = \frac{0,16}{F_{\text{min}} (R_{\text{вх.каска}} + R_{\text{к.пред}}) \sqrt{M_{\text{нс1}}^2 - 1}}$$

где

$$R_{\text{вх.каска}} = \frac{R_{\text{вх.т.инв}} \cdot R_{\text{дел}}}{R_{\text{вх.т.инв}} + R_{\text{дел}}}.$$

1.3. Расчет входных каскадов и каскадов предварительного усиления

Расчет схем входных каскадов и каскадов предварительного усиления на биполярных транзисторах в основном сводится к выбору резисторов в коллекторной и эмиттерной цепях таким образом, чтобы обеспечить выбранный исходный режим работы транзистора. В каскадах предварительного усиления обычно реализуется справочный режим работы транзистора.

Транзисторы при этом выбираются, как и ранее, по частоте $f_{h21э}$ и предельному напряжению $U_{кэ\max}$. Если в качестве входного каскада используется эмиттерный повторитель, то для повышения $R_{вх. каск}$ исходный режим выбирают при меньших значениях $U_{к0}$, $I_{к0}$, чем справочные для данного транзистора. При этом сопротивление $R_э$ определяется из условия обеспечения требуемого режима.

Схемы входных каскадов и каскада предварительного усиления приведены на рисунках 1.6 – 1.8.

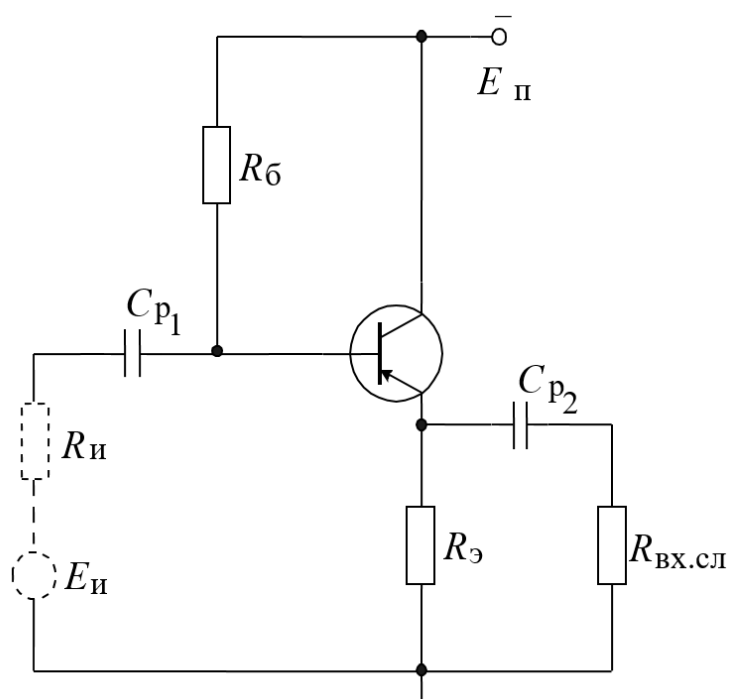


Рисунок 1.6. – Эмиттерный повторитель

Таким образом, для схемы эмиттерного повторителя (см. рисунок 1.6) сопротивления $R_э$ и $R_б$ определяются:

$$R_э = \frac{E_{II} - U_{к0}}{I_{к0}}; R_б = \frac{U_{к0} - U_{б0}}{I_{б0}}.$$

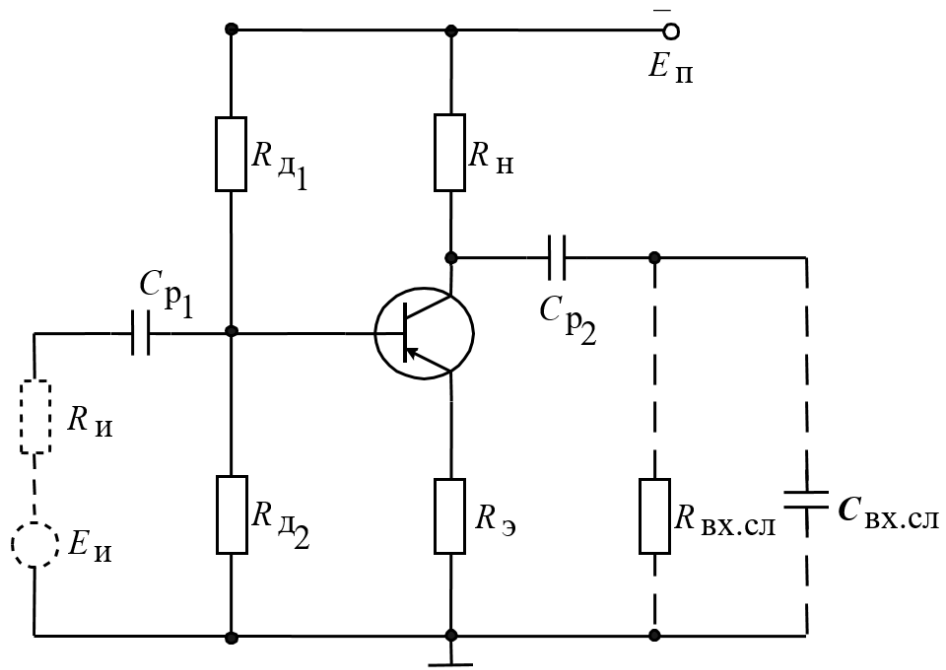


Рисунок 1.7. – Усилитель с отрицательной обратной связью

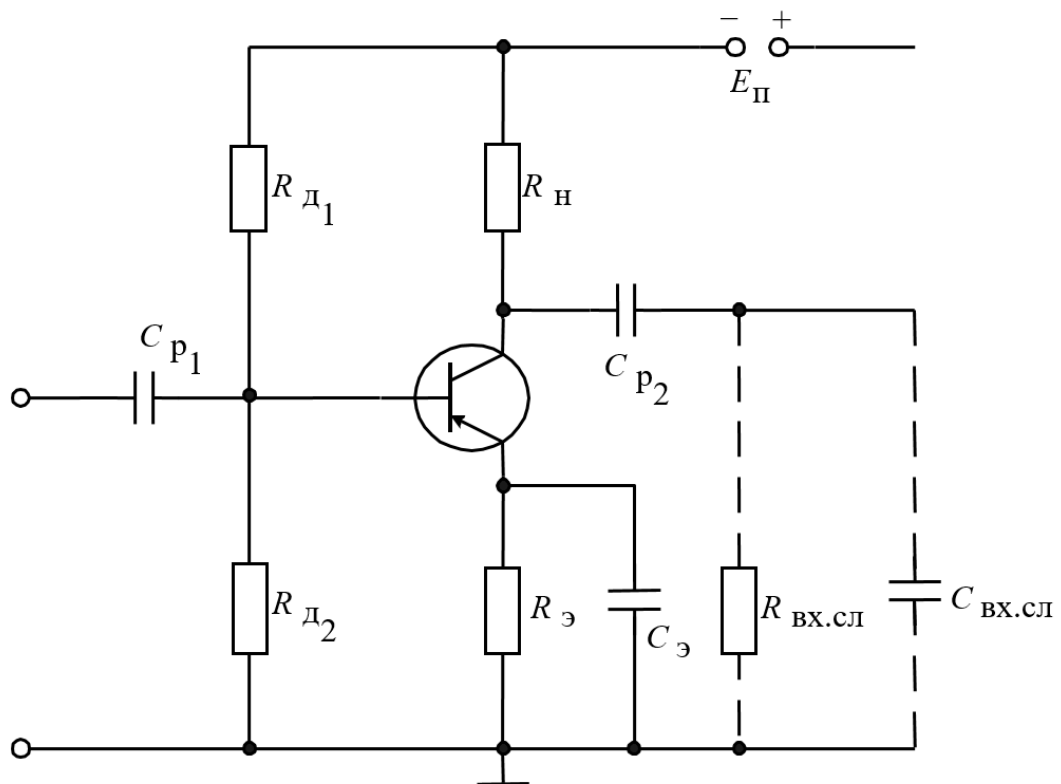


Рисунок 1.8. – Резистивный каскод с эмиттерной стабилизацией

Входное сопротивление эмиттерного повторителя определяют по формуле

$$R_{\text{вх.эп}} = \left(\frac{26}{I_{\text{к0}}} + R_{\text{э}\sim} \right) (h_{21\text{э}} + 1),$$

где

$$R_{\text{э}\sim} = \frac{R_{\text{э}} \cdot R_{\text{вх.сл}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{вх.сл}}}.$$

Разделительные емкости рассчитывают аналогично расчету ФИК резистивного типа.

При расчете каскада с ООС сопротивление $R_{\text{э}}$ оценивается из условий получения требуемого значения входного сопротивления $R_{\text{вх.оос.к}}$, учитывающего шунтирующее влияние делителя смещения $R_{\text{дел}}$, то есть $R_{\text{вх.оос.к}} = R_{\text{н}}$ (нагрузка предыдущего каскада). Определить $R_{\text{э}}$ в этом случае можно по приближенной формуле:

$$R_{\text{э}} = \frac{(1,2 \div 1,25)R_{\text{н}}}{h_{21\text{э}} + 1} - r_{\text{э}},$$

где

$$r_{\text{э}} = \frac{26}{I_{\text{к0}}[\text{МА}]}$$

Расчет $R_{\text{к}}$ в этом случае проводится по формуле

$$R_{\text{к}} = \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{к0}} - I_{\text{к0}}R_{\text{э}}}{I_{\text{к0}}}.$$

При расчете схемы (см. рисунок 1.8) значением $R_{\text{э}}$ задаются таким образом, чтобы напряжение на нем составляло $0,1 \dots 0,3 E_{\text{п}}$.

Расчет делителя смещения и разделительных емкостей аналогичен рассмотренному ранее для ФИК.

Коэффициенты усиления по току и напряжению для ЭП рассчитываются по тем же формулам, что и для резистивного ФИК.

$$K_i = h_{21\text{э min}} \frac{R_{\text{к}\sim}}{R_{\text{вх.т.сл}}}; \quad K_u = h_{21\text{э min}} \frac{R_{\text{к}\sim}}{R_{\text{вх.т.оос}}}; \quad K_u = h_{21\text{э min}} \frac{R_{\text{к}\sim}}{R_{\text{вх.т}}},$$

где $R_{\text{вх.т.оос}} = r_{\text{б}} + (r_{\text{э}} + R_{\text{э}})(h_{21\text{э}} + 1)$ – входные сопротивления транзистора с учетом ООС.

1.4. Расчет схемы стабилизации режима

Наиболее широко в усилительных каскадах бытовой РЭА используется эмиттерная стабилизация (см. рисунок 1.8). При этом задают такое сопротивление в цепи эмиттера, чтобы падение постоянного напряжения на нем (U_{R_3}) составляло $0,1 \dots 0,3 E_{п}$. При повышении требований к стабильности U_{R_3} данный показатель соответственно увеличивают.

В случае, если в схеме 1.7 расчетное сопротивление R_3 для обеспечения необходимого значения $R_{вх.оос}$ оказалось недостаточной, последовательно с R_3 включают резистор $R'_{оэ}$, который шунтируют емкостью C_3 . Значение $R'_{оэ}$ при этом таково, чтобы общее падение постоянного напряжения на R_3 и $R'_{оэ}$ обеспечивало вышеприведенное условие. Задаются также и ток делителя $I_{дел} = (0,1 - 0,2)I_{к0}$, причем, чем больше ток делителя, тем выше стабильность каскада. Оценка $R_{31} = R_3 + R'_{оэ}$, $R_{д1}$ и $R_{д2}$ рассмотрена при расчете схемы резистивного ФИК. Дальнейший расчет схемы стабилизации сводится к оценке общего изменения коллекторного тока $\Delta I_{к0}$ под действием всех дестабилизирующих факторов для рассчитываемой схемы стабилизации. Для схемы с эмиттерной стабилизацией [2; 3]:

$$\Delta I_{к0} = h_{21э}[\Delta U_{60} + R_{дел} + R_3]\Delta I'_{о} / [R_{дел} + R_{вх.т} + (1 + h_{21э})R_3].$$

При этом $\Delta I'_{о} = \Delta h_{21э}(0,6 + \Delta t^\circ / 500) I_{к0} / h_{21э}^2 -$ изменение коллекторного тока вследствие разброса параметров транзистора и изменения температуры окружающей среды.

Здесь $\Delta h_{21э} = h_{21эmax} - h_{21эmin}$; $\Delta t^\circ = t^\circ_{max} - t^\circ_{эmin}$ – изменение температуры окружающей среды; $\Delta U_{60} = 2,2 \cdot 10^{-3} \Delta t^\circ + 0,03$ – некоторое эквивалентное изменение напряжения смещения.

Если $\Delta I'_{о}$ превышает допустимое (заданное) для каскада значение, следует увеличить R_3 или ток делителя $I_{дел}$ и заново пересчитать схему стабилизации.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

2.1. Расчет импульсного усилителя с емкостной нагрузкой, выполненного на биполярном транзисторе

Общий порядок расчета импульсных усилителей (ИУ) рассмотрен в [2; 3]. Остановимся на особенностях расчета выходных каскадов ИУ с различными нагрузками (рисунок 2.1). Исходными данными, необходимыми для расчета, являются: нагрузка (C_H, R_H); амплитуда и полярность выходного сигнала $+U_{\text{вых}}$; характеристики выходного импульса, к которым относят время установления фронта t_y , допустимый выброс δ , спад вершины, длительность τ_n ; диапазон рабочих температур $t^{\circ}_{\text{max}}, t^{\circ}_{\text{min}}$. Напряжение источника питания $E_{\text{п}}$.

Рассматривается случай получения положительного выходного импульса.

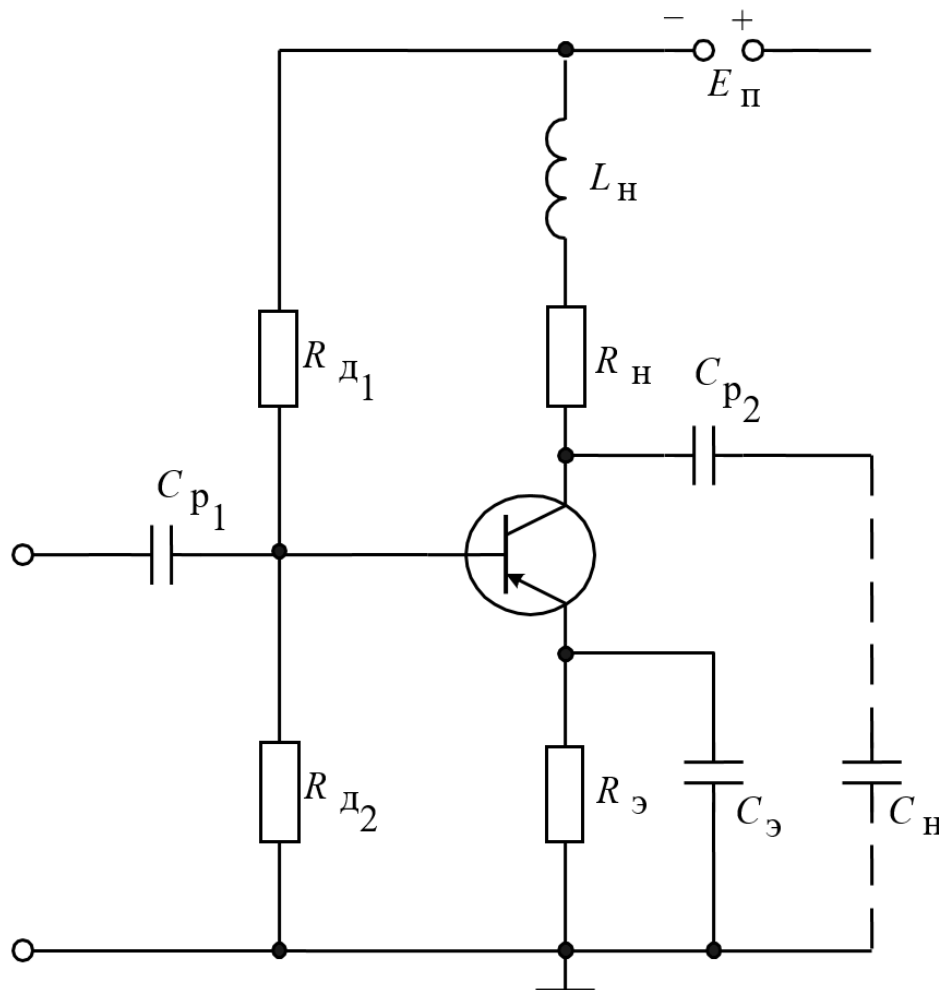


Рисунок 2.1. – Выходной каскад импульсного усилителя с индуктивной коррекцией

Порядок расчета

1. Выбор транзистора:

– по частоте $f_m \geq \frac{3}{t_y}$;

– по напряжению $U_{к\text{эмакс}} > E_{п} > U_{\text{вых}}$; $U_{к\text{эмакс}} > 1,2E_{п}$.

Для выбранного транзистора по справочнику выбирают или рассчитывают следующие характеристики транзистора:

1) g_{21} , g_{11} , g_{22} – прямая, входная и выходная проводимости, соответственно;

2) C_k – емкость коллектора-базы;

3) $r'_б$ – сопротивление базы или $\tau_k = r'_б \cdot C_k$; $\tau_T = 1/2\pi f_{h'21э}$, где $f_{h'21э}$ – граничная частота транзистора в схеме с общим эмиттером.

2. Выбор режима работы транзистора производится по входной (рисунок 2.2) и выходной (рисунок 3.3) характеристикам.

Рабочая точка выбирается в начале линейного участка входной характеристики, которая на выходных характеристиках соответствует характеристике $I_{б0}$. Значение $U_{к0}$, т. е. положение рабочей точки РТ, выбирается таким образом, чтобы выполнялись условия $U_{к0} = (0,6 - 0,7) E_{п}$.

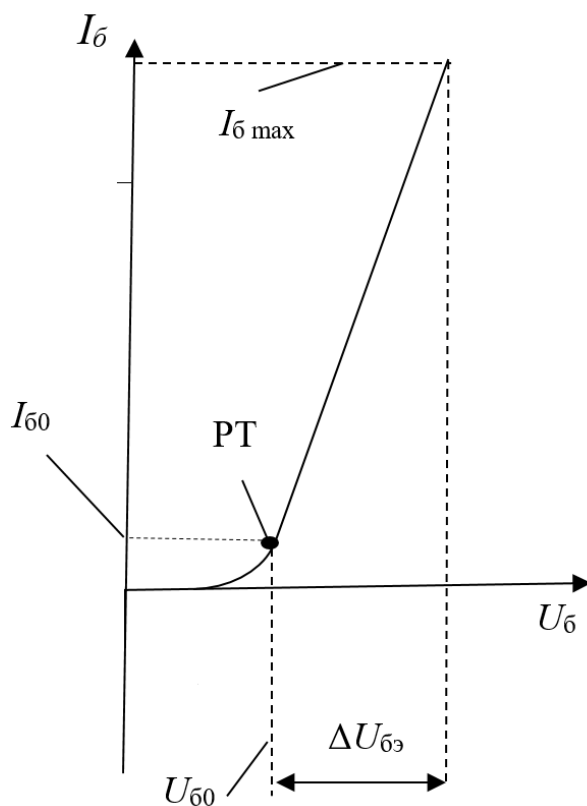


Рисунок 2.2. – Входная характеристика транзистора импульсного усилителя

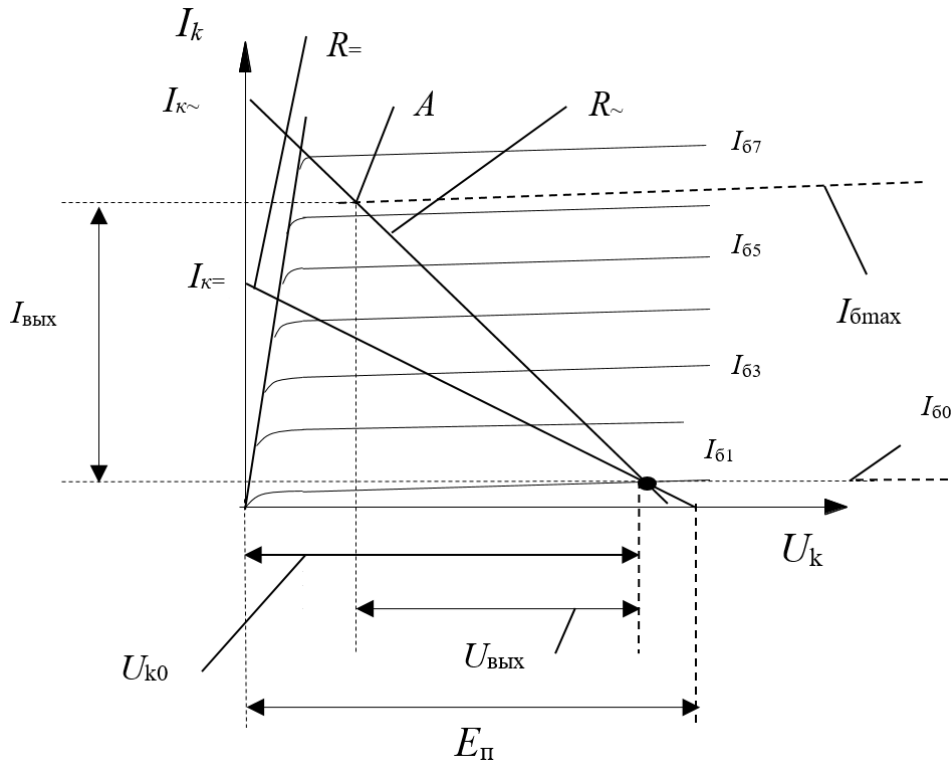


Рисунок 2.3. – Выходная характеристика транзистора импульсного усилителя

Рисунок соответствует случаю использования транзистора прямой проводимости ($p - n - p$) и получения выходного сигнала положительной полярности (при большой скважности прямоугольных импульсов $Q \gg 1$). Для случая получения выходного сигнала отрицательной полярности целесообразно выбирать транзистор обратной проводимости, что позволяет выбирать рабочую точку при малых значениях ток $I_{к0}$, следовательно, повышает коэффициент полезного действия.

В случае использования транзистора прямой проводимости при отрицательном выходном сигнале необходимо выбирать верхнее положение рабочей точки А, однако, при большой скважности импульсов, это приведет к снижению коэффициента полезного действия. Тот же эффект происходит в случае применения транзистора обратной проводимости для получения выходного сигнала положительной полярности.

На выходных характеристиках строят динамическую характеристику по постоянной и переменной составляющим. Построение нагрузочных прямых подробно изложено в работе [3].

Используя проведенные графические построения, рассчитывают:

– общее сопротивление цепи постоянного тока:

$$R_{=} = |E_{\Pi}| / I_{к=};$$

– сопротивление по переменному току:

$$R_{\sim} = |U_{\text{ВЫХ}}| / I_{\text{ВЫХ}};$$

– сопротивление в цепи коллектора R_k из формулы (если $R_H = \infty$):

$$\frac{1}{R_{\sim}} = \frac{1}{R_k} + g_{22};$$

в случае, когда $g_{22} \ll 1/R_k$, $R_k = R_{\sim}$;

– коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВЫХ}}| / |\Delta U_{\text{бэ}}|.$$

Далее рассчитывается схема стабилизации рабочей точки, как это рекомендуется в п. 1.4.

В случае же активной низкоомной нагрузки (кабель), когда для согласования в цепь коллектора включается резистор $R_k = \rho_{\text{каб}}$, общее сопротивление по переменному току $R_{\sim} = \rho_{\text{каб}} / 2$. Тогда для получения требуемой амплитуды выходного сигнала необходимо получить импульс тока:

$$\Delta I_{k\sim} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{k\sim}} = \frac{2|U_{\text{ВЫХ}}|}{\rho_{\text{каб}}}.$$

Поэтому нагрузочную динамическую характеристику проводят исходя из этого условия, при соблюдении ранее приведенных условий, что ведет к необходимости использования транзисторов с бóльшим значением $I_{k\text{max}}$, чем в случае емкостной нагрузки.

Далее расчет каскада с нагрузкой в виде кабеля отличается лишь тем, что $R_{k\sim}$ известно, а R_{\sim} определяется по формуле

$$R_{\sim} = R_{=} - R_{k\sim},$$

где $R_{=}$ – выбранное сопротивление по ВАХ транзистора.

Далее переходят к расчету времени установления выходного каскада $t_{\text{УВЫХ}}$.

Если усредненные по нагрузочной характеристике параметры транзистора отличаются от справочных (когда значения $I_{\text{В}}$, $U_{\text{В}}$ существенно отличаются от значений $I_{\text{к.спр}}$ и $U_{\text{к.спр}}$, при которых определены справочные характеристики транзистора), справочные параметры транзистора следует пересчитать по формулам:

$$g_{11} = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{к.спр}}} \cdot g_{11\text{спр}}; \quad \tau_{\text{T}} = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{к.спр}}} \cdot \tau_{\text{T.спр}}; \quad g_{22} = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{к.спр}}} \cdot g_{22\text{спр}} \quad g_{21} = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{к.спр}}} \cdot g_{21\text{спр}};$$

$$C_{\text{К}} = \sqrt{\frac{U_{\text{к.спр}}}{U_{\text{В}}}} \cdot C_{\text{к.спр}}.$$

Время установления некорректированного каскада $t_{y.вых}$ оценивается по формуле $t_{y.вых} = 2,2r_э$, $r_э = C_0R_к$, где $C_0 = C_м + C_н + C_к$; $C_м$ – емкость монтажа (4-5 пФ); $C_н$ – емкость нагрузки.

Если $t_{y.вых} \leq 0,6 t_y$ усилителя, то коррекцию каскада можно не производить; при невыполнении этого условия вводят коррекцию (высокочастотную) или выбирают транзистор с лучшими характеристиками. Высокочастотная индуктивная коррекция каскада наиболее эффективна при емкостной нагрузке и менее – при низкоомной нагрузке.

В случае введения индуктивной коррекции равномерная амплитудно-частотная характеристика соответствует коэффициенту коррекции $m = 0,41$. Поэтому индуктивность корректирующей катушки рассчитывается:

$$L_к = 0,41 C_о R_к^2 \text{ [Гн]}.$$

2.2. Расчет предварительных каскадов импульсного усилителя

Для предварительных каскадов обычно выбираются те же транзисторы, что и для выходного каскада, за исключением случаев когда выходным каскадам предъявляют какие-либо повышенные требования, например каскад, нагруженный на низкоомную нагрузку при значительных $U_{вых}$.

Обычно транзисторы всех предварительных каскадов работают в справочном режиме, то есть $U_{к0} = U_{к.спр}$, $I_{к0} = I_{к.спр}$.

Далее оценивают требуемое число каскадов предварительного усиления, зависящее от общего коэффициента усиления усилителя и требований по времени установления фронта импульса.

При этом рассчитывают общий коэффициент усиления $K_{общ}$ и общий коэффициент усиления всех предварительных каскадов $K_п$.

$$K_{общ} = U_{вых} / U_{вх}, K_п = K_{общ} / K_{вх.ц},$$

где $K_{вх.ц}$ – коэффициент передачи входной цепи, который определяется (для схемы 2.1):

$$K_{вх.ц} = R_0 / R_г,$$

$$\text{где: } R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_э} + g_{11э} + \frac{1}{R_{дел}}},$$

$R_г$ – внутреннее сопротивление источника сигнала.

Далее оценивают время установления фронта во входной цепи:

$$t_{вх.ц} = 2,2 C_0 R_{зкв},$$

$$\text{где: } C_0 = C_{бэ} + K_1 C_к;$$

$$R_{\text{эКВ}} = (R_{\Gamma}' + r_{\delta}') r_{\text{э}} (1 + h_{21\text{э}});$$

$$R_{\Gamma}' = \frac{R_{\Gamma} \cdot R_{\text{дел}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{дел}}};$$

$$R_{\text{дел}} = \frac{R_{\text{д1}} \cdot R_{\text{д2}}}{R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}}};$$

$$C_{\delta\text{э}}' = \frac{1}{2\pi f_{h_{21\text{э}}} \cdot r_{\text{э}} (1 + h_{21\text{э}})}$$

$$h_{21\text{э}} = \sqrt{h_{21\text{э}\text{min}} \cdot h_{21\text{э}\text{max}}};$$

$$r = \frac{26}{I_{\text{ок}} [\text{mA}]};$$

K_1 – см. ниже.

В приведенных выше формулах все характеристики относятся к транзистору входного каскада. Оценивается время установления фронта импульса, отводимое на все каскады предварительного усиления t_y :

$$t_y = \sqrt{t_{\text{усил}}^2 - t_{\text{вх.ц}}^2 - t_{\text{у.вых}}^2}$$

Выявляется общее число каскадов предварительного усиления, для чего используют графики (рисунок 2.4).

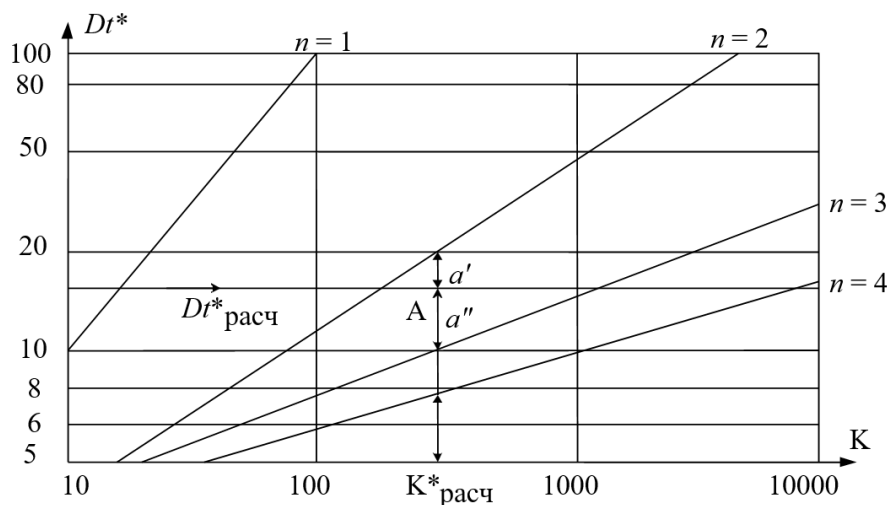


Рисунок 2.4. – Графики определения числа предварительных каскадов

Входными параметрами в графике служат произведения добротности транзистора на общее время установления всех предварительных каскадов и коэффициент усиления предварительных каскадов. Добротность некорректированных каскадов оценивается по формуле:

$$D = \frac{h_{21\sigma}}{2,2[r_T + C_K(r'_\sigma + r_\sigma)]}; \quad h_{21\sigma} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}$$

Если определенная точка А лежит ближе к линии с числом каскадов $(n - 1)$, чем к линии с числом каскадов n ($a' < a''$), то целесообразно выбрать $(n - 1)$ каскадов, повысив их добротность за счет введения высокочастотной коррекции. Если определяющая точка лежит ближе к линии с числом каскадов n , чем к линии с числом каскадов $(n - 1)$, то целесообразно взять число каскадов n без коррекции.

При этом следует учитывать, что полярность входного и выходного импульсов также влияет на выбор числа каскадов. Так, при одинаковой полярности входного и выходного импульсов общее число инвертирующих каскадов в усилителе должно быть четным.

Оценив общее число каскадов предварительного усиления, рассчитывают коэффициент усиления и время установления каждого каскада:

$$K_1 = \sqrt[n]{K_n}; \quad t_{уст1} = \frac{t_y}{\sqrt[n]{n}},$$

где n – число каскадов предварительного усиления.

Далее переходят к расчету элементов схемы (рисунок 2.5) каждого каскада.

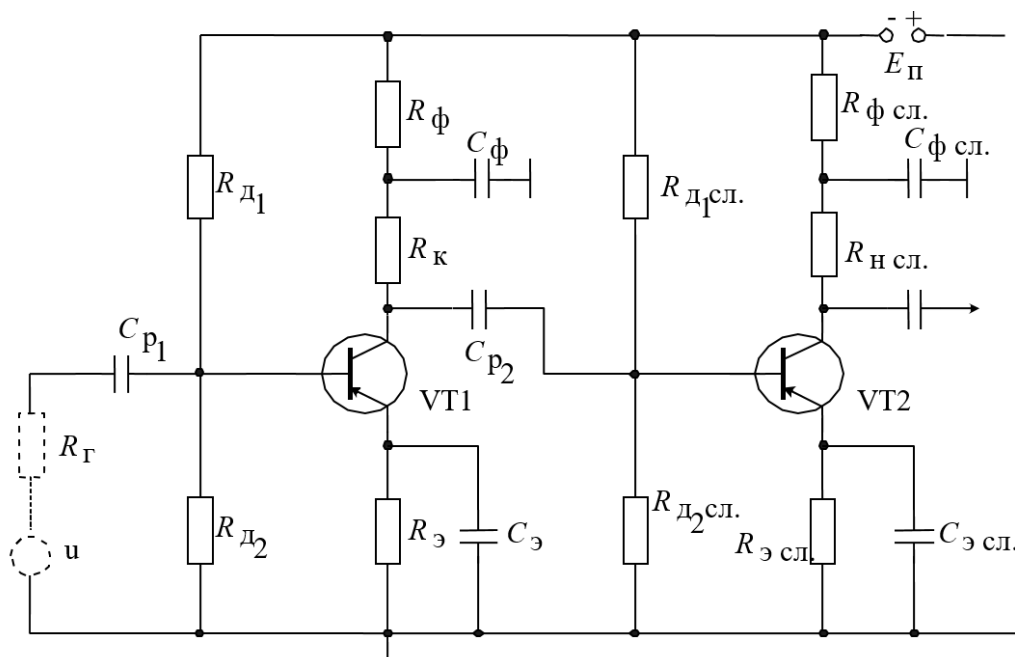


Рисунок 2.5. – Входная цепь и каскады предварительного усиления

Расчет элементов схемы $R_{э}, R_{д1}, R_{д2}$ производится так же, как и расчет схемы стабилизации рабочей точки в каскадах УНЧ (п 1.4).

Значение резистора R_k рассчитывается по формуле

$$R_k = 1 / \left(\frac{1}{R_{\sim}} - g_{11э} - \frac{1}{R_{дел.сл}} \right),$$

где:

$$R_{\sim} = \frac{K_1}{g_{21э}};$$

K_1 – коэффициент усиления каскада предварительного усиления;

$$g_{11э} = 1/h_{11э};$$

$g_{21э} = \frac{h_{21э}}{h_{11э}}$ – характеристика (прямая проводимость) транзистора

рассчитываемого каскада;

$R_{дел.сл} = \frac{R1_{дел.сл} \cdot R2_{дел.сл}}{R1_{дел.сл} + R2_{дел.сл}}$ – сопротивление переменному току делителя

смещения следующего каскада.

Если в каскады предварительного усиления включаются элементы развязывающего фильтра, то $R_{ф}$ рассчитывается следующим образом:

$$R_{ф} = \frac{E_{п} - U_{ок} - U_{Rэ} - I_{ок} R_k}{I_{ок}}$$

Оценивается время нарастания фронта $t_{y1} = 2,2\tau_{э}$,

где: $\tau_{э} = C_0 R_{экв}$;

$C_0 = C_{бэ} + (K_1 + 1)C_{к.сл}$ – общая емкость, нагружающая каскад;

$R_{экв} = (R_{\sim} + r'_{б.сл}) r_{э.сл} (1 + h_{21э.сл})$ – эквивалентное сопротивление;

$$r_{э.сл} = 26 / I_{ок.сл} [\text{мА}].$$

Все предварительные каскады, за исключением предвыходного, будут иметь одинаковые параметры. Предвыходной каскад нагружен на выходной каскад, режим транзистора которого отличается от справочного режима. Вследствие этого в предвыходном каскаде обычно вводят высокочастотную коррекцию. Расчет корректирующей индуктивности не отличается от приведенного ранее для выходного каскада.

Если расчетное время t_y предварительных каскадов меньше отведенного на каждый предварительный каскад t_{y1} , то коррекция каскадов не требуется.

2.3. Расчет вспомогательных цепей импульсного усилителя

В дальнейшем приступают к расчету емкостей C_p , C_ϕ , C_ε .

При этом C_p и C_ε обычно задаются одинаковыми для всех каскадов:

$$C_p = 1 - 5 \text{ мкФ}; C_\varepsilon = 5 - 50 \text{ мкФ}.$$

По значению C_p и C_ε оценивают общий спад вершины выходного импульса $\Delta_{\text{общ}}$:

$$\Delta_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{ki} \Delta C_{pi} + \sum_{j=1}^{kj} \Delta C_{\varepsilon j}$$

где: ΔC_{pi} – спад вершины импульса за счет i -го разделительного конденсатора;

K_i – общее число разделительных конденсаторов;

$\Delta C_{\varepsilon i}$ – спад вершины импульса за счет i -й емкости в цепи эмиттера;

K_j – число эмиттерных цепочек.

$$\Delta C_{p,\text{вхц}} = \frac{\tau_u}{C_{p1} \left(R_\Gamma + \frac{R_{\text{дел}} \cdot h_{11\varepsilon}}{R_{\text{дел}} + h_{11\varepsilon}} \right)} = \frac{\tau_u}{C_{p1} \left(R_\Gamma + \frac{R_{\text{дел}}}{1 + g_{11\varepsilon} R_{\text{дел}}} \right)},$$

где τ_u – длительность импульса.

$$\Delta C_{p2} = \Delta C_{p3} = \frac{\tau_u}{C_{p2} \left(R_k + \frac{R_{\text{дел.сл}} \cdot h_{11\text{эсл}}}{R_{\text{дел.сл}} + h_{11\text{эсл}}} \right)} = \frac{\tau_u}{C_{p2} \left(R_k + \frac{R_{\text{дел.сл}}}{1 + g_{11\text{с1}} R_{\text{дел.сл}}} \right)},$$

$$\Delta C_{\varepsilon 1} = \Delta C_{\varepsilon 2} = \frac{\tau_u \left(g_{21\varepsilon} + \frac{1}{h_{11\varepsilon}} \right)}{C_\varepsilon} = \frac{\tau_u (g_{21\varepsilon} + g_{11\varepsilon})}{C_\varepsilon}.$$

Если общий спад вершины импульса $\Delta_{\text{общ}}$ превышает величину заданного на усилитель спада $\Delta_{\text{зад}}$, возникает необходимость введения низкочастотной коррекции, используя цепь R_ϕ , C_ϕ . При этом задаются значением подъема вершины импульса на одну цепочку $R_\phi C_\phi - \Delta_\phi$:

$$\Delta_\phi = \frac{\Delta_{\text{общ}} - \Delta_{\text{зад}}}{n_{\text{кор}}},$$

где $n_{\text{кор}}$ – число корректирующих цепочек.

Рассчитывают емкость $C_{\phi i}$:

$$C_{\phi i} = \frac{\tau_k}{R_k \left(1 + g_{11} R_k + \frac{R_k}{R_{\text{дел.сл}}} \right) \Delta_{\phi i}}.$$

Расчет переходной характеристики предварительных каскадов ИУ в области переднего фронта рекомендуется произвести с использованием компьютерных программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войшвилло, Г. В. Усилительные устройства / Г. В. Войшвилло. – М. : Радио и связь, 1983. – 264 с.
2. Ногин, В. Н. Аналоговые электронные устройства / В. Н. Ногин. – М. : Радио и связь, 1982. – 304с.
3. Остапенко, Г. С. Усилительные устройства / Г. С. Остапенко. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.

Таблица 1. – Расчетные параметры устройства

Вариант	Выходная мощность P_n , Вт	Сопроотивление нагрузки R_n , Ом	Коэффициент гармоник $K_{гг}$, %	Полоса усиливаемых частот		Коэффициент частотных искажений		Источник сигнала (детектор приемника или микрофон)		Напряжение питания U , В
				$F_{нз}$ (Гц)	$F_{вз}$ (кГц)	$M_{нз}$ (дБ)	$M_{вз}$ (дБ)	E_c (В)	R_c (кОм)	
01	1	6	$\leq 0,5$	100	10	3	6	0,04	50	15
02	2	3	$\leq 1,6$	100	15	6	6	0,05	30	15
03	2,5	6	$\leq 1,5$	150	15	3	3	0,03	60	27
04	5	3	$\leq 2,5$	80	15	3	3	0,02	70	15
05	10	3	$\leq 1,5$	80	15	6	6	0,03	50	15+15
06	5	4	$\leq 2,4$	80	15	6	6	0,03	75	27
07	15	3	$\leq 1,3$	80	15	6	6	0,02	75	15+15
08	7	4	$\leq 1,5$	100	15	3	3	0,04	75	15+15
09	5	6	$\leq 1,5$	100	15	6	6	0,03	50	15+15
10	20	3	$\leq 1,6$	100	15	6	6	0,05	75	15+15
11	15	3	$\leq 1,6$	100	10	3	6	0,04	50	15+15
12	10	6	$\leq 1,6$	100	12	6	6	0,07	60	15+15
13	0,15	6	$\leq 0,6$	50	10	3	4	0,06	30	15
14	0,5	6	$\leq 1,5$	50	12	3	6	0,02	27	15
15	0,3	3	$\leq 0,5$	80	12	3	3	0,03	27	27
16	2,5	3	$\leq 1,5$	100	12	3	3	0,02	30	15+15
17	4	6	$\leq 1,4$	100	12	3	6	0,05	30	15+15
18	1	3	$\leq 0,4$	100	15	6	6	0,03	30	15+15
19	5	6	$\leq 1,4$	80	12	6	6	0,04	40	15+15
20	3	3	$\leq 1,5$	80	15	3	3	0,03	50	15+15
21	7	6	$\leq 2,4$	90	15	3	3	0,04	30	15+15
22	1	3	$\leq 1,3$	100	15	3	3	0,01	27	15+15
23	0,2	3	$\leq 1,3$	100	12	3	3	0,01	30	15+15
24	0,3	6	$\leq 1,6$	100	15	6	6	0,05	30	15
25	2,5	3	$\leq 0,6$	80	10	6	6	0,02	27	15+15
26	2	6	$\leq 0,3$	80	10	3	3	0,04	30	15+15
27	0,8	6	$\leq 2,3$	80	15	3	3	0,02	40	15
28	0,5	3	$\leq 2,3$	80	15	3	3	0,01	30	15
29	3	3	$\leq 1,3$	80	15	3	3	0,05	27	15+15
30	1	6	$\leq 0,6$	100	12	6	6	0,03	27	15

Рабочий диапазон температур от 0°C до +40°C.

При эскизном расчете усилителя необходимо составить структурную схему усилителя и принципиальную схему выходного каскада, выбрать усилительный прибор (приборы) и определить основные параметры выходного каскада и усилителя в целом.

При окончательном расчете усилителя определить номинал каждого элемента схемы, рассчитать схемы стабилизации рабочей точки, определить конструктивно-технологические параметры элементов схемы (трансформаторов, электролитических конденсаторов, мощных транзисторов, микросхем и т. д.).

При эскизном проектировании конструкции следует учитывать габаритно-массовые параметры элементов схемы.