

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

---

Кафедра радиотехнических устройств  
Ю.П.Сафоненков

**СХЕМОТЕХНИКА, часть 1**

**ПОСОБИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

для студентов всех форм обучения специальности

160905

Москва - 2007

ББК 6Ф2.12  
С21

Рецензент канд. техн. наук, доцент М.М.Шемаханов.

Сафоненков Ю.П.

С21 Схемотехника, часть 1. Пособие к выполнению курсовой работы.  
М.: МГТУ ГА, 2007, 48 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебной программой дисциплины СД05 «Схемотехника» по учебному плану специальности 160905 для студентов 3 курса всех форм обучения, утвержденному в 2001 г.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры РТУ 27.02.2007 г. и редакционно-издательского Совета ФАСК 13.03.2007 г.

Редактор Г.В. Токарева

---

Подписано в печать 03.05.07 г.

Печать офсетная  
2,98 усл. печ. л.

Формат 60x84x16  
Заказ № 321/318

2,79 уч.- изд. л.  
Тираж 300 экз.

---

*Московский государственный технический университет ГА*  
125993 Москва, Кронштадтский бульвар д.20  
*Редакционно-издательский отдел*  
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2007

## 1. ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью выполнения курсовой работы является закрепление и углубление знаний по аналого-дискретной схемотехнике и применение их для решения инженерных задач.

В процессе выполнения задания приобретаются навыки: работы с литературой, анализа, выбора, расчета схем (в том числе и с применением ЭВМ), составления технической документации, защиты результатов работы.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ И ТЕМЫ КУРСОВЫХ РАБОТ

Курсовая работа выполняется после проработки материалов курса, предусмотренных программой.

Задания выбираются из табл. 1 ... 4 по первой букве фамилии и двум последним цифрам номера студенческого билета. Задания на курсовую работу для студентов дневного обучения могут выдаваться индивидуально.

В таблицах приведены лишь основные исходные данные. Все необходимые дополнительные параметры выбираются или рассчитываются и обосновываются в процессе проектирования.

Таблица 1

Начальные буквы фамилии студента	Тип проектируемой схемы с источником питания
А...И	Усилитель звуковых частот (Табл. 2)
К...Р	Широкополосный усилитель (Табл. 3)
С...Я	Импульсный усилитель (Табл. 4)

Таблица 2

Исходные данные для расчета усилителя звуковых частот

Пр. цифра	$R_{\text{вых}}$ , Вт	$U_{\text{вых макс}}$ , В	$R_{\text{н}}$ , Ом	$K_{\Gamma}$ , %	Пос. цифра	$f_{\text{в}}$ , кГц	$f_{\text{н}}$ , Гц	$M_{\text{в}}$	$M_{\text{н}}$	$E_{\text{с макс}}$ , мВ	$R_{\text{с}}$ , кОм	Диап. раб. темп.	Исполнение
1	-	15	30	2	1	22	16	1.5	2.5	40	10	-10...+40	Биполярные и полевые транзисторы
2	10	-	8	4	2	4	100	2.5	1.5	30	68		
3	-	12	20	1	3	20	20	1.4	3	5	3		
4	8	-	14	5	4	16	50	1.6	1.2	6	5		
5	-	10	15	2.5	5	14	40	2	1.6	8	33		
6	5	-	12	0.8	6	10	22	1.8	1.4	20	0.2	-20...+50	Биполярные транзисторы и микросхемы
7	-	8	6	6	7	18	15	2.2	1.8	15	0.8		
8	2	-	4	2.5	8	8	200	1.2	1.3	10	0.5		
9	-	6	10	3	9	6	32	1.3	2	25	1		
0	1	-	5	0.5	0	25	30	3	2.2	2	39		

Таблица 3

Исходные данные для расчета широкополосного усилителя

Пр. цифра	$U_{\text{ВЫХ МАКС}}$ В	$C_{\text{Н}}$ пФ	$R_{\text{Н}}$ Ом	$K_{\Gamma}$ %	Пос. цифра	$f_{\text{В}}$ МГц	$f_{\text{Н}}$ Гц	$M_{\text{В}}$	$M_{\text{Н}}$	$E_{\text{С МАКС}}$ мВ	$R_{\text{С}}$ кОм	Диап. раб. темп.	Исполнение
1	14	-	300	4	1	4	70	2	2.5	35	1	-20... +50	Биполярные транзисторы и микросхемы
2	6	39	-	3	2	3.5	100	2.5	2	5	3		
3	8	-	75	6	3	1.2	55	2.2	1.5	12	1.5		
4	10	51	-	1	4	2	65	1.2	3	25	0.1		
5	9	-	100	2	5	2.5	25	1.5	2.2	6	0.3		
6	5	47	-	1.7	6	5	33	3	2	10	5	-10... +40	Биполярные и полевые транзисторы
7	11	-	60	1.5	7	3	80	1.6	3.5	20	8		
8	15	43	-	2.5	8	4.5	30	2.4	1.8	30	14		
9	12	-	150	5	9	1.5	50	3.5	3.5	8	12		
0	4	-	50	0.8	0	1.8	60	1.8	4	15	10		

Таблица 4

Исходные данные для расчета импульсного усилителя

Пр. цифра	$U_{\text{ВЫХ МАКС}}$ В	$C_{\text{Н}}$ пФ	$R_{\text{Н}}$ Ом	$T$ мс	Пос. цифра	$\tau_{\text{и}}$ мкс	$t_{\text{у}}$ нс	Вы-бр. $\delta$ , %	Спа д $\Delta$ , %	$E_{\text{С}}$ мВ	$R_{\text{С}}$ кОм	$C_{\text{С}}$ пФ	Диап. раб. темп.	Исполнение
1	6	100	-	10	1	20	250	3	1.2	35	5	47	-10... +40	Биполярные и полевые транзисторы
2	8	-	50	25	2	18	450	5	1.3	15	12	15		
3	10	75	-	4	3	14	200	3.5	1.6	10	8	10		
4	12	-	100	3	4	5	300	1.5	2.5	25	6	33		
5	15	62	-	1	5	20	350	2.5	2.2	12	10	22		
6	16	-	75	6	6	8	360	1.8	1	20	0.1	12	-20... +50	Биполярные транзисторы и микросхемы
7	18	47	-	50	7	15	280	2.2	3	30	3	6		
8	20	-	150	5	8	10	380	45	1.5	18	6	10		
9	25	33	-	15	9	30	220	6	1.8	45	1	8		
0	30	-	300	2	0	12	260	1.8	2	8	0.8	5		

По исходным данным должно быть рассчитано все устройство вместе с источником питания. Ссылки на типовые схемы включения, заменяющие расчет элементов и параметров, недопустимы. Каждый элемент, не входящий в состав микросхем, должен быть рассчитан.

Следует помнить, что паспортные данные микросхем гарантируются только для типовых схем включения.

Не рекомендуется применять операционные усилители для обработки импульсных и широкополосных сигналов из-за их неравномерной амплитудно-частотной характеристики при слабой обратной связи. Использование же глубокой обратной связи дает небольшие коэффициенты усиления, сравнимые с

коэффициентами усиления более простых, а, следовательно, и более дешевых микросхем.

Сигналы на входе импульсных усилителей полагают идеально прямоугольными с произвольной полярностью.

При выборе микросхем иногда бывает полезно воспользоваться известным соотношением между коэффициентом частотных искажений  $M_B$  на частоте  $f_B$  и временем установления  $t_y$ . Для однокаскадных схем с общим эмиттером и схем типа общий коллектор - общий эмиттер

$$t_y = 2.2 \cdot \sqrt{M_B^2 - 1} / (2 \cdot \pi \cdot f_B).$$

Как правило, в микросхемах не все каскады одинаково влияют на ход амплитудно-частотной характеристики. Поэтому данное соотношение также применимо для приближенной оценки переходных характеристик многокаскадных микросхем.

Конструктивные расчеты выполнять не нужно.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Курсовая работа представляется на рецензию в виде пояснительной записки объемом до 15...25 страниц текста, написанного, а, лучше всего, напечатанного на одной стороне стандартной писчей бумаги (формат А4), и электрической схемы, выполненной на чертежном листе формата А4 или А3 по ГОСТу 2.301-68 с рамкой и основной надписью по ГОСТу 2.104-68 (рис. 1).

Изм.	Кол.	№ докум.	Подпись	Дата				
Разработ.						Литера	Масса	Масштаб
Проверил								
Т. контр.								
Н. контр.						Лист	Листов	
Утвердил								

Рис. 1.

Графическая и текстовая документация должна выполняться с соблюдением правил ЕСКД. Общие требования к текстовым документам содержатся в ГОСТе 2.105-79, общие требования к выполнению схем – в ГОСТе 2.701-84, правила выполнения электрических схем – в ГОСТе 2.702-75.

Сведения из государственных стандартов обобщены и конкретизированы применительно к учебному процессу в стандартах МГТУ ГА СТП 113221-208-85 "Документы текстовые учебные" и СТП 113221-106-85 "Курсовое проектирование".

Электрорадиоэлементы необходимо выбирать с учетом существующих стандартов, ТУ, нормалей.

## 4. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 4.1. Оформление пояснительной записки

Изложение материала в пояснительной записке должно быть кратким, иметь своей задачей пояснение выполняемых действий и обоснование особенностей принимаемых решений. Не допускается изложение общеизвестных теоретических сведений.

Содержание пояснительной записки делят на разделы и подразделы.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего документа, обозначаемые арабскими цифрами с точкой.

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номера подразделов состоят из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце подраздела также должна ставиться точка.

Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов.

Если документ имеет подразделы, то нумерация пунктов должна быть в пределах подраздела, а номер пункта должен состоять из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точками.

Пункты при необходимости могут быть разбиты на подпункты, которые должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого пункта, например, 4.2.1.1., 4.2.1.2., 4.2.1.3. и т.д.

Содержащееся в тексте пункта или подпункта перечисление требований, указаний, положений обозначают арабскими цифрами со скобкой, например: 1), 2), 3) и т.д.

Каждый пункт, подпункт и перечисление записывают с абзаца.

Наименование разделов и подразделов должны быть краткими. Наименование разделов записывают в виде заголовков (симметрично тексту) прописными буквами. Наименование подразделов записывают в виде заголовков (с абзаца) строчными буквами (кроме первой прописной).

Переносы слов в заголовках не разрешаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Первый (заглавный) после титульного лист должен иметь рамку и основную надпись, выполненную по форме 2 из ГОСТа 2.104-68 (рис. 2).

Нумерация страниц начинается с первого (заглавного) после титульного листа. Титульный лист в нумерацию страниц не включают.

Изм.	Кол.	№ докум.	Подпись	Дата			
Разработ.					Литера	Лист	Листов
Проверил							
Н. контр.							
Утвердил							

Рис. 2.

Все последующие листы пояснительной записки (исключая находящиеся в приложениях самостоятельные документы) должны иметь рамки и основные надписи, выполненные по форме 2а, указанной в упомянутом выше документе (рис. 3).

								Лист
Изм.	Кол.	№ докум.	Подпись	Дата				

Рис. 3.

В пояснительной записке на первом (заглавном) и при необходимости на последующих листах помещают содержание, включающее номера и наименование разделов и подразделов с указанием номеров листов (страниц).

Слово "СОДЕРЖАНИЕ" записывают в виде заголовка (симметрично тексту) прописными буквами, например,

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ .....	
2.	ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ .....	
2.1.	Определение числа каскадов, распределение усиления и других параметров по каскадам .....	
2.2.	Выбор активных элементов.....	
2.3.	Составление структурной схемы усилителя .....	
2.4.	Распределение искажений .....	
3.	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ .....	
3.1.	Расчет выходного каскада .....	
3.2.	Расчет промежуточных каскадов .....	
3.3.	Расчет входного каскада и входной цепи .....	
4.	ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЯ .....	
5.	РАСЧЕТ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ .....	
	Литература .....	
	Схема принципиальная электрическая .....	
	Перечень элементов .....	

Справа от содержания указывают порядковые номера страниц, на которых излагается материал разделов и подразделов.

В начале текста пояснительной записки помещают задание на курсовую работу с указанием номера варианта.

Во введении должна быть сформулирована задача проектирования и намечены пути ее решения. Здесь следует указать особенности разрабатываемого устройства, сравнить его с аналогами, показать, как его параметры отвечают требованиям руководящих документов ГА.

При написании текста следует обращать внимание на последовательность изложения, т.е. последующий материал должен строиться на базе предыдущего.

В документе должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии - общепринятые в научно-технической литературе.

Наименования, приводимые в тексте, на схемах и на иллюстрациях, должны быть одинаковыми.

В конце пояснительной записки приводят список литературы, которая была использована при выполнении курсовой работы. Выполнение списка и ссылки на него в тексте должны соответствовать ГОСТу 7.32-81. Список литературы включают в содержание пояснительной записки.

В тексте пояснительной записки не допускается:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;

- сокращать обозначения физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением единиц и величин в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы;

- применять сокращения слов, кроме установленных правилами орфографии, пунктуации, а также соответствующих государственным стандартам (например, ГОСТу 2.316-68);

- использовать в тексте математический знак минус (–) перед отрицательными значениями величин. Вместо математического знака (–) следует писать слово "минус";

- употреблять математические знаки без цифр, например,  $\leq$  (меньше или равно),  $\geq$  (больше или равно),  $\neq$  (не равно), № (номер), % (процент);

- применять индексы стандартов (ГОСТ, ОСТ, РСТ, СТП и т.п.) без регистрационного номера.

Условные буквенные обозначения величин, а также условные графические обозначения должны соответствовать установленным государственным стандартам. В сокращенных написаниях физических величин, названных именами (фамилиями) ученых, буква, соответствующая начальной букве имени (фамилии), должна быть заглавной, например, Ом, А, Вт, кГц и т. д. В тексте документа перед обозначением параметра дают его пояснение.



В тексте документа числа с размерностью следует писать цифрами, а без размерности – словами.

Единица физической величины одного и того же параметра в пределах документа должна быть постоянной.

Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, должны быть приведены непосредственно перед формулой. Значения каждого символа дают с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова "где" без двоеточия после него.

Расчеты по формулам необходимо производить в следующем порядке: обозначение физической величины, знак равенства, буквенное написание формулы, знак равенства, подстановка числовых значений без преобразований, знак равенства, результат вычисления с указанием размерности без скобок.

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста. В тексте разделов или подразделов необходимо помещать выборочные схемы рассчитываемых узлов, соответствующие графики и таблицы.

Ссылки на графики, имеющиеся в литературе и используемые для расчетов, недопустимы. Графики обязательно должны быть помещены в пояснительной записке и на них необходимо отметить значения величин, используемые в расчетах.

Все иллюстрации нумеруют в пределах раздела арабскими цифрами. Номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой, например: рис. 1.1., рис. 1.2. Ссылки на иллюстрации делают по типу "рис. 1.1." или "рис. 1.2.". Ссылки на ранее упомянутые иллюстрации дают с сокращенным словом "смотри", например, "см. рис. 3.2."

Допускается нумерация иллюстраций в пределах всего документа. Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и поясняющие данные (подрисуночный текст). Наименование помещают над иллюстрацией, поясняющие данные – под ней. Номер иллюстрации дают ниже поясняющих данных.

На приводимых в документе электрических схемах около каждого элемента указывают его позиционное обозначение, установленное ГОСТом 2.710-81, а при необходимости – номинальное значение величины.

Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблицы.

Таблица может иметь заголовок, который следует выполнять строчными буквами (кроме первой заглавной) и помещать над таблицей посередине. Заголовок должен быть кратким и полностью отражать содержание таблицы.

Заголовки граф таблицы начинают с прописных букв, а подзаголовки – со строчных, если они составляют одно предложение с заголовком. Подзаголовки, имеющие самостоятельное значение, пишут с прописной буквы. В конце заголовков и подзаголовков таблиц знаки препинания не ставят. Название заголовков указывают в единственном числе.

Диагональное деление головки таблицы не допускается.

Высота строк таблицы должна быть не более 8 мм.

Таблицы, если их несколько, должны быть пронумерованы арабскими цифрами в пределах всей работы (например, табл. 1).

Графу "№ п/п" в таблицу не включают. При необходимости нумерации показателей, параметров или других данных порядковые номера указывают в боковике таблицы перед их наименованием.

#### 4.2. Оформление структурной схемы

На структурной схеме изображают все основные функциональные части разрабатываемого устройства и показывают основные взаимосвязи между ними. Функциональные части на схеме изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений по ГОСТу 2.737-74.

Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей. На линиях взаимосвязей рекомендуется стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в разрабатываемом изделии.

Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках.

#### 4.3. Оформление принципиальной электрической схемы

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов и все электрические связи между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т.д.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Схемы вычерчиваются, как правило, для изделий, находящихся в отключенном состоянии.

Элементы изображают в виде условных графических обозначений, установленных стандартами ЕСКД.

При вычерчивании схем, насыщенных условными графическими обозначениями, разрешается все обозначения пропорционально уменьшать.

Для упрощения схемы допускается несколько электрически не связанных линий связи сливать в общую линию, но при подходе к контактам (элементам) каждую линию связи изображают отдельно.

При слиянии линий связи каждую линию помечают в месте слияния, а при необходимости и на обоих концах, условными обозначениями (цифрами, буквами или сочетаниями букв и цифр).

Характеристики входных и выходных цепей разрабатываемого устройства, а также адреса внешних подключений, рекомендуется записывать в таблицы, помещенные взамен условных графических обозначений входных и выходных элементов – разъемов, плат и т. д.

Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен условного графического обозначения которого она помещена.

Каждый элемент или устройство, входящие в изделие и изображенные на схеме, должны иметь позиционные обозначения в соответствии с требованиями ГОСТа 2.710-81.

Позиционные обозначения элементам (устройствам) следует присваивать в пределах изделия.

Порядковые номера элементам (устройствам) следует присваивать, начиная с единицы в пределах группы элементов (устройств), которым на схеме дано одинаковое буквенное позиционное обозначение, например, R1, R2, R3 и т. д.

Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо.

Позиционное обозначение проставляют на схеме рядом с условным графическим обозначением элементов и (или) устройств с правой стороны или над ними.

При изображении на схеме элемента или устройства разнесенным способом (например, независимых частей микросхемы) позиционное обозначение элемента или устройства проставляют около каждой составной части с добавлением номера этой части (например, DA 3.1, DA 3.2 и т. д.).

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы, входящие в состав изделия и изображенные на схеме.

Данные обо всех элементах, изображенных на схеме, должны быть записаны в перечень элементов. При этом связь перечня с условными графическими обозначениями элементов должна осуществляться через позиционные обозначения.

#### 4.4. Оформление перечня элементов

Перечень элементов располагают на схеме или выполняют в виде самостоятельного документа, помещаемого в приложении пояснительной записки.

Если перечень элементов помещают на схеме, то его располагают, как правило, над основной надписью.

Перечень элементов оформляют в виде таблицы (рис. 4).

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
20	110	10	
	185		

Рис. 4.

Расстояние между перечнем элементов и основной надписью должно быть не менее 12 мм.

Продолжение перечня элементов помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы.

Перечень элементов в виде самостоятельного документа выполняют на формате А4. Основную надпись и дополнительные графы к ней выполняют по ГОСТу 2.104-68 (см. рис. 2 и рис. 3).

В графах перечня указывают следующие данные:

- в графе "Поз. обозначение" – позиционное обозначение элемента, устройства или функциональной группы;

- в графе "Наименование" – наименование элемента (устройства) в соответствии с документом, на основании которого этот элемент (устройство) применен, и обозначение этого документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия).

При необходимости указания технических данных элемента, не содержащихся в его наименовании, эти данные рекомендуется указывать в графе "Примечание".

Элементы в перечень записывают группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений.

В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров.

Элементы одного типа с одинаковыми электрическими параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, допускается записывать в перечень в одну строку. В этом случае в графу "Поз. обозначение" вписывают только позиционные обозначения с наименьшим и наибольшим порядковыми номерами, например, R3, R4 или С8...С12, а в графу "Кол." – общее количество таких элементов.

При записи элементов, имеющих одинаковую первую часть позиционных обозначений, допускается:

- записывать наименование элементов в графе "Наименование" в виде общего наименования (заголовка) один раз на каждом листе перечня;

- записывать в общем наименовании (заголовке) обозначение документов, на основании которых эти элементы применены.

Если позиционные обозначения присвоены элементам в пределах устройств или в изделие входят одинаковые функциональные группы, то элементы, относящиеся к устройствам и функциональным группам, записываются в перечень отдельно.

Запись элементов, входящих в каждое устройство (функциональную группу), начинают с соответствующего заголовка. Заголовок записывают в графе "Наименование" и подчеркивают.

Если в изделии имеются элементы, не входящие в устройства (функциональные группы), то при заполнении перечня вначале записывают эти элементы без заголовка.

#### 4.5. Оформление расчетов на ЭВМ

Хотя бы часть работы должна быть выполнена на ЭВМ. Задача, выносящаяся на проектирование с помощью ЭВМ, выбирается студентом самостоятельно и при необходимости согласовывается с преподавателем. Для проектирования может использоваться электронная книга, имеющаяся на кафедре.

Рекомендуется выбирать задачи на оптимизацию параметров, аппроксимацию зависимостей, применение программных средств САПР по моделированию процессов в схемах, логическому проектированию, составлению документации и т. п.

Работа должна содержать пояснения к составлению программы или расчетам, выполненным с использованием прикладных программ, список констант и переменных, принятых в расчете, выводы по полученным результатам. Графические зависимости должны быть изображены в удобном для чтения масштабе, и позволять использовать для расчетов не менее 8 ... 10 точек.

Рекомендуемые программные средства: MathCad, Micro-Cap, Multisim (Electronics Workbench), ([3]).

### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Процесс проектирования устройства складывается из нескольких этапов, основными из которых являются:

- подбор и изучение литературы;
- определение и обоснование технических требований к разрабатываемому устройству, исходя из задания на курсовую работу и анализа аппаратуры аналогичного назначения, применяемой в гражданской авиации;
- предварительный расчет устройства и составление его структурной схемы;
- покаскадный электрический расчет элементов схемы;
- определение задач, решаемых на ЭВМ, и составление блок-схем расчетов;
- расчеты на ЭВМ;
- расчет результирующих характеристик устройства и сравнение их с заданными;
- составление принципиальной электрической схемы с перечнем элементов;
- оформление работы и ее защита.

#### 5.1. Предварительный расчет

Целью предварительного расчета является ориентировочное определение состава схемы и ожидаемых ее характеристик, а также выработка требований и исходных данных к расчету отдельных каскадов.

Предварительный расчет проектируемого устройства следует начинать с задания числа каскадов схемы на основе распределения общего усиления устройства, учета особенностей каскадов и возлагаемых на них функций. При этом

обосновывают способ включения, тип усилительных элементов и класс усиления каскадов.

Прежде всего, решают вопрос о схеме оконечного каскада, зависящей от выходной мощности, частотного диапазона, характера нагрузки, уровня частотных и нелинейных искажений, и схеме первого каскада, определяемой данными источника сигналов.

При усилении гармонических и двухполярных импульсных сигналов каскады малой мощности (средняя мощность выходного сигнала  $P_{\text{вых}} < (1...2) \text{ Вт}$ ) обычно выполняют по одноконтурной схеме, работающей в режиме класса А. Усиление однополярных импульсов может быть осуществлено каскадом, работающим в классе В, таким образом, чтобы он открывался проходящим сигналом.

Для получения больших мощностей в нагрузке с целью увеличения КПД желательно применение двухконтурных схем, работающих в режимах класса В или АВ. На входы двухконтурных схем нужно обеспечить подачу сигнала так, чтобы каждая из половин каскада (плеч) могла работать от разных его полу-волн. Это достигается применением согласующих трансформаторов, каскадов с разделенной нагрузкой, дифференциальных каскадов или каскадов с транзисторами различного типа проводимости (комплементарными транзисторами).

Если диапазон усиливаемых частот не очень широк (от десятков Герц до 10...14 кГц, т. е. отношение верхней  $f_{\text{в}}$  и нижней  $f_{\text{н}}$  граничных частот не выше 800), то в усилителе возможно применение согласующих трансформаторов. Это дает возможность получить максимальное усиление на каскад, позволяет уменьшить общее число каскадов и упростить схему.

При отсутствии особых соображений в выходных (а также и в промежуточных каскадах) предпочтительно использовать биполярные транзисторы, имеющие по сравнению с полевыми транзисторами большую крутизну, а, следовательно, и лучшее усиление.

С уменьшением сопротивления нагрузки (ориентировочно ниже (100...200) Ом) потери на выходном сопротивлении каскада растут, и они будут наименьшими у тех схем, которые обладают низким выходным сопротивлением. Среди них следует упомянуть каскады, где одиночный транзистор или составные транзисторы, соединенные по схеме Дарлингтона, включены с общим коллектором, схемы с обратной связью по напряжению, схемы с использованием трансформаторов. Им и следует отдать предпочтение в данной ситуации. При емкостной нагрузке схему с общим коллектором не используют из-за ее склонности к самовозбуждению.

Надо также учитывать, что наибольшими нелинейными искажениями обладает схема с общим эмиттером (в два - три раза выше, чем у схемы с общей базой и общим коллектором). Ориентировочное значение коэффициента гармоник для этого включения можно принять на уровне (6 ... 8)%.

Так как нелинейные искажения сильно зависят от амплитуды выходного напряжения, то в маломощных каскадах они невелики и их обычно не учитывают.

Если выбранный способ включения усилительного элемента обеспечивает коэффициент гармоник и  $K_{Г'}$  он будет больше заданного  $K_{Г}$ , то в усилитель вводится обратная связь с глубиной:

$$K_{Oc} = K_{Г'} / K_{Г}; \quad K_{Oc \text{ дБ}} = 20 \cdot \lg(K_{Oc}).$$

Кроме нелинейных искажений каждый каскад вносит линейные искажения, связанные с неравномерностью амплитудно-частотных характеристик за счет действия реактивных элементов в схеме. Эти искажения могут быть до некоторой степени скомпенсированы введением корректирующих цепей, а на высоких частотах – еще и выбором малых сопротивлений нагрузки. Именно по этой причине усиление каскадов импульсных и широкополосных усилителей примерно на (3...10) дБ меньше, чем у низкочастотных.

Необходимость введения в усилитель схем высокочастотной коррекции оценивают коэффициентом коррекции ([5] с.117)

$$K_{К} = 0.7 \cdot f_{Т} / (h_{21Э} \cdot f_{В}) \quad \text{или} \quad K_{К} = 2 \cdot f_{Т} \cdot t_{у} / h_{21Э},$$

где  $f_{Т}$  - критическая (или граничная) частота транзистора, предполагаемого к использованию в каскаде,

$f_{В}$  - верхняя рабочая частота,

$t_{у}$  - время установления импульса, отведенное на каскад,

$h_{21Э}$  - коэффициент усиления тока для транзистора с общим эмиттером.

Критическую частоту находят по справочным данным коэффициента усиления по току биполярного транзистора  $|B|_f$  на высокой частоте  $f$

$$f_{Т} = |B|_f \cdot f.$$

Она должна удовлетворять условию [4] с.70

$$f_{Т} = (20...50) f_{В}; \quad f_{Т} = (2...5) / t_{у}.$$

В схемах широкополосных и импульсных усилителей с полевыми транзисторами применение индуктивной частотной коррекции желательно, так как позволяет увеличить усиление каскада, которое в связи с малым значением крутизны транзистора невелико. Этому также способствует выбор следующего каскада с повышенным входным сопротивлением.

Если коэффициент коррекции оказался меньше единицы, то в каскаде необходимо применить схему высокочастотной коррекции. При  $K_{К} \geq 1$  ее применение не обязательно, но может дать выигрыш в усилении.

Схемы низкочастотной коррекции применяют реже и только в тех случаях, когда величины конденсаторов в цепях межкаскадной связи и термостабилизации оказываются чрезмерно большими.

Транзистор в схеме должен выбираться не только по частотным свойствам. Нужно, чтобы максимальные значения токов, напряжений, импульсной и средней мощности, действующие в схеме, не превышали допустимых для него значений. Не рекомендуется выбирать ток покоя транзистора менее одного миллиампера, так как при малых токах падает  $h_{21э}$  и ухудшается стабильность положения точки покоя (рабочей точки). Нельзя использовать мощные транзисторы в маломощных каскадах из-за малых входных и выходных сопротивлений, больших межэлектродных емкостей и больших неуправляемых токов.

Граница зоны неуправляемых токов может быть найдена из соотношения

$$I_{ну} = (0.01 \dots 0.05) \cdot I_{к \text{ макс доп}},$$

где  $I_{к \text{ макс доп}}$  - максимально допустимый ток через транзистор. При работе каскада сигнал не должен заходить в зону неуправляемых токов, так как это приведет к появлению нелинейных искажений.

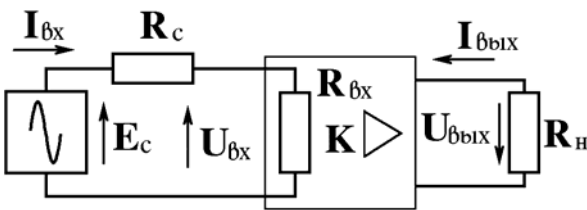


Рис. 5

Выбирая схему включения транзистора первого каскада, необходимо учитывать, что во входной цепи происходят потери мощности на внутреннем сопротивлении источника сигнала  $R_c$  (рис. 5).

Для уменьшения этих потерь надо строить схему так, чтобы ее входное сопротивление  $R_{вх}$  было не менее внутреннего сопротивления источника сигналов  $R_c$ . При этом коэффициент передачи входной цепи будет равен:

$$\alpha = R_{вх} / (R_{вх} + R_c); \quad \alpha_{дБ} = 20 \cdot \lg(\alpha).$$

Таким образом, если  $R_c > (1...3) \text{ кОм}$ , то в качестве первого каскада используют схемы, обладающие повышенным входным сопротивлением:

- 1) эмиттерный повторитель,
- 2) схему с полевым транзистором, включенным с общим истоком или стоком,
- 3) схему Дарлингтона,
- 4) схему с общим эмиттером и последовательной по току отрицательной обратной связью.

Ориентировочно в предварительных расчетах входной цепи принимают для схем с общим эмиттером  $R_{вх} = (300...500) \text{ Ом}$ , а для схем с общим коллектором  $R_{вх} = (5...10) \text{ кОм}$ .

Если принято решение о видах каскадов в схеме, то затем решают вопрос о количестве промежуточных каскадов, которые обычно полагают однотипными. Нужно определить усиление, приходящееся на эти каскады. Для этого вычисля-



ют общее усиление устройства путем деления выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  на входное  $U_{\text{ВХ}}$

$$K_{\text{Общ}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} ; \quad K_{\text{Общ дБ}} = 20 \cdot \lg ( K_{\text{Общ}} ).$$

Затем находят ориентировочное усиление первого  $K_1$  дБ, окончного  $K_{\text{Ок}}$  дБ и промежуточных каскадов  $K_{\text{Пр}}$  дБ по табл. 5.

Таблица 5

Тип каскада	Включение транзистора	Усиление по напряжению (в дБ)
Оконечный резисторный	ОЭ	15 ... 25
	ОИ	10...15
	ОК	-2...-3
	ОС	-0.5...-1
Оконечный трансформаторный	ОЭ	25...35
	ОИ	15...25
	ОК	-1...-2
	ОС	0...-1
	ОБ	12...15
Предварительный резисторный	ОЭ	20...30
	ОИ	15...20
	ОК	-2...-3
	ОС	-0.5...-1
Фазоинверсный с разделенной нагрузкой	-	-3...-5
Предварительный трансформаторный	ОЭ	30...40
	ОИ	20...30
Входная цепь в режиме согласования сопротивлений	-	-3

Число каскадов  $n$  предварительного усиления определяют в соответствии с формулой

$$n = \frac{K_{\text{Общ дБ}} - \alpha_{\text{дБ}} - K_{\text{Ок дБ}} - K_1 \text{ дБ} + K_{\text{Ос дБ}} - K_{\text{к вых дБ}} - K_{\text{к 1 дБ}}}{K_{\text{Пр дБ}} + K_{\text{к пр дБ}}},$$

где  $K_{\text{к 1 дБ}}$ ,  $K_{\text{к пр дБ}}$ ,  $K_{\text{к вых дБ}}$  – коэффициенты коррекции первого, предварительных и выходного каскадов, если коэффициент коррекции оказался меньше единицы (т. е. в децибелах отрицателен).

Полученное значение  $n$  округляют до большего ближайшего целого числа.

Составив принципиальную электрическую схему усилителя, надо затем распределить допущенные на все устройство частотные, переходные и нелинейные искажения. Лучше всего это делать сразу, задавая на отдельные элементы те искажения, которые они могут вносить.

Известно, что низкочастотные искажения (и связанные с ними искажения плоской вершины импульсов) вносят емкости связи, емкости в цепях эмиттерной или истоковой термостабилизации, индуктивности первичных обмоток трансформаторов.

Высокочастотные искажения (искажения фронтов импульсов и выбросы) обусловлены действием внутренних емкостей транзисторов и индуктивностей рассеяния трансформаторов.

Следует иметь в виду, что внутри каскада наибольшее влияние на частотные и переходные искажения оказывает трансформатор и емкость в цепи термостабилизации. Выходные каскады, как правило, вносят большие частотные искажения по сравнению с каскадами предварительного усиления. При этом следует исходить из того, что не менее половины (в децибелах) от частотных искажений вносится последним по схеме каскадом с общим эмиттером (источком).

Частотные искажения, создаваемые реактивными элементами усилителя и выраженные в децибелах, арифметически складываются. Этим объясняется удобство их использования, так как выраженные в относительных значениях частотные искажения перемножаются.

Поэтому проще всего распределять частотные искажения, если выразить коэффициенты частотных искажений на нижних  $M_H$  и верхних  $M_B$  частотах в децибелах

$$M_{H \text{ дБ}} = 20 \cdot \lg M_H \quad \text{и} \quad M_{B \text{ дБ}} = 20 \cdot \lg M_B.$$

Тогда

$$M_{H \text{ дБ}} = M_{H1 \text{ дБ}} + \dots + M_{Hi-1 \text{ дБ}} + M_{Hi \text{ дБ}},$$

$$M_{B \text{ дБ}} = M_{B1 \text{ дБ}} + \dots + M_{Bj-1 \text{ дБ}} + M_{Bj \text{ дБ}},$$

где  $M_{H1 \text{ дБ}} \dots M_{Hi-1 \text{ дБ}}, M_{Hi \text{ дБ}}$  – частотные искажения, отведенные на элементы, вносящие эти искажения на низких частотах,

$M_{B1 \text{ дБ}} \dots M_{Bj-1 \text{ дБ}}, M_{Bj \text{ дБ}}$  – частотные искажения, отведенные на элементы, вносящие эти искажения на высоких частотах.

Распределив частотные искажения, нужно вновь перейти к линейным значениям

$$M_{Hi} = 10^{\frac{M_{Hi \text{ дБ}}}{20}}, \quad M_{Bj} = 10^{\frac{M_{Bj \text{ дБ}}}{20}},$$

которые и следует подставлять в расчетные формулы. Полученные результаты удобно записывать в виде таблицы (табл. 6).

Таблица 6

Элемент	НЧ искажения		ВЧ искажения	
	$M_{Hi}$	$M_{Hi \text{ дБ}}$	$M_{Bj}$	$M_{Bj \text{ дБ}}$
.....	.....	.....	.....	.....

Аналогично распределяют переходные искажения в соответствии с выражениями

$$\Delta_{\text{общ}} = \Delta_1 + \dots + \Delta_{i-1} + \Delta_i,$$

$$t_{y \text{ общ}} = \sqrt{t_{y1}^2 + \dots + t_{yj-1}^2 + t_{yj}^2},$$

$$\delta_{\text{общ}} = \sqrt{\delta_1^2 + \dots + \delta_{j-1}^2 + \delta_j^2},$$

где  $\Delta_{\text{общ}}$ ,  $t_{y \text{ общ}}$ ,  $\delta_{\text{общ}}$  – спад плоской вершины, время установления и выброс усилителя,

$\Delta_1, \Delta_{i-1}, \Delta_i$  – спады плоской вершины, обусловленные влиянием  $i$ -ых элементов,

$t_{y 1}, t_{y j-1}, t_{y j}$ ,

$\delta_1, \delta_{j-1}, \delta_j$  – времена установления и выбросы от влияния  $j$ -ых элементов.

Результаты оформляют в виде таблицы (табл.7).

Таблица 7

Элемент	$\Delta_i$	$t_{y j}$	$\delta_j$
.....	...	...	...

Так как в импульсном усилителе наибольшие переходные искажения вносит, как правило, оконечный каскад, то на него отводят большую часть из общих искажений. При этом надо учитывать, что если, например, взять время установления оконечного каскада  $t_{y \text{ ок}} = 0.8 \cdot t_{y \text{ общ}}$ , то, в силу приведенных выше соотношений, на остальные каскады будет приходиться  $t_{y \text{ ост}} = 0.6 \cdot t_{y \text{ общ}}$ . При больших сопротивлениях источника сигналов на время установления или полосу пропускания по высоким частотам может существенно влиять входная цепь усилителя.

Если оконечный каскад выполнен по схеме с общим эмиттером (или общим истоком), то все нелинейные искажения отводят на этот каскад. В тех случаях, когда предоконечный каскад вносит значительные нелинейные искажения (например, если он находится перед эмиттерным повторителем), то приходится распределять нелинейные искажения между оконечным и предоконечным каскадами. При этом общие нелинейные искажения усилителя  $K_{Г \text{ ус}}$  вычисляют по формуле:

$$K_{Г \text{ ус}} = \sqrt{K_{Г2\text{ус}}^2 + K_{Г3\text{ус}}^2 + K_{Г4\text{ус}}^2},$$

где  $K_{Г \text{ ус}}$ ,  $K_{Г2\text{ус}}$ ,  $K_{Г3\text{ус}}$ ,  $K_{Г4\text{ус}}$  – коэффициенты гармоник всего усилителя и его коэффициенты гармоник по второй, третьей и четвертой гармоникам, определяемые из соотношений:

$$K_{Г2\text{ус}} = K_{Г2'} + K_{Г2''}, \quad K_{Г3\text{ус}} = K_{Г3'} + K_{Г3''}, \quad K_{Г4\text{ус}} = K_{Г4'} + K_{Г4''}.$$

Здесь буквами со штрихами обозначены коэффициенты гармоник по второй, третьей, четвертой гармоникам первого и второго каскадов, вносящих заметные нелинейные искажения.

Предпочтительно так проектировать усилитель, чтобы он имел один источник питания. Напряжение источника питания  $E$  зависит от максимального значения выходного сигнала и схемы оконечного каскада.

Если в качестве выходного используется трансформаторный каскад, то

$$E = (0.3...0.4) \cdot U_{\text{макс доп}},$$

где  $U_{\text{макс доп}}$  – максимально допустимое напряжение между выходными электродами выбранного транзистора.

В остальных случаях  $E < 0.8 \cdot U_{\text{макс доп}}$ , причем величину  $E$  определяют, учитывая вид усиливаемых сигналов и способ связи с нагрузкой.

Если допустима постоянная составляющая на выходе усилителя (что не всегда желательно), то ([5], с. 144):

$$E = (2.2 \dots 3) \cdot U_{\text{ВЫХ М}} \quad \text{– для гармонических сигналов;}$$

$E = (1.1 \dots 1.5) \cdot U_{\text{ВЫХ ОБЩ}}$  – для двухполярных импульсных сигналов с общей амплитудой  $U_{\text{ВЫХ ОБЩ}}$ ;

$$E = (1.2 \dots 1.8) \cdot U_{\text{ВЫХ М}} \quad \text{– для однополярных импульсных сигналов,}$$

где  $U_{\text{ВЫХ М}}$  – максимальное значение сигнала на выходе усилителя.

Для гармонических сигналов оно связано со средним значением  $U_{\text{ВЫХ}}$  известным соотношением

$$U_{\text{ВЫХ М}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ВЫХ}}.$$

Величина коэффициента при  $U_{\text{ВЫХ М}}$  выбирается тем большей, чем больше интервал рабочих температур.

Если постоянная составляющая на выходе недопустима, то

$$E = (4 \dots 8) \cdot U_{\text{ВЫХ М}} \quad \text{– для гармонических сигналов;}$$

$$E = (2 \dots 4) \cdot U_{\text{ВЫХ М}} \quad \text{– для импульсных сигналов.}$$

В маломощных каскадах напряжение питания не критично, однако его не следует брать менее (1.5 ... 3) В. Кроме того, для увеличения устойчивости в цепи питания этих каскадов надо устанавливать элементы фильтрации питающих напряжений.

Итогом предварительного расчета является составление уточненной схемы с заданием всех исходных данных для покаскадного электрического расчета проектируемого устройства.

## 5.2. Электрический расчет каскадов

### 5.2.1. Определение величины нагрузочного сопротивления

От величины сопротивления нагрузки зависит не только выходная мощность каскадов, их усиление, но и частотные и переходные характеристики. Поэтому определение величины нагрузочного сопротивления является важной и ответственной частью расчета каждого каскада. Конечно, для выходного каскада оно может быть задано техническими требованиями на разрабатываемое устройство. Но тогда надо считаться с тем, что усиление каскада не обязательно будет максимальным при требуемой полосе пропускания усилителя.

Для резисторного каскада сопротивлением нагрузки  $R_0$  по переменному току является параллельное соединение входного сопротивления последующе-

го каскада (нагрузки) и коллекторного (стокового, эмиттерного, истокового в зависимости от схемы включения и типа усилительного прибора) сопротивления. В частном случае, например, для биполярного транзистора с емкостной нагрузкой без разделительного конденсатора, включенного по схеме с общим эмиттером,  $R_0 = R_K$ , а с разделительным конденсатором  $R_0 = R_K \cdot R_0 / (R_K + R_0)$ .

В каскадах с общим коллектором (общим стоком) сопротивление  $R_K$  обычно не включают, причем схемы с общим стоком и общим затвором используются редко. Каскад с общей базой, хотя имеет неплохие характеристики, трудно сочетается с соседними цепями из-за низкого входного сопротивления. Этот недостаток не имеет решающего значения только в трансформаторных схемах, которые обладают свойством согласования сопротивлений.

Сопротивление нагрузки трансформатора переменному току зависит от требуемой мощности  $P_0 = P_{\text{ВЫХ}} / \eta_{\text{ТР}}$  в нагрузке

$$R_0 = 0.5 \cdot U_0^2 / P_0 .$$

где напряжение в рабочей точке  $U_0 = (0.35 \dots 0.4) \cdot U_{\text{макс доп}}$ .

КПД трансформатора  $\eta_{\text{ТР}}$  выбирают по выходной мощности сигнала, действующей в нагрузке, в соответствии с табл. 8 ([8], с.44).

Таблица 8

$P_H$ , Вт	Стационарные установки большой продолжительности работы	Портативные установки с малой продолжительностью работы
до 1	0.7...0.8	0.6...0.75
1...10	0.75...0.85	0.7...0.8
10...100	0.84...0.93	0.75...0.85

В усилителях звуковых (низких) частот величину коллекторного  $R_K$  (или в схеме с общим коллектором эмиттерного  $R_э$ ) сопротивления, как правило, рассчитывают из условия получения максимального усиления, так как частотные характеристики у этого типа усилителей имеют обычно значительный запас и удовлетворяют разработчика. Падение напряжения на транзисторе в точке покоя выбирают как

$$U_0 = (0.4 \dots 0.45) \cdot E$$

в схемах с общим эмиттером (истоком), общей базой (затвором) или

$$U_0 = 0.5 \cdot E$$

в схеме с общим коллектором.

Величину  $R_K$  (или  $R_{СТ}$ ), а также величину  $R_э$  (или  $R_{И}$ ) находят по падению напряжения в точке покоя и току  $I_{\text{ВЫХ}}$ , потребляемому нагрузкой, с учетом отщепления части тока в резисторы  $R_K$  (или  $R_э$ ). В любой схеме выходной ток  $I_{\text{ВЫХ}}$  и, в зависимости от способа включения по переменному току, величина

коллекторной или эмиттерной (стоковой или истоковой) нагрузки  $R_H$  определяется необходимым для последующих каскадов током  $I_H$ , причем, как правило,

$$I_{\text{ВЫХ}} = (1.4 \dots 1.7) \cdot I_H.$$

В широкополосных и импульсных усилителях каскад должен не только обеспечивать требуемый выходной ток, но и обладать заданными частотными свойствами или ожидаемыми переходными характеристиками, зависящими от выбора постоянной времени каскада на высоких частотах и схемы коррекции частотных характеристик.

На рис. 6 показаны обобщенные частотные характеристики каскада (рис. 7) с параллельной индуктивной высокочастотной коррекцией.

$$K(X) = \sqrt{(1 + b^2 \cdot X^2) / [1 + (1 - 2 \cdot b) \cdot X^2 + b^2 \cdot X^4]},$$

где  $b = L / (R_K^2 \cdot C_0)$  – коэффициент высокочастотной коррекции (не путать с коэффициентом коррекции, найденным ранее). Выбор его влияет на ход частотных характеристик.

На рис. 8 изображены аналогичные характеристики ([7] с. 150) для схемы (рис. 9) с эмиттерной корректирующей емкостью

$$K(X) = \sqrt{\{[(1+X^2 \cdot b \cdot \gamma) + (b \cdot \gamma - 1) \cdot X^2 \cdot b]^2 + X \cdot [(b \cdot \gamma - 1) - b \cdot (1+X^2 \cdot b \cdot \gamma)]\} / [(1+X^2) \cdot (1+X^2 \cdot b^2)]^2}.$$

Здесь 
$$b = R_3 \cdot C_3 / (C_0 \cdot R_K \cdot (1 + K_0 \cdot R_3 / R_0)).$$

Характеристики получены при глубине обратной связи  $\gamma = 2$ .

Для получения максимально плоской в полосе пропускания частотной характеристики  $b = 0.414$  в схеме с индуктивной коррекцией и  $b = 0.64$  в схеме с емкостной коррекцией. Для схем без коррекции  $b = 0$ .

При применении высокочастотной коррекции следует помнить, что схема с параллельной корректирующей цепью обеспечивает максимальное усиление каскада, но не уменьшает его входную и выходную емкости. Кроме того, она работает эффективно, если нагрузкой каскада служит сравнительно высокоомное сопротивление. Схема же с эмиттерной корректирующей цепью уменьшает усиление, но одновременно позволяет уменьшить входную и выходную емкости и нелинейные искажения в каскаде. Это дает возможность увеличить сопротивление нагрузок, как у самого каскада, так и у предшествующего ему, и частично скомпенсировать потерю в усилении. Кроме того, данная схема более предпочтительна при работе каскада на эмиттерный повторитель (не склонна к самовозбуждению).

Расчет общего сопротивления  $R_0$  коллекторной нагрузки широкополосного каскада осуществляют следующим образом. По отведенному ранее на него коэффициенту частотных искажений  $M_{Bj}$  находят нормированное усиление для граничной частоты  $Y_j = 1 / M_{Bj}$ .

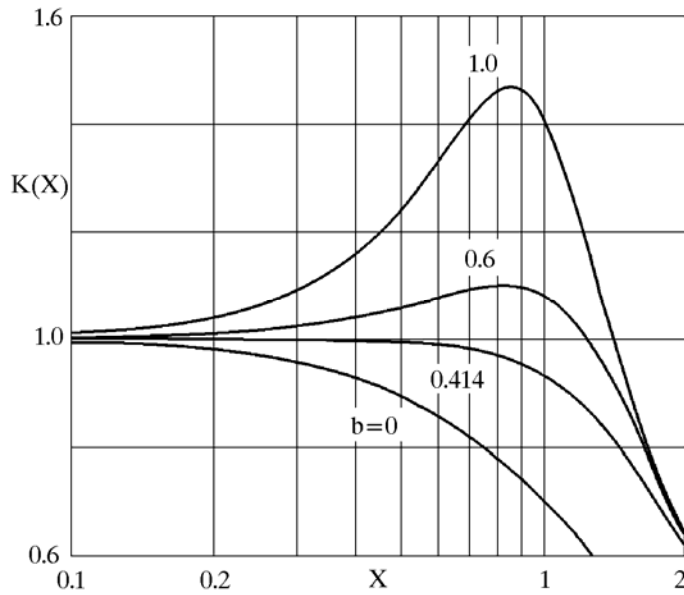


Рис. 6

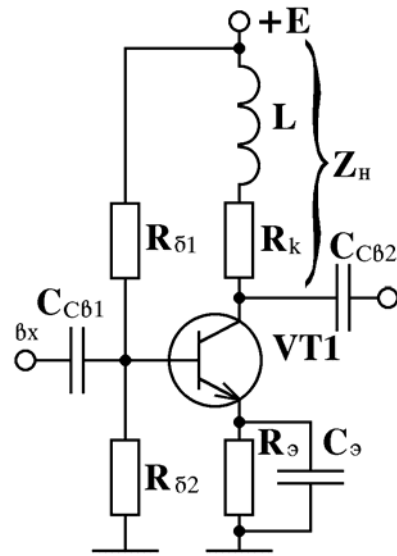


Рис. 7

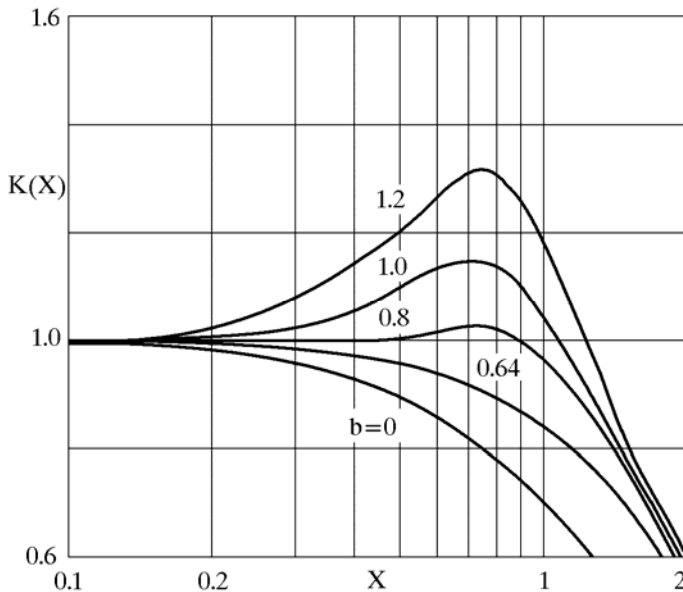


Рис. 8

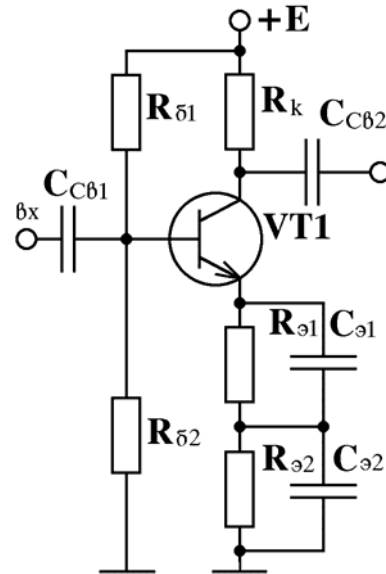


Рис. 9

На графике обобщенной частотной характеристики (рис. 6 или рис. 8) по величине  $Y_j$  определяют обобщенную частоту  $X$ . Рассчитывают емкость  $C_0$ , нагружающую каскад, состоящую из емкости монтажа  $C_M = (3 \dots 5)$  пФ, емкости нагрузки  $C_H$  (для предварительных каскадов усиления это – входная емкость следующего каскада  $C_{вх}$ ), выходной емкости транзистора рассчитываемого каскада  $C_{вых}$  (емкости источника сигналов для первого каскада)

$$C_0 = C_M + C_H + C_{вых}.$$

Входная  $C_{вх}$  и выходная  $C_{вых}$  емкость транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, может быть найдена из соотношений:

$$C_{\text{вх}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot f_T} + C_K \cdot \left[ 1 + \frac{R_0' \cdot h_{21э}}{[r_6 + r_3 \cdot (1 + h_{21э})]} \right],$$

$$C_{\text{вых}} = C_K \cdot \left[ 1 + r_6 \cdot h_{21э} / r_6 + r_3 \cdot (1 + h_{21э}) \right],$$

где  $C_K$  – емкость коллекторного перехода транзистора;

$r_6$  – объемное сопротивление базы на низкой частоте;

$r_3$  – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$h_{21э}$  – коэффициент усиления транзистора по току;

$R_0'$  – общее сопротивление нагрузки в каскаде, для которого вычисляется  $C_{\text{вх}}$ .

В схеме с общим коллектором

$$C_{\text{вх}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot [h_{11э}/(1 + h_{21э}) + R_0]} + \frac{C_{\text{н}}'}{1 + h_{21э}}, \quad C_{\text{вых}} = C_K,$$

где  $C_{\text{н}}'$  – емкость следующей схемы, нагружающая каскад.

Для полевого транзистора в схеме с общим истоком

$$C_{\text{вх}} = C_{11и} + C_{12и} \cdot K, \quad C_{\text{вых}} = C_{22и} - C_{12и},$$

где  $C_{11и}$ ,  $C_{12и}$ ,  $C_{22и}$  – входная, проходная и выходная емкости транзистора,

$K$  – коэффициент усиления каскада.

Величина  $C_K$  зависит от напряжения между коллектором и эмиттером в рабочей точке  $U_0$  и определяется по справочному значению  $C_{K \text{ спр}}$ , измеренному при напряжении  $U_{K \text{ спр}}$

$$C_K = C_{K \text{ спр}} \cdot \sqrt[3]{(U_{K \text{ спр}} / U_0)}.$$

Объемное сопротивление базы на низкой частоте рассчитывают через постоянную времени коллекторной цепи  $\tau_K$ , приводимую в справочнике

$$r_6 = (1 \dots 3) \cdot \tau_K / C_{K \text{ спр}},$$

где выбор коэффициента зависит от технологии изготовления и частотных свойств транзистора. Для сплавных транзисторов он равен единице, для планарно-эпитаксиальных и диффузионных – близок к трем.

Если особо не оговорено, то при расчетах пользуются средним значением коэффициента усиления транзистора по току, определяемым через минимальное  $h_{21э \text{ мин}}$  и максимальное  $h_{21э \text{ макс}}$  значения

$$h_{21э} = \sqrt{h_{21э \text{ мин}} \cdot h_{21э \text{ макс}}}.$$

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода зависит от тока, протекающего через транзистор. В частном случае для транзистора, работающего в классе А, при среднем коллекторном токе в рабочей точке  $I_0$



$$r_3 = T \cdot (h_{213} + 1) / (11600 \cdot I_0 \cdot h_{213}),$$

где  $T$  - абсолютная температура коллекторного перехода в градусах Кельвина. Линейность данной формулы нарушается при больших токах. Поэтому, если получается  $r_3 < 1$  Ом, то принимают  $r_3 = 1$  Ом.

Теперь можно найти общее сопротивление коллекторной нагрузки каскада

$$R_0 = X / (2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot C_0).$$

Отсюда  $R_K = R_H \cdot R_0 / (R_H - R_0)$ , где  $R_H$  - нагрузка оконечного каскада или входное сопротивление последующей схемы, являющееся нагрузкой для предыдущего каскада.

Если ток, протекающий через транзистор, неизвестен, то величину  $R_0$  и  $R_K$  находят методом последовательных приближений, задаваясь допустимой ошибкой вычислений порядка 5%.

Может получиться так, что  $R_K$  окажется отрицательным числом. Это говорит о том, что оптимизировать нагрузку нельзя и каскад будет иметь меньшее усиление вследствие низкого значения  $R_H$ . Тогда надо брать

$$R_K = (1 \dots 2) \cdot R_H.$$

Для каскадов импульсных усилителей на биполярных транзисторах аналогичную задачу решают следующим образом ([6] с.107).

Определяют постоянную времени транзистора, предполагаемого к использованию в каскаде

$$\tau = r_6 \cdot h_{213} / (2 \cdot \pi \cdot f_{h216} \cdot h_{113}),$$

где  $f_{h216} = (1.2 \dots 2) \cdot (1 + h_{213}) \cdot f_T / h_{213}$  - граничная частота усиления в схеме с общей базой. Числовой коэффициент в формуле зависит от технологии изготовления транзисторов и для высокочастотных образцов приближается к двум.

Входное сопротивление транзистора  $h_{113}$  находят для тока, соответствующего половине его амплитудного значения. Если усиливаются однополярные импульсы, то предпочтителен класс В, в котором транзистор открывается сигналом, а рабочая точка задается на границе зоны неуправляемых токов.

$$I_{Hy} = I_0 = (0.01 \dots 0.05) \cdot I_{K \text{ макс доп.}}$$

Затем вычисляют добротность резисторного каскада с данным транзистором без цепей коррекции ([6] с.107)

$$D = \frac{h_{213}}{2.2 \cdot h_{113} \cdot [(1 + r_6 \cdot h_{213} / h_{113}) \cdot C_K + 2 \cdot \sqrt{h_{213} \cdot C_K \cdot \tau / h_{113} - \tau / h_{113} + \tau / r_6}]}$$

По распределенному ранее значению времени установления импульса в данном  $j$  - м каскаде  $t_{yj}$  определяют его максимально возможный коэффициент усиления по напряжению  $K_j = t_{yj} \cdot D$  и общее сопротивление нагрузки

$$R_0 = K_j \cdot h_{11э} / h_{21э}.$$

Если ток, протекающий через транзистор, неизвестен, то величину  $R_0$ , а затем и  $R_k$  находят методом последовательных приближений.

В схемах с полевыми транзисторами величину сопротивления, нагружающего каскад, можно найти из соотношения ([6] с. 155)

$$R_0 = t_{yj} / [2.2 \cdot (C_{11и} + C_{22и} - C_{12и} + C_m)].$$

Так же, как и при расчете каскада широкополосного усилителя, может получиться, что величина  $R_0$  больше сопротивления нагрузки или входного сопротивления следующего каскада. Это означает, что оптимизировать параметры схемы нельзя, т.е. от нее невозможно получить максимальное усиление при заданном времени установления. Усиление получится меньше, причем время установления также уменьшится.

### 5.2.2. Расчет каскадов усилителя по постоянному и переменному току

Расчет любого каскада начинается с выбора рабочей точки, определения элементов смещения и температурной стабилизации (т.е. с расчета каскада по постоянному току). При колебаниях температуры окружающей среды до  $(70...100)^\circ\text{C}$  достаточно хорошие показатели обеспечивает схема эмиттерной (или истоковой) стабилизации. Ее преимущественно и используют в аппаратуре. Схемы подачи смещения и расчет каскадов по постоянному току для различных включений транзистора аналогичны и не зависят от выбора общего электрода по переменному току у усилительного элемента.

Рассмотрим обобщенную схему включения (рис. 10) по постоянному току биполярного и полевого транзистора в резисторном каскаде.

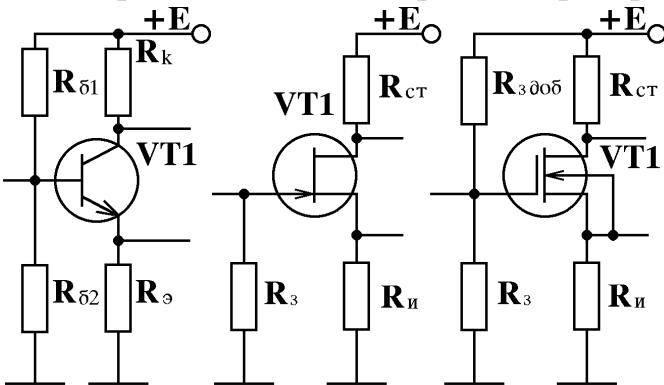


Рис. 10

Способ включения транзистора по переменному току будет определяться только соединением его электродов с источником сигналов, общим проводом и нагрузкой. Так, при включении с общим эмиттером сигнал подают в базовую цепь, а снимают с коллектора. При включении с общим коллектором входным электродом будет база, а выходным – эмиттер. В схеме с общей базой

входной сигнал подают в эмиттерную цепь, а выходной – снимают с коллектора. К этим электродам и подключают элементы связи и блокировочные элементы.

Схемы двухтактных каскадов рассчитываются аналогично одноктактным схемам, так как они могут быть представлены как сочетание вышеприведенных

базовых схем, работающих с различными полуволнами входного сигнала. Поэтому расчет двухтактных каскадов, в силу симметрии схем, обычно проводят для одной половины (плеча).

Аналогичные схемы на полевых транзисторах принципиальных отличий не имеют, за исключением цепей смещения.

Как указывалось выше, с целью уменьшения потерь в каскадах с общим коллектором (общим стоком), сопротивление  $R_K$  обычно не включают, а если и включают, то используют как элемент, входящий в схему фильтрации питающих напряжений.

Для удовлетворительной термостабилизации маломощных каскадов, где транзистор включен с общей базой или общим эмиттером (общим затвором или истоком),

$$R_Э = (0.2 \dots 0.5) \cdot R_K, \quad R_{И} = (0.2 \dots 0.5) \cdot R_{СТ}.$$

В выходных каскадах полевые транзисторы используют редко из-за их невысокой надежности и повышенного внутреннего сопротивления, причем указанное выше соотношение при использовании теплоотводов у транзисторов можно взять, как

$$R_Э = (0.1 \dots 0.3) \cdot R_K.$$

Ток покоя транзистора при непрерывных или двухполярных импульсных сигналах, а также в предварительных однополярных усилительных каскадах, питающихся от напряжения  $U_{П}$ ,

$$I_0 = U_{П} / (2 \cdot R_K + R_Э); \quad I_0 = U_{П} / (2 \cdot R_{СТ} + R_{И}).$$

Напряжение на транзисторе в точке покоя

$$U_0 = U_{П} - I_0 \cdot (R_K + R_Э) \quad \text{или} \quad U_0 = U_{П} - I_0 \cdot (R_{СТ} + R_{И}).$$

В импульсном усилителе однополярных напряжений с открыванием транзистора полезным сигналом и двухтактном каскаде, работающем в классе АВ,  $I_0 \geq I_{ну}$ .

Рассчитывая импульсный усилитель, содержащий несколько каскадов с общим эмиттером, необходимо также помнить, что если для одного из каскадов входящий сигнал будет открывающим транзистор, то для соседних каскадов он будет закрывающим. Это происходит из-за того, что каскад с общим эмиттером инвертирует сигнал. В каскадах, где транзисторы включены с общим коллектором и общей базой инверсии сигнала не происходит.

Напряжения на транзисторе, соответствующие максимальному  $I_{макс}$  и минимальному  $I_{мин}$  выходным токам при известной максимальной амплитуде  $U_M$  выходного сигнала

$$U_{к макс} = U_0 - U_M; \quad U_{к мин} = U_0 + U_M.$$

Для открывающего транзистор однополярного импульса или для одного плеча двухтактной схемы

$$U_{к\text{ мин}} = U_0, \quad I_{\text{мин}} = I_0.$$

Максимальный и минимальный ток коллектора

$$I_{\text{макс}} = (I_0 \cdot R_0 + U_M) / R_0; \quad I_{\text{мин}} = (I_0 \cdot R_0 - U_M) / R_0.$$

Мощность, рассеиваемая транзистором, не должна быть больше допустимой

$$P_{0\text{ макс}} = 1.2 \cdot I_0 \cdot U_0; \quad P_{\text{имп макс}} = 1.2 \cdot I_{\text{макс}} \cdot U_{к\text{ макс}}.$$

Для каскадов, работающих в режиме большого сигнала, строят нагрузочные прямые по постоянному и переменному току (рис. 11), причем в резисторных каскадах в качестве сопротивлений, нагружающих каскад по постоянному току, берут сумму  $R_k$  и  $R_э$ , а сопротивлению нагрузки по переменному току соответствует значение  $R_0$ .

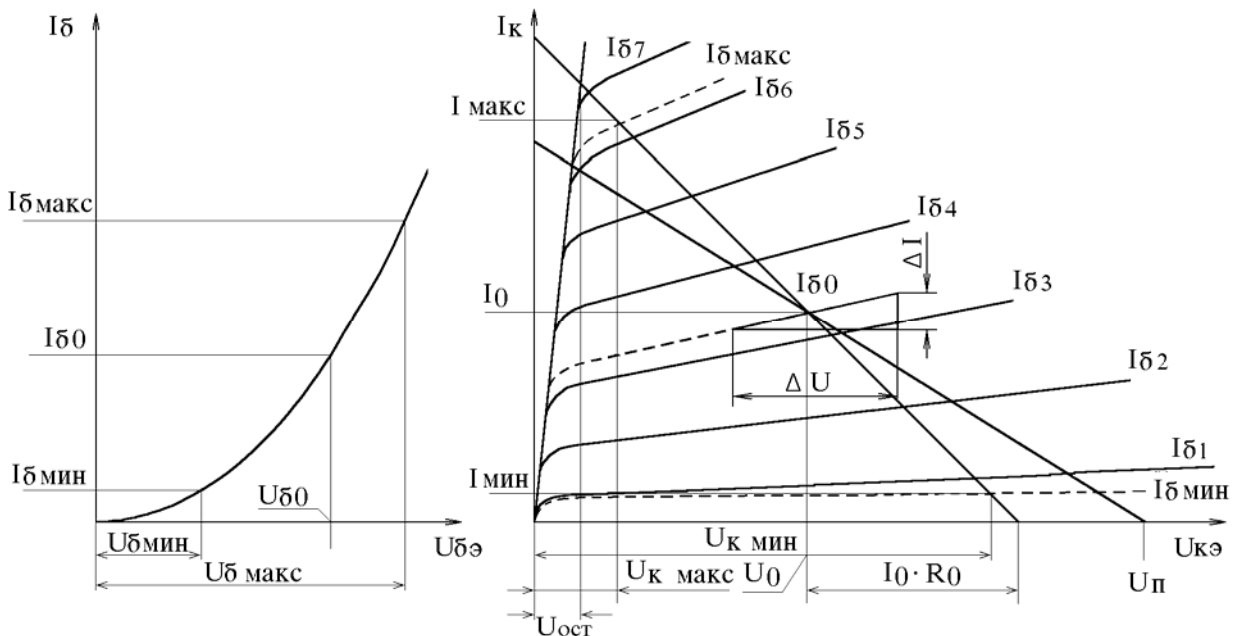


Рис. 11

Ток смещения базы в рабочей точке при наихудшем транзисторе

$$I_{б0} = I_0 / h_{21э\text{ мин}}.$$

Амплитуда переменной составляющей входного тока

$$I_{вх\text{ макс}} = (I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}) / (m \cdot h_{21э\text{ мин}}),$$

где  $m = 1$  для однополярных импульсов и  $m = 2$  - в остальных случаях. Отсюда максимальное и минимальное значения базового тока (для однополярных импульсов  $I_{б\text{ мин}} = I_{б0}$ ).

$$I_{б\text{ макс}} = I_{б0} + I_{вх\text{ макс}}; \quad I_{б\text{ мин}} = I_{б0} - I_{вх\text{ макс}}.$$

Так как статическая входная характеристика биполярного транзистора мало изменяется при  $U_{кэ} > 0.5$  В и практически не отличается от динамической, то для расчетов можно пользоваться приведенной в справочниках кривой  $I_{б} = f(U_{бэ})$  при отличном от нуля значении  $U_{кэ}$ . Учитывая это обстоятельство, надо перенести значения  $I_{б \text{ макс}}$ ,  $I_{б \text{ мин}}$  и  $I_{б0}$  с выходной динамической характеристики на входную статическую и найти  $U_{б \text{ макс}}$ ,  $U_{б0}$  и  $U_{б \text{ мин}}$ .

Определим амплитуду входного напряжения в схеме с общим эмиттером

$$U_{вх \text{ м}} = (U_{б \text{ макс}} - U_{б \text{ мин}}) / 2.$$

Амплитуду переменной составляющей входного тока обычно находят не как разность между  $I_{б \text{ макс}}$  и  $I_{б \text{ мин}}$ , а аналитически, как

$$I_{вх \text{ м}} = 0.5 \cdot (I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}) / h_{21э \text{ мин}}.$$

Это делается для того, чтобы усилитель сохранял работоспособность даже при наихудшем транзисторе.

Для определения входного сопротивления транзистора без учета обратных связей при графоаналитическом расчете переносят крайние значения токов базы и ток базы в рабочей точке с нагрузочной прямой на статическую входную характеристику, которая практически совпадает с динамической. Отсюда получают значения  $U_{б0}$ ,  $U_{б \text{ мин}}$ ,  $U_{б \text{ макс}}$ .

Входное сопротивление транзистора

$$h_{11э} = 0.5 \cdot (U_{б \text{ макс}} - U_{б \text{ мин}}) / I_{вх \text{ м}}.$$

В схемах предварительных каскадов входное сопротивление рассчитывают аналитически как сумму объемного сопротивления базы  $r_{б}$  и эквивалентного сопротивления базо-эмиттерного перехода  $r_{б'э}$

$$h_{11э} = r_{б} + r_{б'э} = r_{б} + r_{э} \cdot (1 + h_{21э}).$$

Входное сопротивление транзистора с отрицательной обратной связью по току, получаемой за счет включения в эмиттерную цепь не шунтированного емкостью сопротивления  $R_{э}'$ ,

$$h_{11э \text{ ос}} = h_{11э} + R_{э}' \cdot (1 + h_{21э}).$$

Входное сопротивление транзистора, включенного с общим коллектором

$$h_{11к} = h_{11э} + R_0 \cdot (1 + h_{21э}).$$

Коэффициент усиления на средних частотах каскада с биполярным транзистором, включенным с общим эмиттером, и работающим в режиме большого сигнала, без учета обратной связи

$$K = (I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}) \cdot R_0 / (U_{б \text{ макс}} - U_{б \text{ мин}}).$$

Для предварительных каскадов усиление обычно определяют по минимальному усилению тока транзистором  $h_{21э \text{ мин}}$

$$K = h_{21э \text{ мин}} \cdot R_0 / h_{11э}$$

В каскадах, где транзистор включен с общим коллектором

$$K_{ок} = 1 / \{1 + (U_{б \text{ макс}} - U_{б \text{ мин}}) / [(I_{макс} - I_{мин}) \cdot R_0]\}$$

или

$$K_{ок} = (h_{21э \text{ мин}} + 1) \cdot R_0 / [h_{11э} + R_0 \cdot (1 + h_{21э})].$$

Величина сопротивления  $R_{б2}$  в маломощных каскадах

$$R_{б2} = (3 \dots 10) \cdot h_{11э},$$

а в мощных каскадах

$$R_{б2} = (1.5 \dots 3) \cdot h_{11э}.$$

Температура коллекторного перехода при минимальной  $t_{мин}$  и максимальной  $t_{макс}$  рабочей температуре усилителя и максимально допустимой температуре  $t_{к \text{ макс доп}}$  коллекторного перехода

$$t_{п \text{ мин}} = t_{к \text{ макс доп}} - t_{макс} - t_{мин}.$$

Максимальное напряжение эмиттер-база

$$U_{бэ \text{ макс}} = U_{б0} + 0.022 \cdot (20^\circ - t_{п \text{ мин}}).$$

Второе сопротивление базового делителя

$$R_{б1} = \frac{R_{б2} \cdot [h_{21б \text{ мин}} \cdot (U_{п} - U_{бэ \text{ макс}}) - R_э \cdot I_0]}{(R_э + R_{б2}) \cdot I_0 - h_{21б \text{ мин}} \cdot (I_0 \cdot R_{б2} - U_{бэ \text{ макс}})},$$

где  $h_{21б \text{ мин}} = h_{21э \text{ мин}} / (1 + h_{21э \text{ мин}})$ .

При расчете предварительных каскадов на кремниевых транзисторах можно принимать  $U_{б0} = (0.6 \dots 0.8)\text{В}$ , а на германиевых  $U_{б0} = (0.1 \dots 0.3)\text{В}$ .

Общее сопротивление делителя по переменному току

$$R_{дел} = R_{б1} \cdot R_{б2} / (R_{б1} + R_{б2}).$$

Входное сопротивление каскада с общим эмиттером без обратной связи

$$R_{вх} = R_{дел} \cdot h_{11э} / (R_{дел} + h_{11э}).$$

Входное сопротивление того же каскада с последовательной отрицательной обратной связью по току

$$R_{вх \text{ ос}} = R_{дел} \cdot h_{11э \text{ ос}} / (R_{дел} + h_{11э \text{ ос}}).$$

Аналогично находят входное сопротивление каскада с общим коллектором, заменяя в вышеприведенной формуле  $h_{11э \text{ ос}}$  на  $h_{11к}$ .

Для каскадов, работающих в режиме больших сигналов, проводят тепловой расчет. При этом задаются максимально допустимой температурой  $t_{\text{пр макс}}$  коллекторного перехода, которая должна быть хотя бы на (20...25)% меньше максимально допустимой температуры  $t_{\text{к макс доп}}$ , задаваемой в справочных данных транзистора. Затем находят тепловое сопротивление корпус-среда

$$R_{\text{Т кс}} = (t_{\text{пр макс}} - t_{\text{к макс доп}}) / P_{0 \text{ макс}} - R_{\text{Т пк}},$$

где  $R_{\text{Т пк}}$  - тепловое сопротивление переход-корпус.

Необходимая площадь пластины охлаждения при двухстороннем обдуве (в  $\text{см}^2$ ):

$$S_{\text{охл}} = 700 / R_{\text{Т кс}}.$$

Если пластина оказалась слишком велика, то выбирают другой транзистор с меньшим  $R_{\text{Т пк}}$ .

Для схем с полевыми транзисторами на выходных статических характеристиках транзистора находят напряжение смещения в точке покоя  $U_{\text{зи0}}$  и проверяют выполнение условия  $-U_{\text{зи0}} > 0.1 \cdot U_{\text{п}}$  для n - канала или  $U_{\text{зи0}} > -0.1 \cdot U_{\text{п}}$  для p - канала (при этом полярность напряжения на затворе, как правило, не совпадает с полярностью напряжения питания). Если условие не выполняется, то оставляют положение рабочей точки там же и используют добавочное сопротивление в цепи затвора  $R_{\text{з доб}}$  (см. рис. 10). Если условие выполняется, то уточняют значение сопротивления в цепи истока и положение рабочей точки

$$R_{\text{и}} = U_{\text{зи0}} / I_0; \quad U_0 = U_{\text{п}} - I_0 \cdot (R_{\text{и}} + R_{\text{ст}}).$$

Сопротивления в цепи затвора

$$R_{\text{с}} \leq R_{\text{з}} < (0.2 \dots 1) \text{ МОм}; \quad R_{\text{з доб}} = R_{\text{з}} \cdot [U_{\text{п}} / (U_{\text{зи0}} + I_0 \cdot R_{\text{и}})].$$

Входное сопротивление каскада на не очень высоких частотах

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{з}} \cdot R_{\text{з доб}} / (R_{\text{з}} + R_{\text{з доб}}).$$

Коэффициент усиления при минимальной крутизне  $S_{\text{мин}}$

$$K = S_{\text{мин}} \cdot R_0.$$

### 5.2.3. Расчет цепей коррекции широкополосных усилителей

Расчет схемы коллекторной коррекции (см. рис. 7) ведется по вышеприведенным формулам для каскада без обратной связи и обобщенным частотным характеристикам (см. рис. 6).

Единственным дополнительным элементом в схеме является корректирующий дроссель. Его индуктивность находят по формуле:

$$L = b \cdot C_0 \cdot R_K^2.$$

Для схемы эмиттерной коррекции (см. рис. 9) находят сопротивление эквивалентного генератора на высоких частотах

$$R_{\text{ЭКВ В}} = r_{\text{б'э}} \cdot [1 - r_{\text{б'э}} / (h_{11\text{э}} + R_c)].$$

Динамическая емкость эмиттерного перехода

$$C_{\text{б'э}} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot r_{\text{э}}).$$

Входная динамическая емкость каскада

$$C_{\text{ВХ Д}} = C_{\text{б'э}} + C_K \cdot (1 + K).$$

Полная емкость входной цепи транзистора

$$C_0 = C_{\text{ВЫХ пр}} + C_M + C_{\text{ВХ Д}},$$

где  $C_{\text{ВЫХ пр}}$ ,  $C_M$  - выходная емкость предыдущего каскада и емкость монтажа (определены в п. 5.2.1.).

Задаемся значением коэффициента высокочастотной коррекции  $b$  и определяем по обобщенным частотным характеристикам (см. рис. 8) для  $Y = 1 / M_{\text{Вj}}$  обобщенную частоту  $X$ .

Рассчитываем глубину отрицательной обратной связи [7] с. 59

$$\gamma = R_{\text{ЭКВ В}} \cdot C_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_B / X.$$

Вычисляем сквозную крутизну характеристики эмиттерного тока

$$S_{\text{э СКВ}} = (1 + h_{21\text{э}}) / (R_c + h_{11\text{э}}).$$

Сопротивление резистора в цепи эмиттерной частотной коррекции

$$R_{\text{кор}} = (\gamma - 1) / S_{\text{э СКВ}}.$$

Емкость конденсатора, включенного параллельно резистору  $R_{\text{кор}}$ ,

$$C_{\text{кор}} = b \cdot X / (2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot R_{\text{кор}}).$$

Выходная емкость каскада с учетом отрицательной обратной связи по току

$$C_{\text{ВЫХ ОС}} = C_{\text{ВЫХ}} / \gamma.$$

Крутизна характеристики эмиттерного тока

$$S_{\text{э}} = (1 + h_{21\text{э}}) / h_{11\text{э}}.$$

Входное сопротивление транзистора с учетом отрицательной обратной связи

$$h_{11\text{ос}} = h_{11\text{э}} \cdot (1 + S_{\text{э}} \cdot R_{\text{кор}}).$$

Входное сопротивление каскада

$$R_{\text{ВХ ОС}} = R_{\text{дел}} \cdot h_{11\text{ос}} / (R_{\text{дел}} + h_{11\text{ос}}).$$

Величина второго сопротивления в цепи эмиттера

$$R_{\text{э}}' = R_{\text{э}} - R_{\text{кор}}.$$

Размах напряжения на входе



$$U_{\text{ВХ макс}} = R_{\text{ВХ ос}} \cdot I_{\text{ВХ макс}}$$

Коэффициент усиления по напряжению с учетом обратной связи

$$K_{\text{ос}} = (U_{\text{к мин}} - U_{\text{к макс}}) / (m \cdot U_{\text{ВХ макс}}).$$

#### 5.2.4. Расчет переходных искажений импульсных усилителей

Рассмотрим теперь методику определения переходных искажений импульсных усилителей.

Как правило, импульсные усилители строят с использованием резисторных каскадов.

Положительным свойством резисторного некорректируемого каскада является отсутствие выброса в переходной характеристике. Недостатком его является меньшая на (30...40)% добротность по сравнению со схемами, имеющими цепи высокочастотной коррекции.

Нормированная переходная характеристика некорректированного усилительного каскада в области малых времен, позволяющая оценить искажения фронта импульса и длительность фронта (время установления амплитуды сигнала, ограниченное уровнями 0.1 и 0.9 от установившегося значения), определяются выражениями:

$$h(t)_{\text{норм}} = 1 - \exp(-t/\tau_{\text{в}}), \quad t_{\text{г}} = 2.2 \cdot \tau_{\text{в}},$$

где  $\tau_{\text{в}} = R_{\text{экв в}} \cdot C_0$  - постоянная времени каскада на высоких частотах;

$R_{\text{экв в}} = R_{\text{с}} \cdot R_{\text{вх}} / (R_{\text{с}} + R_{\text{вх}})$  - эквивалентное сопротивление каскада на высоких частотах. Например, если источником сигналов служит каскад с общим эмиттером, то  $R_{\text{с}} = R_{\text{к}}$ ;

$C_0$  - емкость, нагружающая каскад (см п. 5.2.3).

С целью уменьшения искажений формы импульсов используют схемы коррекции.

Для широко используемой схемы простой параллельной индуктивной высокочастотной коррекции (см. рис. 6) с коэффициентом коррекции  $b = L / (R_{\text{к}}^2 \cdot C_0)$  переходная характеристика в координатах нормированного времени  $x = t / (C_0 \cdot R_{\text{к}})$  при малых временах определяется выражениями:

$$h(t)_{\text{норм}} = \begin{cases} 1 + \frac{b \cdot (1+d)}{d^2 - d} \cdot \exp\left[-\frac{x \cdot (1-d)}{2 \cdot b}\right] + \frac{b \cdot (1-d)}{d^2 + d} \cdot \exp\left[-\frac{x \cdot (1+d)}{2 \cdot b}\right]; & b < 0.25; \\ 1 - (1+x) \cdot e^{-2 \cdot x}; & b = 0.25; \\ 1 - \left[ \frac{1-2 \cdot b}{m} \cdot \sin\left(\frac{x \cdot m}{2 \cdot b}\right) + \cos\left(\frac{x \cdot m}{2 \cdot b}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{x}{2 \cdot b}\right); & b > 0.25. \end{cases}$$

где  $d = \sqrt{1 - 4 \cdot b}$ ;  $m = \sqrt{4 \cdot b - 1}$  - вспомогательные коэффициенты.

Для схемы с эмиттерной коррекцией при  $b = R_3 \cdot C_3 / (C_0 \cdot R_K \cdot (1 + K_0 \cdot R_3 / R_0))$

$$h(t)_{\text{норм}} = \{[\exp(-x) \cdot (1 - \gamma \cdot b) - \exp(-x/b) \cdot b \cdot (1 + \gamma)] / (b - 1)\} + 1.$$

Поведение эмиттерного повторителя, нагруженного на  $R_H$  и  $C_H$ , схем с параллельной индуктивной коррекцией, с эмиттерной коррекцией конденсатором  $C_{\text{кор}}$  (комплексной обратной связью) принято определять по значениям коэффициентов  $a$  и  $b$ , зависящим от безразмерных эквивалентных постоянных времени  $\tau_3'$ ,  $\tau_3''$  и  $\tau_3'''$ .

Апериодический процесс установления выходного сигнала усилителя имеет место при  $b \geq 2$ , а колебательный – при  $b < 2$ .

Если

$$a \cdot (b - \sqrt{b^2 - 4}) / 2 \leq 1 \quad \text{и} \quad b \geq 2$$

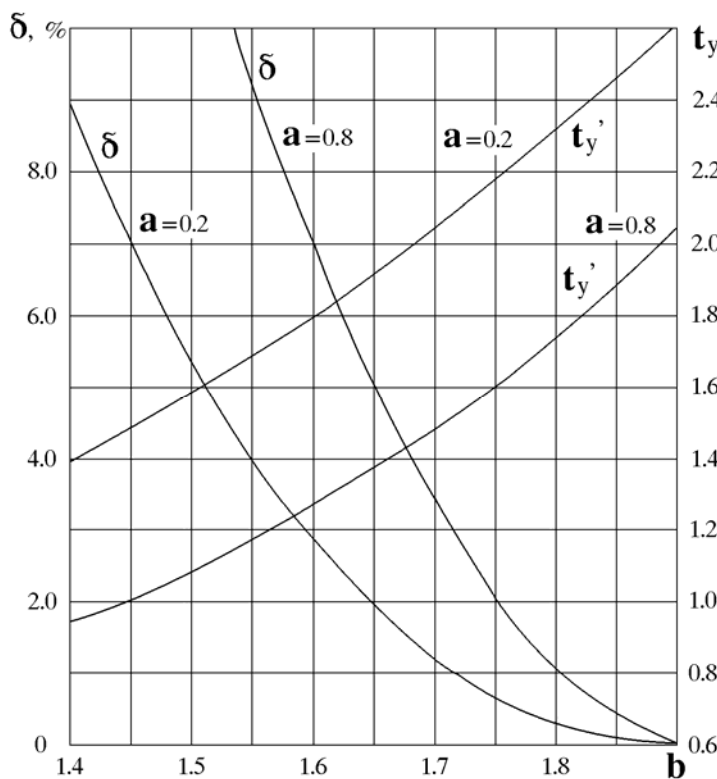


Рис. 12

процесс будет монотонным и тогда обобщенное время установления можно определить по формуле ([6], с.111)

$$t_y' = 2.2 \cdot \sqrt{b^2 - a^2} - 2.$$

При колебательном процессе установления обобщенное время установления  $t_y'$  и выброс  $\delta$  можно определить с помощью графика (рис. 12). Коэффициенты  $a$  и  $b$  соответственно равны

$$a = \tau_3' / \tau_3''', \quad b = \tau_3'' / \tau_3'''.$$

Параметры каскадов в значительной степени зависят от вида нагрузок.

Ниже даны расчетные формулы для типовых случаев.

В формулах использованы

следующие обозначения: емкость коллекторного перехода  $C_K$ , сопротивление в цепи коллектора  $R_K$ , общее сопротивление, нагружающее каскад  $R_0$ , сопротивление в цепи эмиттера, создающее последовательную отрицательную обратную связь по току, в рассчитываемом каскаде  $R_{\text{кор}}$ , в следующем каскаде  $R_3$  сл, корректирующая индуктивность  $L$  или емкость  $C_{\text{кор}}$ , коэффициент усиления следующего каскада с учетом обратной связи (если она есть)  $K_0'$ , коэффициент передачи эмиттерного повторителя  $K_{\text{ок}}$ , граничная частота усиления в схеме с общей базой

$$f_{h21\delta} = (1.2 \dots 2.0) \cdot f_T.$$

Здесь коэффициент зависит от технологии изготовления транзистора. Для высокочастотных транзисторов обычно берется большая из указанных цифр.

Постоянная времени транзистора и постоянная времени его выхода

$$\tau = r_{\bar{\sigma}} \cdot h_{21\bar{\sigma}} / (2 \cdot \pi \cdot f_{h21\bar{\sigma}} \cdot h_{11\bar{\sigma}}); \quad \tau_i = (1 + r_{\bar{\sigma}} \cdot h_{21\bar{\sigma}} / h_{11\bar{\sigma}}) \cdot C_K \cdot R_0.$$

Глубина обратной связи в следующем каскаде

$$\gamma = 1 + R_{\bar{\sigma} \text{ сл}} \cdot (h_{21\bar{\sigma} \text{ сл}} + 1) / h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}.$$

Постоянные времени индуктивной и емкостной корректирующей цепи

$$\tau_L = L / R_K; \quad \tau_C = C \cdot R_{\text{кор}}.$$

Безразмерные эквивалентные постоянные времени в цепях индуктивной и емкостной коррекции

$$\tau_{\bar{\sigma}}' = \tau_L / \tau; \quad \tau_{\bar{\sigma}}' = \tau_C / \tau,$$

в цепи эмиттерного повторителя, нагруженного на  $R_H$  и  $C_H$ ,

$$\tau_{\bar{\sigma}}' = h_{11\bar{\sigma}} / [r_{\bar{\sigma}} \cdot (h_{21\bar{\sigma}} + 1)].$$

Постоянная времени нагрузки  $\tau_H = R_0 \cdot C_H$ .

Параллельное соединение  $R_K$  и  $R_{\text{дел сл}}$

$$R' = R_K \cdot R_{\text{дел сл}} / (R_K + R_{\text{дел сл}}).$$

Для некорректированного резисторного каскада при включении транзистора с общим эмиттером с эквивалентной постоянной времени  $\tau_{\bar{\sigma}}$  коэффициент усиления по напряжению  $K = h_{21\bar{\sigma}} \cdot R_0 / h_{11\bar{\sigma}}$ , а время установления  $t_y = 2.2 \cdot \tau_{\bar{\sigma}}$ .

Формулы для расчета  $R_0$  и  $\tau_{\bar{\sigma}}$  зависят от вида нагрузочных цепей.

Если усилитель нагружен на  $R_H$  и  $C_H$ , то ([6], с.106):

$$R_0 = R_K \cdot R_H / (R_K + R_H); \quad \tau_{\bar{\sigma}} = \tau_i + \tau_H + \tau.$$

При нагрузке на каскад без обратной связи ([6], с.107):

$$R_0 = R' \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} \cdot (R' + h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}); \quad \tau_{\bar{\sigma}} = K_0' \cdot R_0 \cdot C_K; \quad \tau_{\bar{\sigma}} = \tau_i + \tau_s + \tau \cdot (1 - R_0 / h_{11\bar{\sigma}} + R_0 / r_{\bar{\sigma}}).$$

Если каскад подключен ко входу следующего каскада, охваченного отрицательной обратной связью по току (например, со схемой эмиттерной коррекции), то ([6] с. 108):

$$R_0 = \gamma \cdot R' \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / (R' + \gamma \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}); \quad \tau_{\bar{\sigma}} = K_0' \cdot R_0 \cdot C_K; \quad \tau_{\bar{\sigma}} = \tau_i + \tau_s + \tau \cdot (R_0 / R' + R_0 / (r_{\bar{\sigma}} \cdot \gamma)).$$

При нагрузке в виде эмиттерного повторителя ([6] с. 108):

$$t_s = K_{\text{ок}} \cdot R_0 \cdot C_K;$$

$$R_0 = 1 / [(1 - K_{\text{ок}}) / h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} + 1 / R']; \quad \tau_{\bar{\sigma}} = \tau_i + \tau_s + \tau \cdot [R_0 / R' + R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_{\bar{\sigma}}].$$

Для каскада с параллельной индуктивной коррекцией

$$K = h_{21э} \cdot R_0 / h_{11э}, \quad t_y = t_y' \cdot \tau \cdot \tau_э'''.$$

Рассмотрим основные случаи включения каскада. При емкостной нагрузке ([6] с. 111, 112):

$$R_0 = R_K; \quad \tau_э'' = 1 + (\tau_H + \tau_i) / \tau;$$

$$\tau_э''' = \sqrt{(\tau_L / \tau) \cdot [(\tau_H + \tau_i) / \tau + h_{11э} / [r_{б} \cdot (h_{21э} + 1)] \cdot (\tau_i / \tau) + (\tau_H / \tau)}.$$

Если имеется нагрузка в виде  $R_H$  и  $C_H$ , то [6], с.112, 113:

$$R_0 = R_K \cdot R_H / (R_K + R_H); \quad \tau_э'' = 1 + [\tau_H + \tau_i + \tau_L \cdot R_0 / R_H] / \tau;$$

$$\tau_э''' = \sqrt{(\tau_L / \tau) \cdot [(\tau_i / \tau) + (\tau_H / \tau) + (R_0 / R_H)}.$$

Если имеется нагрузка в виде каскада без обратной связи, то ([6], с. 113):

$$R_0 = R' \cdot h_{11э \text{ сл}} / (R' + h_{11э \text{ сл}}); \quad \tau_э''' = \sqrt{(\tau_L / t) \cdot [(\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 / R_{\text{дел сл}} + R_0 / r_{б \text{ сл}}]};$$

$$\tau_s = K_0' \cdot R_0 \cdot C_K; \quad \tau_э'' = (\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 / R' + R_0 / r_{б \text{ сл}} + (\tau_L / \tau) \cdot (R_0 / h_{11э \text{ сл}} + R_0 / R_{\text{дел сл}}).$$

При нагрузке в виде каскада с отрицательной обратной связью по току (например, в схеме эмиттерной коррекции) ([6], с. 113):

$$R_0 = \gamma \cdot R_K \cdot R_{\text{дел сл}} \cdot h_{11э \text{ сл}} / [R_K \cdot R_{\text{дел сл}} + \gamma \cdot h_{11э \text{ сл}} \cdot (R_{\text{дел сл}} + R_K)]; \quad \tau_s = K_0' \cdot R_0 \cdot C_K;$$

$$\tau_э'' = (\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 / R_{\text{дел сл}} + R_0 / (\gamma \cdot r_{б \text{ сл}}) + R_0 / R_{\text{кор сл}} + (\tau_L / \tau) \cdot [R_0 / (\gamma \cdot h_{11э \text{ сл}}) + R_0 / R_{\text{дел сл}}];$$

$$\tau_э''' = \sqrt{(\tau_L / \tau) \cdot [(\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 / R_{\text{дел сл}} + R_0 / (\gamma \cdot r_{б \text{ сл}})]}.$$

При нагрузке в виде эмиттерного повторителя ([6], с. 114):

$$R_0 = R_K \cdot R_{\text{дел сл}} \cdot h_{11э \text{ сл}} / (1 - K_{\text{ок}}) \cdot R_K \cdot R_{\text{дел сл}} + h_{11э \text{ сл}} \cdot (R_{\text{дел сл}} + R_K); \quad \tau_s = K_{\text{ок}} \cdot R_0 \cdot C_K;$$

$$\tau_э'' = (\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_{б \text{ сл}} + R_0 / R' + (\tau_L / \tau) \cdot [R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / h_{11э \text{ сл}} + R_0 / R_{\text{дел сл}}];$$

$$\tau_э''' = \sqrt{(\tau_L / \tau) \cdot [(\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 / R_{\text{дел сл}} + [R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_{б \text{ сл}}]}.$$

При использовании каскада с эмиттерной коррекцией расчет коэффициента усиления и времени установления можно вести по тем же формулам, которые даны для схемы с параллельной индуктивной коррекцией, если в эквивалентном сопротивлении нагрузки  $R_0$  учесть влияние обратной связи.

Так, если нагрузкой каскада служат  $R_H$  и  $C_H$ , то ([6], с.122):

$$R_0 = R_K \cdot R_H \cdot h_{11э} / [(R_K + R_H) \cdot (1 + h_{11э} + R_{\text{кор}} \cdot h_{21э})];$$

$$\tau_э'' = \tau_i / \tau + R_0 \cdot (R_K + R_H) / (R_K \cdot R_H) \cdot [1 + R_{\text{кор}} / r_{б} + \tau_c / \tau] + (\tau_H / \tau) \cdot [1 + R_{\text{кор}} \cdot (h_{21э} + 1) / h_{11э}];$$

$$\tau_э''' = \sqrt{\tau_c \cdot (\tau_i / \tau + R_0 / R') / \tau + (\tau_H / \tau) \cdot (1 + R_{\text{кор}} / r_{б} + \tau_c / \tau)}.$$

Если нагрузкой служит каскад без отрицательной обратной связи, то ([6], с.122, 123):

$$R_0 = R' \cdot h_{11э \text{ сл}} / [\gamma' \cdot (h_{11э \text{ сл}} + R')]; \quad \gamma' = 1 + R_{\text{кор}} \cdot (h_{21э} + 1) / h_{11э}; \quad \tau_s = K_0' \cdot R_0 \cdot C_K;$$

$$\tau_3'' = \tau_i / \tau + \gamma' \cdot (\tau_s / \tau + R_0 / R' + R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}}) + R_{\text{кор}} / (r_{\bar{\sigma}} \cdot \gamma') + \tau_c / (\tau \cdot \gamma');$$

$$\tau_3''' = \sqrt{(\tau_c / \tau) \cdot (\tau_i / \tau + \tau_s / \tau + R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} + R_0 / R') + (R_{\text{кор}} / r_{\bar{\sigma}}) \cdot (\tau_s / \tau + R_0 / R' + R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}})}.$$

При нагрузке в виде такого же каскада ([6], с. 123):

$$R_0 = R' \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / [h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} + R' + R_{\text{кор}} \cdot (h_{21\bar{\sigma}} + 1)]; \quad \tau_s = (R' \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} + R') \cdot R_0 \cdot C_K;$$

$$\tau_3'' = \tau_i / \tau + R_0 / R' \cdot (1 + R_{\text{кор}} / r_{\bar{\sigma}}) + R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} + \tau_s / \tau + (\tau_c / \tau) \cdot (R_0 / R' + R_0 / h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}});$$

$$\tau_3''' = \sqrt{(\tau_c / \tau) \cdot (\tau_i / \tau + \tau_s / \tau + R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} + R_0 / R')}.$$

Если каскад нагружен на эмиттерный повторитель, то ([6], с. 123, 124):

$$R_0 = R' \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / \{\gamma' \cdot [h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} + R' \cdot (1 - K_{\text{ок}})]\}; \quad \gamma' = 1 + R_{\text{кор}} \cdot (h_{21\bar{\sigma}} + 1) / h_{11\bar{\sigma}};$$

$$\tau_s = K_{\text{ок}} \cdot R_0 \cdot C_K; \quad \tau_3'' = (\tau_i + \tau_s \cdot \gamma') / \tau + (1 - K_{\text{ок}}) \cdot (\gamma' \cdot R_0 / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} + \tau_c \cdot R_0 / (\tau \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}) +$$

$$+ R_{\text{кор}} \cdot R_0 / (r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}) + (R_0 / R') \cdot (1 + \tau_c / \tau + R_{\text{кор}} / r_{\bar{\sigma}});$$

$$\tau_3''' = \sqrt{(\tau_c / \tau) \cdot [(\tau_i + \tau_s) / \tau + R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}} + R_0 / R'] + (R_{\text{кор}} / r_{\bar{\sigma}}) \cdot (\tau_s / \tau + R_0 / R' + R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_{\bar{\sigma} \text{ сл}})}.$$

Если в схеме применен каскад эмиттерного повторителя, то при его нагрузке на  $R_H$  и  $C_H$ , в зависимости от величин последних, процесс установления может иметь монотонный или колебательный характер. При других нагрузках процесс протекает монотонно. Таким образом, если имеются  $R_H$  и  $C_H$ , то ([6], с. 129):

$$R_0 = R_3 \cdot R_H \cdot h_{11\bar{\sigma}} / [R_3 \cdot R_H \cdot (1 + h_{21\bar{\sigma}}) + h_{11\bar{\sigma}} \cdot R_H + R_3 \cdot h_{11\bar{\sigma}}]; \quad t_y = t_y' \cdot \tau \cdot \tau_3''',$$

$$\tau_s = R_0 \cdot C_K; \quad \tau_3'' = R_0 / r_{\bar{\sigma}} + R_0 / r_3 + R_0 / R_H + (\tau_i + \tau_H - \tau_s) / \tau; \quad \tau_3''' = \sqrt{\tau_H / \tau};$$

Если эмиттерный повторитель нагружен на каскад без отрицательной обратной связи, то ([6], с. 130):

$$R_0 = R_{30} \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / [R_{30} \cdot (2 + h_{21\bar{\sigma}}) + h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}]; \quad R_{30} = R_3 \cdot R_{\text{дел сл}} / (R_3 + R_{\text{дел сл}});$$

$$\tau_3 = \tau_i + \tau_s + \tau \cdot (R_0 / R_{30} + 2 \cdot R_0 / r_{\bar{\sigma}}); \quad \tau_s = (K_0' - 1) \cdot R_0 \cdot C_K; \quad t_y = 2.2 \cdot \tau_3.$$

При нагрузке в виде каскада с комплексной отрицательной обратной связью по току ([6], с. 130, 131):

$$R_0 = \gamma \cdot R_{30} \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}} / [\gamma \cdot R_{30} \cdot (1 + h_{21\bar{\sigma}}) + R_{30} + \gamma \cdot h_{11\bar{\sigma} \text{ сл}}];$$

$$R_{30} = R_3 \cdot R_{\text{дел сл}} / (R_3 + R_{\text{дел сл}});$$

$$\tau_3 = \tau_i + \tau_s + \tau \cdot [R_0 / R_{30} + R_0 / r_{\bar{\sigma}} + R_0 / (r_{\bar{\sigma}} \cdot \gamma)]; \quad \tau_s = (K_0' - 1) \cdot R_0 \cdot C_K; \quad t_y = 2.2 \cdot \tau_3.$$

Переходная характеристика входной цепи обычно имеет монотонный характер. Ее коэффициент передачи  $\alpha_{\text{вх}} = R_0 / (R_0 + R_c)$ , время установления  $t_y = 2.2 \cdot \tau_3$ .

Если нагрузкой источника сигналов с внутренним сопротивлением  $R_c$  и емкостью  $C_c$  служит каскад без обратной связи, то ([6], с. 131):

$$R_0 = R_c \cdot R_{\text{дел}} \cdot h_{11э} / [h_{11э} \cdot R_{\text{дел}} + R_c \cdot R_{\text{дел}} + R_c \cdot h_{11э}]; \quad \tau_s = K_0 \cdot R_0 \cdot C_c;$$

$$\tau_r = R_0 \cdot C_c; \quad \tau_э = \tau_s + \tau \cdot (R_0 / R_c + R_0 / R_{\text{дел}} + R_0 / r_б) + \tau_r,$$

где  $K_0$  - коэффициент усиления первого каскада.

При нагрузке в виде каскада с последовательной отрицательной обратной связью по току ([6], с. 132):

$$R_0 = 1 / \{1 / R_c + 1 / R_{\text{дел}} + 1 / [h_{11э} + R_{\text{кор}} \cdot (1 + h_{21э})]\}; \quad \tau_s = K_0 \cdot R_0 \cdot C_c; \quad \tau_r = R_0 \cdot C_c;$$

$$\tau_э = \tau_s + \tau_r + \tau \cdot \{R_0 / R_c + (R_0 / r_б) \cdot 1 / [1 + R_{\text{кор}} \cdot (1 + h_{21э}) / h_{11э}] + R_0 / R_{\text{дел}}\}.$$

Если нагрузкой служит эмиттерный повторитель, то ([6], с. 132):

$$R_0 = R_c \cdot R_{\text{дел}} \cdot h_{11э} / [h_{11э} \cdot R_{\text{дел}} + R_c \cdot R_{\text{дел}} \cdot (1 - K_{\text{ок}}) + R_c \cdot h_{11э}]; \quad \tau_s = K_{\text{ок}} \cdot R_0 \cdot C_c;$$

$$\tau_r = R_0 \cdot C_c; \quad \tau_э = \tau_s + \tau \cdot (R_0 / R_c + R_0 / R_{\text{дел}} + R_0 \cdot (1 - K_{\text{ок}}) / r_б) + \tau_r.$$

Методика расчета переходных характеристик некорректированных резисторных каскадов в области малых времен заключается в следующем.

Из формулы коэффициента усиления определяют эквивалентное сопротивление

$$R_0 = K \cdot h_{11э} / h_{21э}.$$

Затем находят постоянные времени  $\tau_i$  и  $\tau_s$ , определяют эквивалентную постоянную времени  $t_э$ , а по ней - время установления  $t_y = 2.2 \cdot \tau_э$ . Затем рассчитывают сопротивление коллекторной нагрузки, воспользовавшись формулой эквивалентного сопротивления  $R_0$ .

Методика расчета каскадов с цепями частотной коррекции и эмиттерного повторителя с нагрузкой в виде  $R_n$  и  $C_n$  ([6], с. 124, 125) заключается в следующем.

Исходя из требуемого коэффициента усиления, находят эквивалентное сопротивление  $R_0$  и далее сопротивление резистора  $R_{\text{кор}}$  (сопротивления  $R_k$  и  $R_{\text{дел}}$  предполагаются уже известными). Если  $R_0$  оказалось больше  $h_{11э}$ , то следует задаться другим, меньшим коэффициентом усиления.

Для схем с частотной коррекцией ориентировочно выбирают отношение  $\tau_c / \tau$  или  $\tau_L / \tau$  (предварительно его можно принять равным двум или трем, причем при расчете эмиттерного повторителя этими отношениями задаваться не нужно).

Определяют постоянные времени  $\tau_i$  и  $\tau_s$ .

Находят безразмерные эквивалентные постоянные времени  $\tau_э''$  и  $\tau_э'''$  ( $\tau_э' = \tau_c / \tau$  или  $\tau_э' = \tau_L / \tau$ ).

Рассчитывают коэффициенты  $a$  и  $b$  и по ним при  $b \leq 2$  с помощью графиков (см. рис. 12) находят обобщенное время установления  $t_y'$  по формуле Элмора:

$$t_y' = 2.2 \cdot \sqrt{b^2 - a^2} - 2.$$

Если выброс или обобщенное время установления оказались неприемлемыми, то следует задаться другим отношением  $\tau_c / \tau$  или  $\tau_L / \tau$  и повторить расчет.

Используя полученное значение  $t_y'$ , находят  $t_y$ .

Затем определяют индуктивность корректирующего дросселя или емкость конденсатора в цепи эмиттера (для соответствующих схем коррекции):

$$L = (\tau_L / \tau) \cdot \tau \cdot R_K; \quad C = (\tau_c / \tau) \cdot \tau / R_{\text{кор}}.$$

Расчет каскадов импульсных усилителей на полевых транзисторах ведут аналогично, учитывая отличие их эквивалентных схем замещения и параметров от схем замещения и параметров биполярных транзисторов.

Для этого в вышеприведенных соотношениях следует заменить отношения  $h_{11э} / h_{21э}$  или  $h_{11э} / (h_{21э} + 1)$  на  $S$ ,  $C_K$  на  $C_{12и}$ ,  $R_{\text{дел}}$  на  $R_{\text{вх}}$ ; в выражениях с  $h_{21э}$  или  $h_{11э}$  следует учитывать, что для полевого транзистора они очень велики, причем элементы, аналогичные  $r_{б}$  и  $r_{э}$ , у полевого транзистора практически отсутствуют.

### 5.2.5. Расчет вспомогательных элементов схем и их общих параметров

Определим параметры трансформатора, если использован трансформаторный каскад. В нем нагрузкой  $R_0$  является пересчитанное через коэффициент трансформации  $n$  и КПД трансформатора  $\eta_{\text{тр}}$  сопротивление нагрузки  $R_H$  (или входное сопротивление следующего каскада  $R_{\text{вх сл}}$ )

$$R_0 = \sqrt{R_H / (n \cdot \eta_{\text{тр}})}.$$

Отсюда коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{R_H / (\eta_{\text{тр}} \cdot R_0)}.$$

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток

$$r_1 = c \cdot R_0 \cdot (1 - \eta_{\text{тр}}); \quad r_2 = (1 - c) \cdot R_H \cdot (1 - \eta_{\text{тр}} / \eta_{\text{тр}}).$$

где  $c = 0.37$  для усилителя, работающего в классе А, и  $c = 0.58$  при его работе в классе В.

Выходное сопротивление транзистора в рабочей точке (см. рис. 11)

$$R_{\text{вых}} = \Delta U / \Delta I.$$

Индуктивность первичной обмотки и индуктивность рассеяния трансформатора

$$L_1 = (R_0 - r_1) / (2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot \sqrt{M_{\text{нн}}^2 - 1}); \quad L_S = (R_{\text{вых}} + R_0) \cdot \sqrt{M_{\text{вж}}^2 - 1} / (2 \cdot \pi \cdot f_B).$$

Определим вспомогательные элементы схемы с общим эмиттером на биполярном транзисторе.

Емкость конденсатора межкаскадной связи

$$C_{CB} = 1 / [2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_C + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{HI}^2 - 1}].$$

Емкость в цепи эмиттера

$$C_Э = [1 / (2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_Э)] \cdot \sqrt{[1 + [R_Э \cdot (1 + h_{21Э \text{ макс}})] / (R_{C \text{ общ}} + h_{11Э})]^2 - M_{HI}^2 / (M_{HI}^2 - 1)}.$$

В схеме с общим коллектором расчет  $C_{CB}$  ведется по аналогичной формуле с заменой  $R_{BX}$  на  $R_{BX \text{ ок}}$ .

В усилителе импульсных сигналов

$$C_{CB} \geq \tau_{И} / [(\Delta_{CB} \cdot (R_C + R_{BX}))]; \quad C_Э \geq (h_{21Э} + 1) \cdot t_{И} / (\Delta_Э \cdot h_{11Э})$$

где  $\tau_{И}$  - длительность импульса;

$\Delta_{CB}$ ,  $\Delta_Э$  - допустимый спад плоской вершины за счет действия емкости связи и емкости в цепи эмиттерной термостабилизации;

$R_C$  - сопротивление источника сигнала или выходное сопротивление предыдущего каскада;

$R_{BX}$  - входное сопротивление транзистора (в соответствующем включении), к которому подсоединена емкость связи.

Для схем с полевыми транзисторами емкость конденсатора связи

$$C_{CB} = 1 / [2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_C + R_{3 \text{ общ}}) \cdot \sqrt{M_{HI}^2 - 1}],$$

где  $R_{3 \text{ общ}} = R_3$  в схеме с одиночным сопротивлением в цепи затвора и

$$R_{3 \text{ общ}} = R_3 \cdot R_{3 \text{ доб}} / (R_3 + R_{3 \text{ доб}})$$

в схеме с двумя сопротивлениями.

Емкость в цепи истока

$$C_{И} = [1 / (2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_{И})] \cdot \sqrt{[(1 + R_{И} \cdot S) - M_{HI}^2] / (M_{HI}^2 - 1)}.$$

В усилителе импульсных сигналов  $C_{CB}$  рассчитывается по формуле, приведенной в расчете каскадов на биполярных транзисторах, а емкость в цепи истока

$$C_{И} \geq S \cdot \tau_{И} / \Delta_{И}.$$

Величины элементов фильтра в цепи питания

$$R_{\Phi} = U_{\Phi} / I_{П}; \quad C_{\Phi} = K / (2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_{\Phi}),$$

где  $U_{\Phi}$  - напряжение, падающее на  $R_{\Phi}$ , при известном токе  $I_{П}$ , протекающем через него.

Для расчета коэффициента гармоник каскада, работающего в режиме большого сигнала, нужно построить его сквозную динамическую характеристику. Для этого в точках пересечения нагрузочной прямой переменного тока со статическими выходными характеристиками транзистора (см. рис. 11) определяют коллекторные токи (от  $I_{К \text{ мин}}$  до  $I_{К \text{ макс}}$ ) и токи базы. По входной характеристи-



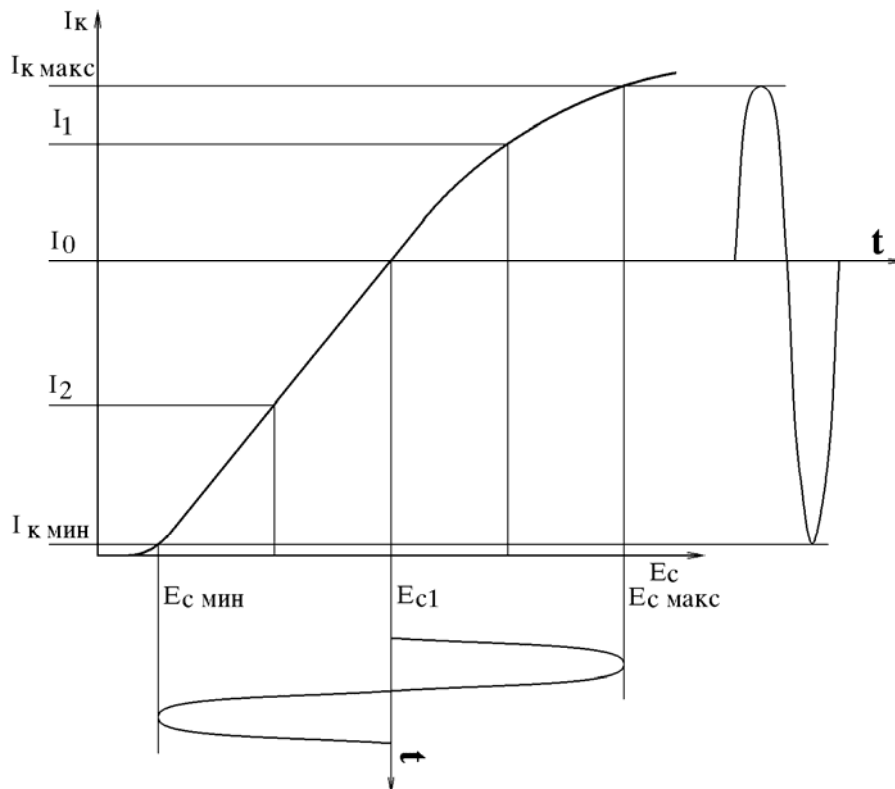


Рис. 13.

ке находят соответствующие этим токам напряжения  $U_{б}$  и вычисляют значения ЭДС источника сигнала

$$E_c = U_{бэ} + R_{с общ} \cdot I_б.$$

Полученные результаты записывают в виде таблицы (табл. 9) и по ним строят сквозную динамическую характеристику (рис. 13), т. е. зависимость  $I_k = f(E_c)$ .

Таблица 9

Величина	Точки графика						
	1	2	3	4	5	6	7
$I_k$							
$I_б$							
$U_{бэ}$							
$E_c$							

Для определения коэффициента гармоник каскада, работающего в классе А, размах входной ЭДС делят на четыре одинаковых отрезка и находят  $I_k макс$ ,  $I_1$ ,  $I_0$ ,  $I_2$ , и  $I_k мин$ . При этом  $I_{к0}$  (или  $I_{ст0}$ ) и  $I_0$  не обязательно будут совпадать.

По формулам

$$I_{1M} = (I_k макс - I_k мин + I_1 - I_2) / 3;$$

$$I_{2M} = (I_k макс + I_k мин - 2 \cdot I_0) / 4;$$

$$I_{3M} = [I_k макс - I_k мин - 2 \cdot (I_1 - I_2)] / 6;$$

$$I_{4M} = [I_k макс + I_k мин - 4 \cdot (I_1 + I_2) + 6 \cdot I_0] / I_2;$$

$$I_{ср} = [I_k макс + I_k мин + 2 \cdot (I_1 + I_2)] / 6$$

находят гармоники выходного тока и коэффициент гармоник каскада.

Коэффициент гармоник каскада при включении транзисторов по схемам с общим эмиттером и общим коллектором

$$K_{Г\text{ оэ}} = \sqrt{I_{2М}^2 + I_{3М}^2 + I_{4М}^2} / I_{1М}.$$

$$K_{Г\text{ ок}} = K_{Г\text{ оэ}} \cdot \gamma, \text{ где } \gamma = (R_{с\text{ общ}} + h_{11э}) / (R_{с\text{ общ}} + h_{11к}).$$

Если выходным каскадом является каскад с общим коллектором, то надо учитывать искажения и в предоконечном каскаде. Тогда общий коэффициент гармоник находят из соотношения

$$K_{Г\text{ общ}} = \sqrt{(I_{2М} \cdot \gamma / I_{1М} + I_{2М}' / I_{1М}')^2 + (I_{3М} \cdot \gamma / I_{1М} + I_{3М}' / I_{1М}')^2 + (I_{4М} \cdot \gamma / I_{1М} + I_{4М}' / I_{1М}')^2}$$

где штрихами обозначены гармонические составляющие выходного тока каскада с общим эмиттером, а величины без штрихов найдены для каскада с общим коллектором.

Общие частотные и переходные искажения вычисляют по ранее приведенным формулам с целью проверки результатов, полученных после проектирования отдельных каскадов. При этом общие значения искажений не должны превышать заданных цифр.

Данные расчеты рекомендуется заменить результатами моделирования с использованием прикладных программ Micro-Cap, Multisim (Electronics Workbench) и аналогичных им (см. [3]).

#### 5.2.6. Особенности расчета каскадов на микросхемах

Расчет параметров усилителей на микросхемах мало, чем отличается от вышеприведенного. При этом совсем не обязателен расчет внутренних элементов микросхем. В то же время должны быть обязательно рассчитаны все навесные элементы, параметры схемы, определяющие характеристики усилителя, и необходимые данные для расчета соседних каскадов.

Если в справочных данных на микросхему отсутствуют необходимые для проектирования устройства параметры (например, напряжения, токи, сопротивления, емкости в точке подключения навесных элементов), то их приходится вычислять. Это можно сделать, найдя распределение напряжений и токов в микросхеме. Для этого задаются током выходного каскада на уровне (0.4 ... 0.6) от максимального, определяемого при полностью открытом транзисторе. Затем находят падение напряжения в цепи эмиттерной термостабилизации и суммируют его с напряжением между базой и эмиттером транзистора, которое для кремниевых кристаллов составляет примерно  $U_{бэ} = 0.7$  В. Эту сумму напряжений вычитают из общего напряжения питания микросхемы. При непосредственной межкаскадной связи полученное падение напряжения приложено к коллекторной нагрузке предыдущего каскада. Зная ее, по закону Ома можно найти протекающий ток и т.д. Определив все токи в цепях активных элементов и делителях напряжений, суммируют их и сравнивают с потребляемым микросхемой током. В случае если полученная сумма будет отличаться более

чем на 20% от паспортного, корректируют значение тока покоя выходного каскада и повторяют расчет.

Так как параметры бескорпусных транзисторов (например, КТ317, КТ319, КТ324, КТ331, КТ333, КТ359 и др.), входящих в состав микросхем, близки, то при расчетах можно пользоваться их усредненными значениями:

$$|\beta|_{100 \text{ МГц}} = 3; h_{21Э} = (30 \dots 90); C_K \leq 5 \text{ пФ}; \tau_K \leq 100 \text{ пс}.$$

В крайнем случае, для грубой оценки параметров схемы с общим эмиттером можно воспользоваться следующими соотношениями ([10] с. 126).

Коэффициенты усиления каскада по напряжению без обратной связи  $K$  и с последовательной обратной связью по току  $K_{oc}$

$$K = 40 \cdot I_0 \cdot R_H, \quad K_{oc} = R_H / R_Э;$$

Входное сопротивление транзистора без обратной связи  $h_{11Э}$  и с последовательной обратной связью  $h_{11Э oc}$

$$h_{11Э} = h_{21Э} / (40 \cdot I_0), \quad h_{11Э oc} = h_{11Э} + R_Э \cdot (1 + h_{21Э}).$$

### 5.3. Расчет источника вторичного электропитания

Расчет источника вторичного электропитания проводят в следующем порядке. Сначала определяют ток, потребляемый от источника питания, напряжение на входе фильтра, максимальное обратное напряжение диодов выпрямителя, средний ток, протекающий через диоды. По этим данным выбирают диоды.

Затем находят сопротивление вторичной обмотки трансформатора, напряжение на ней и ток. Определяют ток в первичной обмотке, габаритную мощность трансформатора. Далее ведут расчеты элементов фильтрации напряжений.

При необходимости иметь различные, не связанные между собой источники напряжений расчет ведут аналогично для каждого из них.

В устройствах средней мощности обычно используют мостовую схему выпрямления (рис. 14). Поэтому методику расчета источника питания покажем именно на этой схеме. В ней к диодам прикладывается вдвое меньшее напряжение, рассеивается меньшая мощность, лучше используется трансформатор.

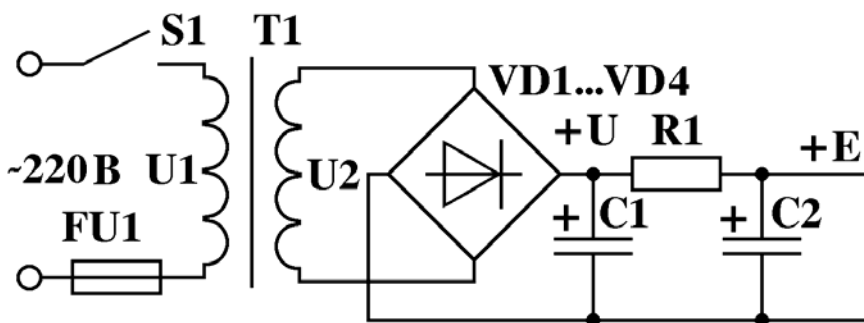


Рис. 14.

Частота пульсаций  $f_{п}$  в два раза выше частоты питающей сети.

Сначала находят общий ток  $I$ , потребляемый устройством, складывающийся из токов покоя, токов базы и базовых делителей каскадов, а также

средних выходных токов транзисторов, работающих в классе В или АВ.

Напряжение на входе фильтра выпрямителя

$$U = E / 0.8.$$

Максимальное обратное напряжение диодов  $U_{обр} = 1.5 \cdot U$ .

Средний ток, протекающий через диод,  $I_{cp} = 0.5 \cdot I$ .

По этим данным из справочника выбирают диоды, следя за тем, чтобы для них не были превышены максимально допустимые напряжение и ток. Отмечают значение внутреннего сопротивления  $R_i$  диодов, которое должно быть по возможности малым.

Находят сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_{2тр} = 0.148 \cdot U / (I \cdot \sqrt[4]{U \cdot I}).$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = 0.75 \cdot U + I \cdot 1.89 \cdot (2 \cdot R_i + R_{2тр}).$$

Ток во вторичной обмотке

$$I_2 = 1.41 \cdot I + 0.0166 \cdot U / (2 \cdot R_i + R_{2тр}).$$

Ток в первичной обмотке, подключенной к сети переменного тока с напряжением  $U_1$

$$I_1 = 1.2 \cdot U_2 \cdot I_2 / U_1.$$

Габаритная мощность трансформатора  $P_T = 1.7 \cdot U_2 \cdot I_2$ .

Емкость конденсатора на входе фильтра  $C1 = 0.08 \cdot I / U$ .

Рабочее напряжение конденсатора  $U_c > 1.2 \cdot U$ .

Амплитуда допустимого напряжения пульсаций при известном динамическом диапазоне сигнала  $D_c$ , выходном сопротивлении оконечного каскада  $R_{вых}$  и сопротивлении нагрузки  $R_H$

$$U_{\Pi} = (0.3...1) \cdot (R_{вых} + R_H) \cdot U_{вых макс} / (D_c \cdot R_H).$$

Если динамический диапазон сигнала неизвестен, то его можно взять на уровне (40...60) дБ (т.е. (100...1000) раз).

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра

$$K_{\Pi вых} = U_{\Pi} / E.$$

Коэффициент пульсаций на входе фильтра

$$K_{\Pi вх} = 0.01 \cdot I / (U \cdot C1).$$

Необходимый коэффициент сглаживания пульсаций

$$q = K_{\Pi вх} / K_{\Pi вых}.$$

Количество звеньев фильтра выбирают по значению коэффициента сглаживания пульсаций  $q_{зв}$ , который для одного звена не рекомендуют брать более 25...40. Тогда количество звеньев

$$n = \lg(q) / \lg(q_{зв})$$

округляют до ближайшего целого числа и находят уточненный коэффициент сглаживания пульсаций одним звеном

$$q_{зв} = \sqrt[n]{q} .$$

Для фильтрации напряжения можно выбрать простую и эффективную схему с П-образными RC или LC - фильтрами в зависимости от общего потребления устройства.

При токах свыше 50...100 мА чаще всего используют LC - фильтры, в которых емкости фильтра С проще всего выбрать одинаковыми и равными по величине емкости на входе С1.

Индуктивности дросселей

$$L = 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot (q_{зв} + 1) / C.$$

Если использован RC - фильтр, то сначала определяют по допустимому падению напряжения на одном звене  $U_{зв}$  величину сопротивления

$$R_{зв} = U_{зв} / I,$$

после чего вычисляют величины емкостей  $C = q_{зв} / (2 \cdot \pi \cdot f_{П} \cdot R_{зв})$ .

Общую схему рассчитанного устройства оформляют в соответствии с действующими стандартами.

#### Литература

- 1) Сафоненков Ю.П. Схемотехника. Часть 1. Основы теории аналоговых схем: Тексты лекций. – М., МГТУ ГА, 2006.
- 2) Ю.П. Сафоненков Схемотехника. Часть 1. Аналого-дискретные устройства: Тексты лекций. – М.: МГТУ ГА, 2007.
- 3) Сафоненков Ю.П. Проблемно-ориентированные пакеты прикладных программ в радиотехнике: Тексты лекций. – М.: МГТУ ГА, 2005.
- 4) Проектирование усилительных устройств; Под ред. Н.В.Терпугова. – М.: Высшая школа, 1985.
- 5) Проектирование усилительных устройств на транзисторах; Под ред. Г.В. Войшвилло. – М.: Связь, 1972.
- 6) Варшавер Б.А. Расчет и проектирование импульсных усилителей. – М.: Высшая школа, 1973.
- 7) Александрова Т.С. Проектирование усилителей телевизионных сигналов. – М.: Связь, 1971.
- 8) Цыкина А.В. Проектирование транзисторных усилителей низкой частоты. – М.: Связь, 1968.
- 9) Кожарский Г.В., Орехов В.И. Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1985.
- 10) Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В., Трискало А. Усилительные устройства. Сборник задач и упражнений; Под ред. Г.В.Войшвилло. - М.: Радио и связь, 1986.

11) Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник; Под ред. Б.Л.Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981.

12) Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник; Под ред. С.В.Якубовского. – М.: Радио и связь, 1989.

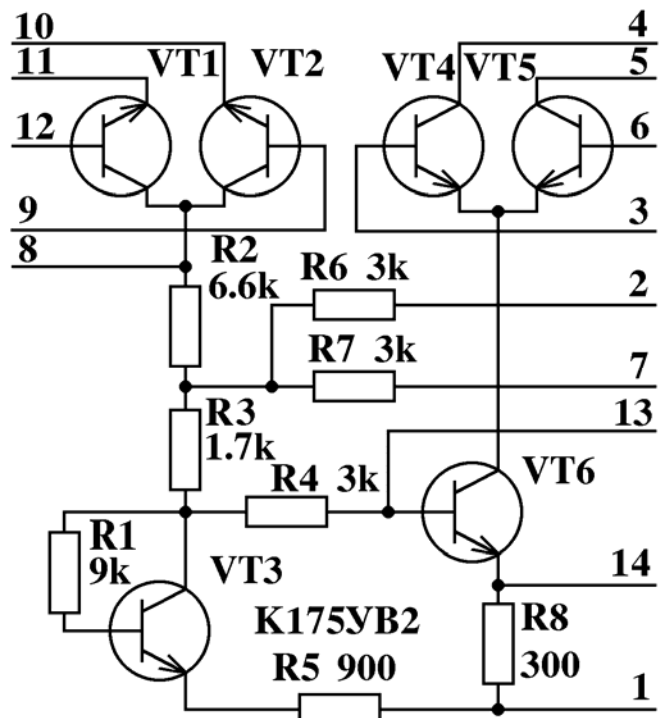
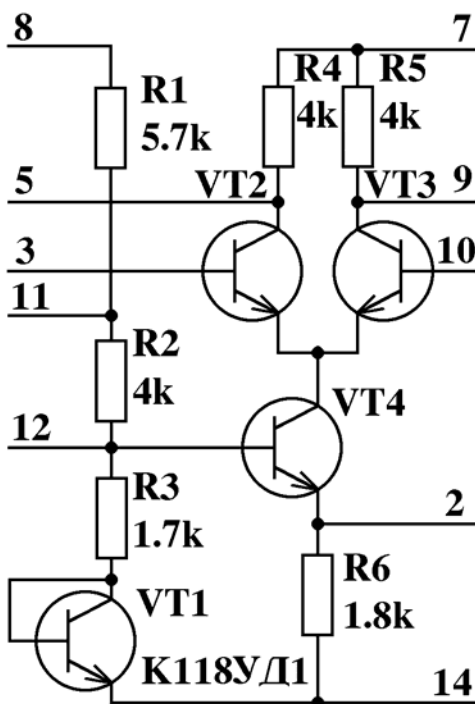
13) Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности: Справочник / Под ред. А.В.Голомедова. М.: Радио и связь, 1989.

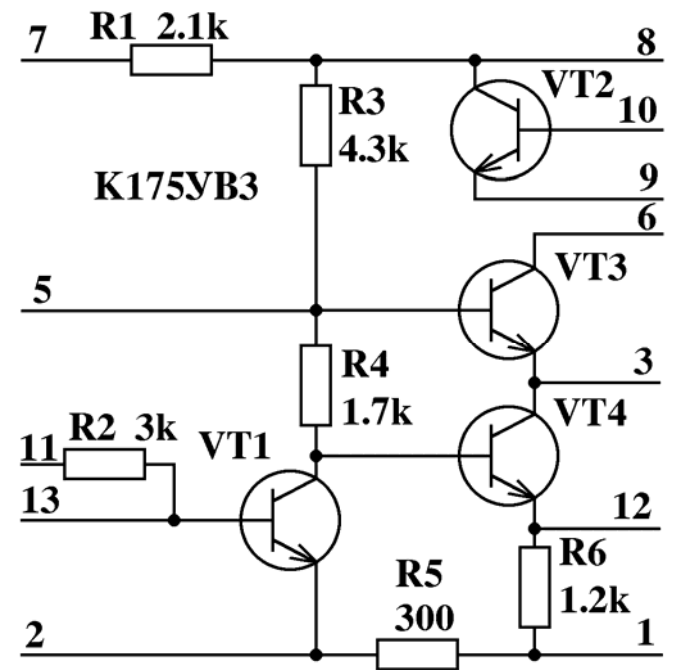
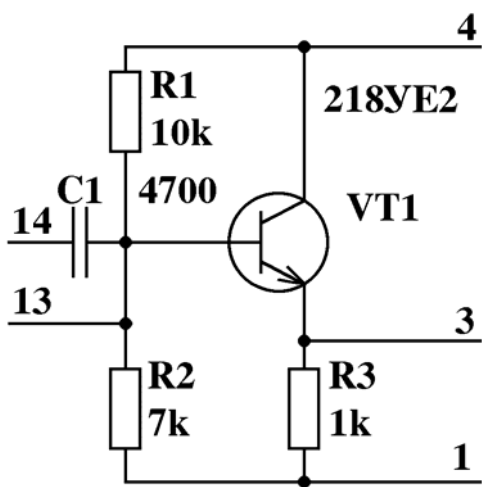
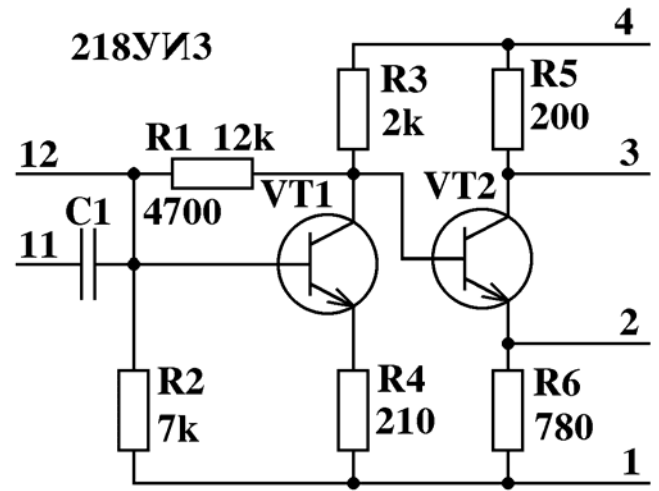
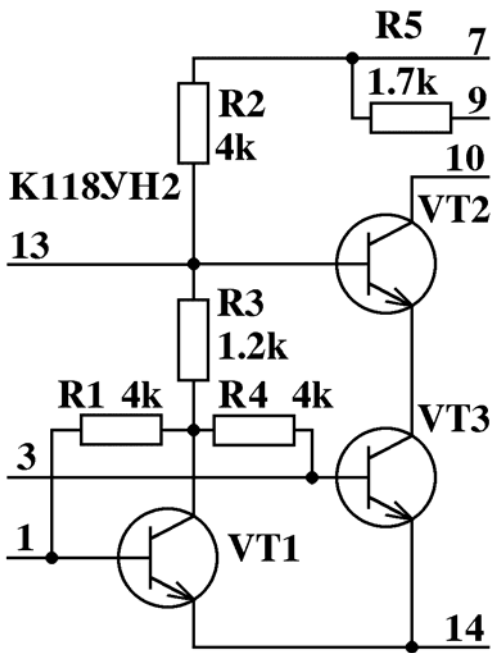
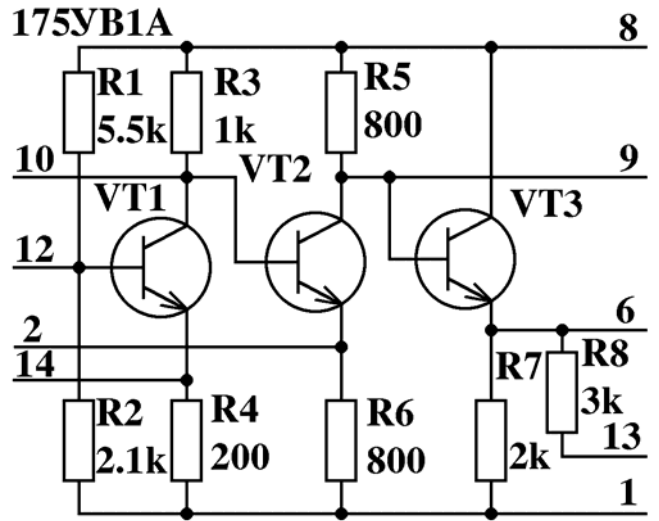
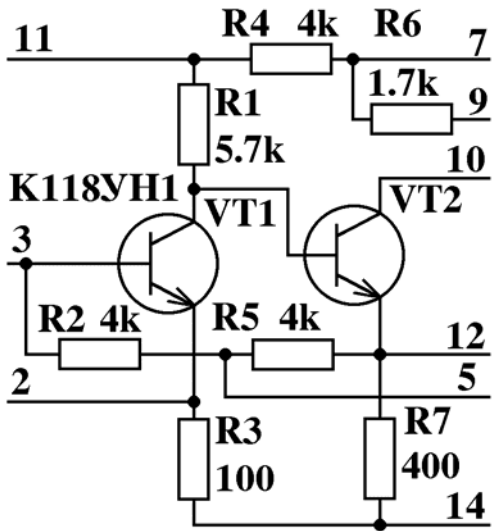
14) Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник / Под ред. А.В.Голомедова. – М.: Радио и связь, 1989.

## Приложение 1

## Справочные данные микросхем

Параметр	Тип							
	К118 УН1А	К118 УН2Б	К118 УД1Б	К175 УВ1А	К175 УВ2А	К175 УВ3Б	218 УЕ2	218 УИ3
$U_{П}$ , В	+ 6.3	+ 6.3	+ 6.3	+ 6.3	+ 6.0	+ 6.0	+ 6.3	+ 6.3
$I_{П}$ , мА	3.5	3	1.3	4.5	3.5	20	5.2	7.7
К	250	25	22	10	-	-	0.85	3.5
f, МГц	0.012	0.012	0.012	1	-	-	-	-
К	30	8	8	-	-	-	-	-
f, МГц	6	5	5	-	-	-	-	-
$R_{ВХ}$ , кОм	2	1	6	1	1	-	3.5	1
$R_{ВЫХ}$ , кОм	1.2 – 3	1.2 – 3	3 – 7	0.075	-	-	-	-
$f_{В}$ , МГц	-	-	-	30	40	3	-	-
S, мА/В	-	-	-	-	10	400	-	-
$C_{ВХ}$ , пФ	-	-	-	-	-	50	-	-
$t_{v}$ , мкс	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1





## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	3
2. СОДЕРЖАНИЕ И ТЕМЫ КУРСОВЫХ РАБОТ .....	3
3. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ .....	5
4. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	6
4.1. Оформление пояснительной записки .....	6
4.2. Оформление структурной схемы .....	10
4.3. Оформление принципиальной электрической схемы .....	10
4.4. Оформление перечня элементов .....	11
4.5. Оформление расчетов на ЭВМ .....	13
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	13
5.1. Предварительный расчет .....	13
5.2. Электрический расчет каскадов .....	20
5.3. Расчет источника вторичного электропитания .....	43
Литература .....	45
Приложение 1 .....	46