

# Методические указания по курсовому проектированию

1. Задание на курсовое проектирование
2. Варианты заданий.
3. Рекомендованная литература.
4. Требования к оформлению расчетно-пояснительной записки.
5. Титульный лист расчетно-пояснительной записки.
6. Примерное оглавление расчетно-пояснительной записки.
7. Номинальные значения элементов.

## ЗАДАНИЕ

на курсовое проектирование по курсу ЭЛЕКТРОНИКА  
для студента \_\_\_\_\_ группы КА-\_\_\_\_\_  
вариант \_\_\_\_\_

Выбрать и рассчитать схему усилителя переменного сигнала на основе операционного усилителя с оконечным каскадом на биполярных транзисторах, работающего от источника напряжения с ЭДС генератора  $E_r=0.5$  мВ и выходным сопротивлением  $R_r$ . Усилитель имеет дифференциальный вход и бестрансформаторный выход с выходным напряжением  $U_{\text{ВЫХ.макс}}$ . Схема работает на нагрузку с сопротивлением  $R_H$ , зашунтированную конденсатором  $C_H$ . В схеме предусмотреть плавную регулировку усиления от 0 до  $U_{\text{ВЫХ.макс}}$ .

Коэффициент частотных искажений на граничных частотах  $f_H$  и  $f_B$  не должен превышать заданных значений  $M_H$  и  $M_B$ . Усилитель должен работать в диапазоне температур  $-25 \dots +60^\circ\text{C}$ . Коэффициент нелинейных искажений не должен быть больше 1%.

В схеме усилителя предусмотреть не более двух источников питания, для чего следует рассчитать фильтры в цепях питания с коэффициентом пульсаций не превышающим **1,5 %**

### Варианты заданий

Таблица

№ № вар.	$U_{\text{ВЫХ.}}$ макс В	$R_H$ Ом	$R_\Gamma$ кОм	$C_H$ пФ	$f_H$ Гц	$f_B$ кГц	Мн;Мв дБ
I	20	160	4.3	75	40	8.2	3,2
2	20	300	3.6	100	65	9,0	2,8
3	20	360	5,6	68	35	7,5	3,1
4	20	220	3.3	91	50	8,2	2,7
5	20	180	6,2	75	40	8,0	3.2
6	20	270	4,7	68	60	8,8	2.8
7	20	510	7.5	75	50	8,2	3,1
8	20	430	5,1	91	40	6,5	2,9
9	20	330	6.8	47	75	9.0	3,2
10	20	430	8.2	50	45	7,8	2,7
II	25	270	3.0	75	70	8,8	3,1
12	25	330	2,7	68	60	8.5	2,9
13	25	240	3,9	50	55	8,0	3.2
14	25	360	4,7	91	40	8,0	2,8
15	25	430	7.5	47	55	8,5	3,1
16	25	390	5,1	74	70	8.3	2,9
17	25	270	8.2	45	75	8,0	3,2
18	25	360	4,3	100	60	9,0	2,6
19	25	240	5,6	47	75	9.2	3,1
20	28	470	3,6	50	40	7,5	2,7
21	28	330	3,3	75	55	7,0	3,2
22	28	750	3.0	91	50	8,0	2,8
23	28	510	6.8	47	60	9,2	3,1

24	28	470	5.1	75	65	8,5	2.9
25	28	820	5.6	82	50	7,0	3,2
26	28	560	3.9	50	70	9,2	2.7
27	28	430	8,2	68	60	8,5	3,2
28	28	480	4.7	82	45	7,0	2,8
29	28	640	6,2	47	65	7,8	3.1
30	28	390	5,1	82	75	9,5	2,9
31	30	560	6.2	91	40	8.5	2,8
32	30	680	5,6	100	55	8,6	3,1
33	30	750	7.5	68	45	9.0	3,2
34	30	820	4,7	82	75	6.2	3,1
35	30	910	7,5	91	60	8,6	3,2
36	30	1000	6,8	75	50	9,2	3,1
37	30	1200	4,3	100	65	8,0	2.8
38	35	640	4,7	50	42	8.5	3,1
39	35	560	8,2	75	35	9,0	2,9
40	35	510	9,6	47	60	8,7	3,2
41	35	360	3,0	75	45	9.2	2,9
42	35	390	6,8	70	50	8,0	3,1
43	35	430	8.5	50	40	9.2	3.2
44	35	470	5,6	100	65	9.9	2,9
45	35	510	4,7	82	45	8,8	3,1
46	35	560	3,5	91	55	9.2	3,2
47	40	430	5,6	70	60	9,0	2,9
48	40	510	3,3	75	70	8,2	3,1
49	40	560	5,1	100	65	8.7	3.2
50	40	680	4,3	82	90	8.5	2,8
51	40	680	10,0	50	45	9.2	3.1
52	40	390	5,1	75	70	8.2	2,9

53	45	510	3.6	68	55	9.0	3.1
54	45	430	4,7	75	60	8,7	2,9

## Литература (Рекомендованная)

1. Бабенко В.П., Изъюрова Г.И. Основы радиоэлектроники. Пособие по курсовому проектированию. М.: МИРЭА,-1985, - 68 с., ил.
2. Бабенко В.П., Изъюрова Г.И. ОУ в усилительных устройствах: Учеб. пособие /Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) – М., 1994. – 74 с.
3. Цыкина А.В. Проектирование транзисторных усилителей низкой частоты. М.: Связь, 1981, - 184 с., ил.
4. Проектирование транзисторных усилителей звуковых частот / Безладнов Н.Л., Герценштейн Б.Я., Кожанов В.К.; Под ред. Н.Л. Безладнова. - М.: Связь, 1978, - 368 с. ил.
5. Операционные усилители и компараторы. – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2002. – 560 с.
6. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник /Б.П. Кудряшов, С.В. Назаров, Б.В. Тарабрин, В.А. Ушибышев.- М.: Радио и связь, 1981,-160 с., ил,- ( Массовая радиобиблиотека ;Вып. 1033 ).
7. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. Изд. 3-е, переработ. и доп. М., Энергия. 1972. - 568с. с ил.;
8. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: / Справочник – 2-е изд. стереотип.- А.Б. Гитцевич , А.А. Зайцев , В.В. Мокряков и др. Под ред. А.В. Голомедова.- М.: КУБКа, 1994 – 528 с.; ил.;
9. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник / К.М. Брежнева, Е.И. Гантман, Т.И. Давыдова и др. Под ред. Б.Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981,- 656 с., ил.
10. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / В.А. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др. Под общей ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985,- 904 с., ил.
11. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы : Справочник / Б.А. Бородин, В.А. Ломакин, В.В. Мокряков и др. Под ред. А.В. Голомедова.- М.: Радио и связь, 1985,- 560 с., ил.

## **Требования** *к оформлению расчетно-пояснительной записки курсового проекта.*

1. Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) представляется в сброшюрованном виде на листах формата А4 с текстом на одной странице. Текст всей работы может быть выполнен в рукописном виде или на компьютере с шрифтом размером 14 pt с обязательным двухсторонним симметрированием. Поля на листе должны быть следующими: слева – 3 см, справа, сверху и снизу – 2,5 см.
2. Титульный лист обязательно должен быть выполнен на компьютере в соответствии с требованиями. Образец выполнения титульного листа приведен в приложении. Наличие подписи исполнителя и даты является обязательным условием.
3. 2-ой лист РПЗ должен содержать оглавление с указанием номеров страниц.
4. Каждый раздел РПЗ должен начинаться с новой страницы. Заголовок раздела должен быть выделен или подчеркнут. Сокращения слов или их аббревиатура в заголовках не допустимы.
5. Текст подраздела не должен начинаться с новой страницы. Заголовок подраздела должен отличаться от текста.
6. Рисунки выполняются на отдельных листах и следовать по тексту. Когда рисунок выполнен на отдельном листе, то этот лист должен следовать на следующем листе РПЗ после ссылки на него в тексте. Если на одном листе представлены несколько рисунков, то следующие могут опережать текст, с обязательными ссылками на эти рисунки. Нумерация элементов на рисунке производится слева – направо и начинается с 1. Названия элементов следующие: резистор – R, конденсатор – C, диод – VD, транзистор – VT, операционный усилитель – DA, источник питания – E.
7. Каждый рисунок должен иметь номер и название. По осям графиков должны быть указаны величины и их размерности.
8. Нумерация рисунков должна состоять из двух чисел, первое – номер раздела, второе порядковый номер рисунка в данном разделе. В подразделе отдельная нумерация рисунков не допускается.
9. Разрешается выполнять рисунки ручным способом.
10. В тексте РПЗ обязательно должны быть ссылки на рисунки или таблицы.
11. Каждый лист РПЗ, в том числе и с рисунками, должен иметь номер, который указывается в правом верхнем углу.
12. Вся нумерация в тексте РПЗ должна проводиться только арабскими цифрами.

## *Оглавление* (примерное)

	Приблиз.страницы
1. Задание на курсовое проектирование _____	3
2. Выбор и обоснование схемы усилителя _____	4
3. Расчёт выходного каскада _____	8
3.1. Выбор схемы усилителя мощности _____	8
3.2. Выбор транзисторов _____	13
3.3. Выбор ОУ для схемы выходного каскада _____	14
3.4. Полный расчёт бустера выходного каскада _____	15
3.5. Построение выходной ВАХ _____	20
3.6. Оценка усилительных свойств выходного каскада _____	23
3.6.1. Графический метод _____	23
3.6.2. Аналитический метод _____	23
3.6.3. С учетом местной обратной связи _____	23
3.7. Оценка нелинейных искажений _____	23
4. Расчёт предварительных усилителей _____	26
4.1. Выбор ОУ для предварительного усилителя _____	26
4.2. Расчёт входного дифференциального каскада _____	26
4.3. Расчёт 1-го промежуточного каскада _____	27
4.4. Расчет 2-го каскада _____	28
4.5. Построение ЛАЧХ $i$ -го каскада _____	30
5. Полный расчёт схемы усилителя _____	31
5.1. Оценка усилительных свойств схемы _____	31
5.2. Расчёт емкостей разделительных конденсаторов _____	32
5.3. Проверка работы в области ВЧ _____	33
5.4. Расчёт КПД _____	34
5.5. Расчёт фильтров в цепях питания ОУ _____	35
5.6. Электрическая схема и спецификация элементов _____	37
Список использованной литературы _____	42

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

# Курсовой проект

по электронике

на тему: **Расчет усилителя мощности**  
вариант \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)  
Факультет \_\_\_\_\_  
Группа \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Научный руководитель  
Доц. Савицкий В.А.

Москва 2005 г.

### *Список номинальных значений*

1. Напряжений источников постоянного питания:  
9, 12, 15, 20, 27, 30, 40, 48, 60, 80, 100.
2. Сопротивлений резисторов:  
10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36,  
39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91.
3. Емкостей конденсаторов (мкФ):  
10, 12, 15, 18, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80.

## 1.Задание на курсовое проектирование

В 1-ом разделе представляется задание на курсовое проектирование с указанием номера варианта и числовых данных для данного варианта.

Таблица 1.1

№	$U_{\text{ВЫХ}}_{\text{макс}}$ В	$R_{\text{H}}$ Ом	$R_{\text{Г}}$ кОм	$C_{\text{H}}$ пФ	$F_{\text{H}}$ Гц	$F_{\text{В}}$ кГц	$M_{\text{H}}; M_{\text{В}}$ дБ
—	—	—	—	—	—	—	—

## 2. Выбор и обоснование схемы усилителя

Во 2-ом разделе РПЗ проводится общий расчет усилителя мощности с представлением структурной схемы.

Сначала находится выходной ток или ток в нагрузке:

$$I_{\text{вых. max.}} = \frac{U_{\text{вых. max.}}}{R_n} \quad (\text{мА}), \text{ где } U_{\text{вых. max.}} = U_n$$

Затем производится вычисление тока генератора:

$$I_G = \frac{E_G}{R_G} \quad (\text{мкА})$$

Рассчитывается коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых. max.}}}{I_G}$$

Находится требуемый коэффициент усиления по напряжению  $K_{U_G}$

$$K_{U_G} = \frac{U_{\text{вых. max.}}}{E_G}$$

Мощность сигнала в нагрузке может быть найдена как

$$P_n = \frac{U_n^2}{2R_n}$$

Соответственно, коэффициент передачи по мощности

$$K_P = K_U \cdot K_I$$

Пересчитаем полученные величины в (дБ) из условия  $1\text{дБ}=20 \lg K$  и получим

$$K_{U_G(\text{дБ})}, K_{I(\text{дБ})}, K_{P(\text{дБ})} = 10 \cdot \lg K_U \cdot K_I (\text{дБ}).$$

Исходя из условия, что на один каскад усиление принимается 20 – 40 (дБ), принимается  $K_{U_i} = \dots$  дБ близкое к максимальному значению и находится необходимое число каскадов  $N$  рассчитываемой схемы

$$N = \frac{K_{U(\text{дБ})}}{K_{U_i(\text{дБ})}}$$

Полученный результат округляется в сторону большего значения. Принимаем число каскадов схемы усилителя мощности  $N = \underline{\hspace{2cm}}$

Схема включения входного каскада выбирается в зависимости от заданного источника входного сигнала и фазовых соотношений между входным и выходным сигналом. Этот каскад обеспечивает согласование усилителя с источником сигнала. В нашем случае, согласно заданию входной каскад усилителя мощности имеет дифференциальный вход и показан на схеме рис.2.1.

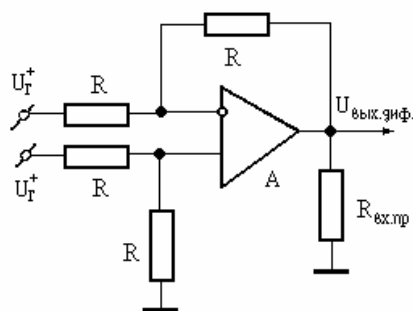


Рис.2.1. Схема входного дифференциального каскада

Схемы промежуточных каскадов также выполнены на операционных усилителях, и являются усилителями с глубокой обратной связью. Вариант схемы промежуточного каскада приведен на рис. 2.2

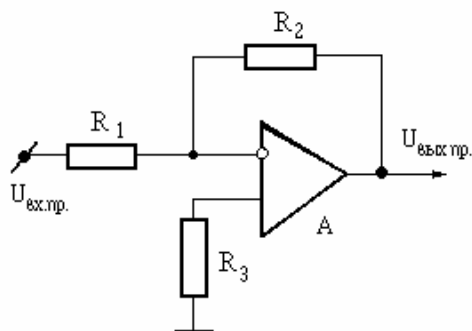


Рис.2.2. Схема промежуточного каскада

Выходной (оконечный каскад) выполнен по схеме бустера напряжения или тока. Элемент обратной связи позволяет обеспечить необходимое усиление. За счет введения отрицательной ОС существенно улучшаются такие показатели работы схемы, как коэффициент нелинейных искажений и стабильность работы каскадов схемы.

Предполагаемая структурная схема усилителя мощности будет иметь вид (рис.2.3):

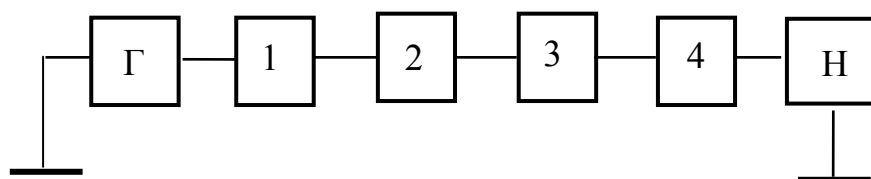


Рис.2.3. Структурная схема усилителя мощности.

На схеме приняты обозначения элементов:

Г. – Генератор;

1. – Входной каскад; регулировка усиления предусматривается во входном каскаде;

2, 3. – 1-ый и 2-ой промежуточные каскады;

4. – Оконечный каскад – бустер;

Н. – Нагрузка в виде сопротивления, зашунтированного конденсатором.

### 3. Расчет выходного каскада

3-ий раздел «Расчет выходного каскада» включает в себя несколько подразделов.

#### 3.1. Выбор схемы усилителя мощности

В подразделе 3.1 проводится обзор литературных источников в порядке, приведенном в списке использованных источников. Необходимо сделать обзор не менее 3-х схем с представлением рисунков. Для каждой из приведенных схем бустеров напряжения или тока дается краткое описание принципа работы, приводятся достоинства и недостатки. Например, если выбрана схема инвертирующего бустера напряжения с управлением по цепям питания ОУ (рис. 3.1), то следует указать в заключение подраздела 3.1, что на основании проведенного обзора, сравнения достоинств и недостатков вышеприведенных схем, к дальнейшему расчету принимается схема бустера напряжения с управлением по цепям питания ОУ, изображенная на рисунке, например, 3.1.

#### 3.2. Выбор транзисторов

В подразделе 3.2 производится выбор транзисторов для схемы выходного каскада. Предварительно производится выбор напряжения источника питания.

В качестве примера показан расчет схемы, изображенной на рис.3.1.

Напряжение источника питания находится из условия

$$E_{П} = U_{Н} + U_{кэ.мин}, \text{ обычно } U_{кэ.мин} \approx 3 \div 4 \text{ (В)}.$$

Из списка номинальных значений напряжений источников постоянного питания выбирается необходимое значение и принимается величина  $E_{н}$ .

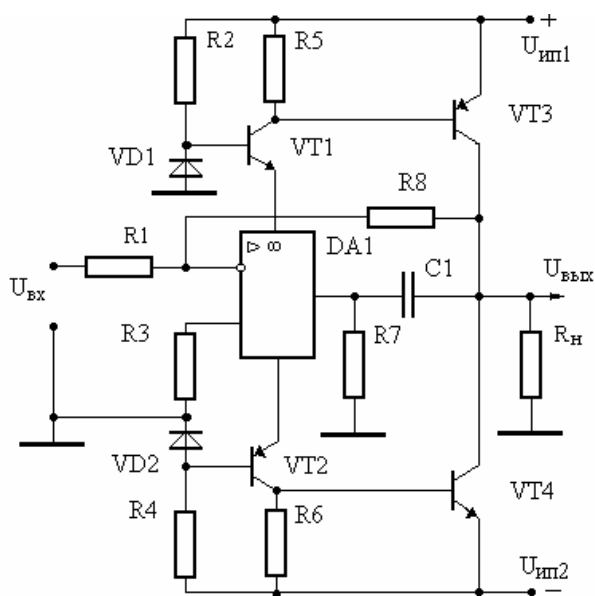


Рис. 3.1 Схема бустера напряжения с управлением по цепям питания ОУ

Рассчитывается мощность, потребляемая оконечным каскадом

$$P_{u.n.} = 2E_n \cdot I_{к.ср}$$

где  $I_{к.ср}$  – средний ток транзисторов при максимальной амплитуде.

$$I_{к.ср} = \frac{I_{к.маx}}{\pi} \approx \frac{I_n}{\pi} \text{ (мА)}$$

Соответственно определяется значение мощности  $P_{u.n.}$  (Вт)

Далее рассчитывается мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора выходной цепи

$$P_k = \frac{P_{ИП.} - P_{вых.}}{2},$$

$$\text{если } P_{вых.} = \frac{U_{вых.маx} \cdot I_n}{2} \text{ (Вт)}$$

При этом следует иметь в виду, что  $P_{k1} = P_{k2} = P_k$

Выбирается пара комплементарных транзисторов  $T_1, T_2$  средней мощности (рекомендуется 600 серия), которые должны удовлетворять следующим условиям.

- $I_{к1маx} = I_{к2маx} = I_n < I_{кдоп}$  (100 мА < 5 А)
- $U_{кэдоп} \geq 2 E_n$  (80 В > 50 В)
- $P_{к1} = P_{к2} \leq P_{кдоп}$  (0.8 Вт < 1.5 Вт)
- $f_B < f_{B1} = f_{B2}$  (8.5 кГц < 40 кГц)

где  $I_{кдоп}, U_{кэдоп}, f_B$  – предельные параметры транзисторов.

На основании этих условий выбирается пара комплементарных транзисторов \_\_\_\_\_, имеющая параметры [1, 2, 9, 10, 11]

**Таблица 3.1**

Тип транзистора		$I_{к.доп.}$ (А)	$U_{кэ.доп.}$ (В)	$P_{к.доп.}$ (Вт)	$f_\beta$ (МГц)	$h_{21Э}$ от – до
P-N-P	N-P-N					

### 3.3. Выбор операционного усилителя для схемы выходного каскада

В подразделе 3.3 осуществляется выбор операционного усилителя для схемы бустера.

Выбор производится из следующих соображений:

- По напряжению  $U_{вых.ОУ} \leq U_n$
- По току:

Рассчитаем ток потребления ОУ  $I_{потреб.ОУ}$ , исходя из базового тока выходного транзистора схемы. Если считать, что для бустера напряжения

$$I_{Б.} = (10 \div 20)\% \cdot I_{\text{потреб. ОУ}}$$

$$I_{Б.} = \frac{I_H}{\beta_{\text{при } I_K = I_H}} \text{ (мА)}$$

тогда  $I_{\text{потреб. ОУ}} = 10 \cdot I_{Б.}$

Для бустера тока справедливы соотношения:

$$I_H = I_{\text{вых}} = 0,9 \cdot I_{\text{вых. ОУ}}. \text{ В свою очередь } I_{\text{вых. ОУ}} = 0,9 \cdot I_{\text{потреб. ОУ}}$$

Таким образом, значение  $I_{\text{потреб. ОУ}}$  оказывает влияние на выбор ОУ для бустера напряжения.

- По частоте усиливаемого сигнала

$f > f_{\text{в}}$ , где  $f = f_T$  и  $f_{\text{в}}$  верхняя граничная частота (из задания),

Исходя из вышеперечисленных условий, производится выбор ОУ для бустера [1, 2, 5]. Принимается ОУ \_\_\_\_\_, параметры которого представлены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2**

Тип	U <sub>ИП</sub> В	I <sub>потреб</sub> мА	U <sub>вых</sub> макс. В	R <sub>Н.мин</sub> кОм	K <sub>у</sub> собствен. коэф. усилн.	U <sub>вх.</sub> сф макс. В	I <sub>вх.</sub> нА	ΔI <sub>вх.</sub> нА	R <sub>вх.</sub> МОм	R <sub>вых.</sub> Ом	f <sub>T</sub> МГц	Внут рен няя кор рек ция

Функциональная и принципиальная электрические схемы данного ОУ (например) представлены на рисунке 3.2.

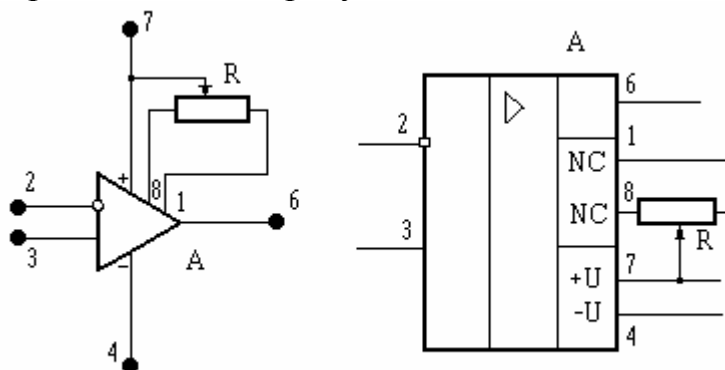


Рис.3.2. Электрическая схема операционного усилителя типа \_\_\_\_\_

### 3.4. Полный расчет бустера

В подразделе 3.4 проводится полный расчет схемы выходного каскада, электрическая схема которого изображена на рис.3.1, если выбрана схема бустера напряжения, управляемого по цепям питания ОУ.

Сопротивление резистора  $R_7$  выбирается из условия максимального тока, потребляемого операционным усилителем  $R_7 \cong 0,5 R_{\text{н.мин. ОУ}}$

Определим токи через транзисторы VT<sub>3</sub>, VT<sub>4</sub>

$$I_{к.3,4,max} = I_H + I_{к.min} \text{ (мА)}$$

где ток  $I_{к.min}$  обычно принимается равным 1 мА в классе усиления АВ.

Напряжения на базах транзисторов  $VT_1$ ,  $VT_2$  задаются параметрическими стабилизаторами  $R_2$  VD1,  $R_4$  VD2 (рис. 3.1) и определяются выбранными из [7, 8] стабилитронами или светодиодами. Обычно значение напряжения на диоде равно 0.7 В.

Сопротивления резисторов  $R_5$ ,  $R_6$  выбираются из условия обеспечения режима АВ в транзисторах выходной цепи

$$R_{5,6} = \frac{0.7B}{I_{к3,4}} \text{ (Ом)}.$$

Принимаются номинальные значения сопротивлений  $R_5 = R_6$  (Ом)

Мощность, рассеиваемая каждым из транзисторов  $T_1$ ,  $T_2$ , равна

$$P_k = (E_n - U_{ин.ОУ}) \cdot (I_{потреб.ОУ} + I_{б.3,4,max}) \text{ (Вт)}.$$

На основании проведённых расчётов выбирается пара комплементарных транзисторов  $VT_3$ ,  $VT_4$  . удовлетворяющих следующим требованиям:

- $I_{к.доп} > I_{потреб.ОУ} + I_{б.3,4}$  {0,3(А)>0.01(А)}
- $U_{кэ.доп} > E_n$  {80(В)>30(В)}
- $P_{к.доп} > (P_k = I_{потреб.ОУ} \cdot E_{ин})$  {0.5(Вт)>0,135(Вт)}
- $f_{3,4} > f_в$  {1(МГц)>7.5(кГц)}

Принимаются транзисторы малой мощности [1, 2, 9 – 11 ], параметры которых приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3**

Тип транзистора		$I_{к.доп.}$	$U_{кэ.доп.}$	$P_{к.доп.}$	$f_{\beta}$	$h_{21Э}$
P-N-P	N-P-N	(А)	(В)	(Вт)	(МГц)	от – до

Сопротивление резистора  $R_1$  бустера напряжения зависит от входного тока ОУ и находится из выражения  $R_1 \leq \frac{U_{вх.max}}{10 \cdot I_{вх.ОУ}}$  следующим об-

разом. Так как обычно коэффициент усиления выходного каскада УМ лежит в пределах 3 – 5 то принимаем  $K_{у.УМ} = 4$ . Тогда  $U_{вх.max} = \frac{U_{вых}}{K_{У.УМ}}$  и с

учетом входного тока ОУ  $I_{вх.ОУ}$  находится сопротивление резистора  $R_6$ . Найденное значение сопротивления может иметь большое значение. С учетом условия, что для ОУ, выпускаемых отечественной промышленностью, это сопротивление лежит в пределах (5 ÷ 10) (кОм), принимается номинальное значение сопротивления резистора  $R_6$ \_\_\_\_\_.

Тогда с учетом местной обратной связи в схеме выходного каскада УМ находится сопротивление  $R_8$

$$R_8 = K_{U.UM} \cdot R_1 \text{ (кОм)}$$

Принимается номинальное значение сопротивления \_\_\_\_\_.

Рассчитывается сопротивление резистора  $R_3$

$$R_3 = R_1 \parallel R_8 = \frac{R_1 \cdot R_8}{R_1 + R_8} \text{ (Ом)}$$

Принимается номинальное значение сопротивления  $R_3$  (кОм) \_\_\_\_\_

Диоды VD1 и VD2 выбираются в соответствии с условиями:

$$I_{CT.max} - I_{CT.min} \geq I_{б.3.4},$$

где  $I_{б.3.4}$  - токи базы транзисторов VT<sub>3</sub>, VT<sub>4</sub>.

$$I_{б.3.4} = \frac{I_{К.3.4}}{\beta_{3.4} \cdot n_{при} \rightarrow I_K = I_H} \text{ (А)}.$$

$I_{CT.max}$ ,  $I_{CT.min}$  - допустимые диапазоны изменения тока стабилизатора.

Выбираются стабилизаторы КС \_\_\_\_\_ [7, 8], имеющие

1. ток потребления до 20 (мА)
2. рабочее напряжение (3 ÷ 20) (В)

Сопротивления резисторов  $R_2$  и  $R_4$  находятся как

$$R_2 = R_4 = \frac{E_{П} - U_{шт.ОУ}}{I_{CT.min} + I_{Б3.4}} \text{ (кОм)},$$

и принимаются в соответствии с номинальными значениями сопротивлений \_\_\_\_\_.

Конденсатор  $C_1$  служит для коррекции частотной характеристики бустера и выбирается из выражения

$$C_1 \geq \frac{\tau_B}{\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R_{вых.ОУ}},$$

где  $\beta_1$  один из параметров транзистора выходного каскада ОУ (обычно 120 – 150),

$\beta_2$  принимается для транзисторов VT<sub>3</sub>, VT<sub>4</sub> при  $I_K = I_H$ .

$\tau_B$  постоянная времени в области верхних частот  $\tau_B = \frac{1}{2\pi f_B}$

После расчетов принимается конденсатор, имеющий емкость номинального значения \_\_\_\_\_.

### 3.5. Построение семейства выходных вольтамперных характеристик

В подразделе 3.5 производится построение семейства выходных ВАХ выходных транзисторов оконечного каскада. Строятся они при использовании справочной зависимости коэффициента передачи тока одного из транзисторов выходной цепи [1, 9 – 11], принятых в подразделе

3.2, от тока коллектора или тока эмиттера. График зависимости  $\beta = f(I_K)$  или  $\beta = f(I_E)$  в общем случае имеет вид (рис.3.3):

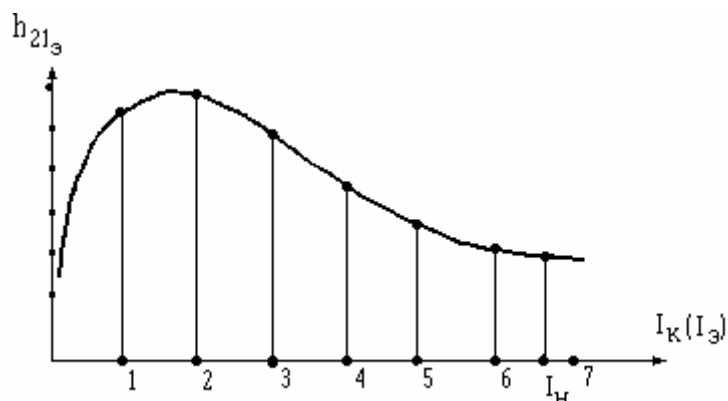


Рис.3.3. Зависимость коэффициента передачи тока транзистора от тока коллектора (эмиттера)

Для построения семейства выходных ВАХ транзистора на рис.3.5 находятся значения коэффициентов  $\beta$  или  $h_{21э}$  для каждого из значений принятых токов. Обычно принимаются 6 – 8 значений токов. Исходя из найденных величин  $h_{21э i}$  при  $i$ -ом значении тока определяются значения токов базы  $I_{бi} = \frac{I_{K_i}}{h_{21э,i}}$ . Все значения токов коллектора (эмиттера) и найденные коэффициенты  $h_{21э}$  и токи  $I_{бi}$  заносятся в таблицу 3.4.

Таблица 3.4.

$I_K$ (мА)	$h_{21э}$	$I_{бi}$ (мкА)
_____	_____	_____

Если транзисторы выходной цепи окончного каскада работают по схеме с общим эмиттером, то семейство выходных ВАХ имеет зависимость вида  $I_K = f(U_{кэ})$ . По оси абсцисс при значении напряжения  $U_{кэ}$ , равным 2 – 5 В., проводится вертикальная линия, на которой токов коллектора и токов базы транзистора и проводятся горизонтальные линии.

Под углом наклона к оси абсцисс, зависящим от сопротивления  $r'_б$  базы транзистора, под углом с параметром  $tg \frac{1}{r'_б}$  через начало координат проводится линия критических режимов. Также угол наклона линии критических режимов можно принять из справочной литературы. При этом, проведенные ранее горизонтальные линии коллекторных токов должны находиться справа от линии критических режимов. Так как полученные значения базовых токов имеют разные значения не кратные величинам 50, 100 мкА, то следует аппроксимировать линии коллектор-

ных токов в соответствии с этими требованиями. Пример аппроксимации показан на рис.3.5.

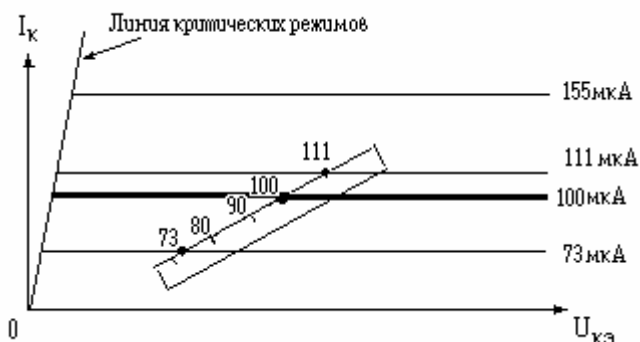


Рис.3.5. К построению выходных ВАХ транзистора.

С учетом выходного сопротивления транзистора горизонтальным аппроксимированным линиям коллекторных токов следует придать наклон. Причем угол наклона будет непостоянным, так как он зависит от коэффициента  $h_{21э}$ , который сам в свою очередь зависит от коллекторного тока (рис.3.3). Влияние выходного сопротивления транзистора на положение линий коллекторного тока показано на рис.3.6.



Рис.3.6. К учету выходного сопротивления транзистора на положение линии коллекторного тока на ВАХ.

Задаваясь максимально возможным значением приращения напряжения  $\Delta U_{кэ}$ , следует определить приращение коллекторного тока с учетом выражения  $r_{кэ} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{к}}$ . С другой стороны  $r_{кэ-i} = \frac{r_{кб}}{1 + \beta_i}$ . Сопротивление коллекторного перехода зависит от выбранного транзистора, а параметр  $\beta_i$  определяется зависимостью, показанной на рис. 3.3. Таким образом, наклон линии коллекторного тока на семействе ВАХ определяется величиной выходного сопротивления транзистора  $r_{кэ}$

Откладывая значение напряжения источника питания на оси абсцисс, необходимо повести нагрузочную линию, угол наклона которой зависит от величины сопротивления нагрузки. Начальный ток коллектора следует принять 1 мА. Для этого тока находится значение  $I_{б.min}$

Семейство выходных ВАХ транзистора показано на рис.3.7.

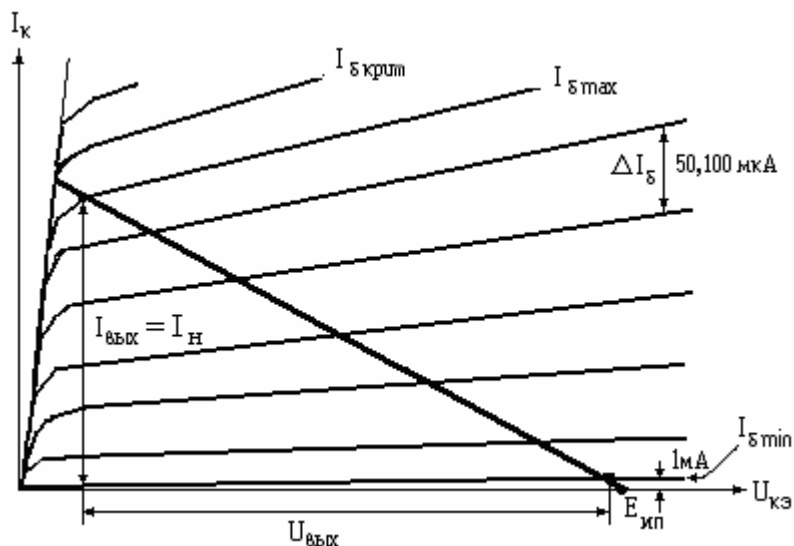


Рис.3.7. Семейство выходных ВАХ транзистора.

Построенное семейство выходных ВАХ транзистора в оконечном каскаде понадобится для оценки усилительных свойств выходной цепи схемы и для расчета нелинейных искажений.

### 3.6. Оценка усилительных свойств выходного каскада

В подразделе 3.6 оцениваются усилительные свойства выходного каскада различными методами.

#### 3.6.1. Графический метод

С помощью входной и выходной характеристик графически определяем коэффициент усиления.

$$K_{U.граф} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}$$

где  $\Delta U_{вых}$ ,  $\Delta U_{вх}$  определяются из графиков на рис.3.7, 3.8

На рис. 3.8 показана входная характеристика мощных транзисторов выходной цепи бустера.

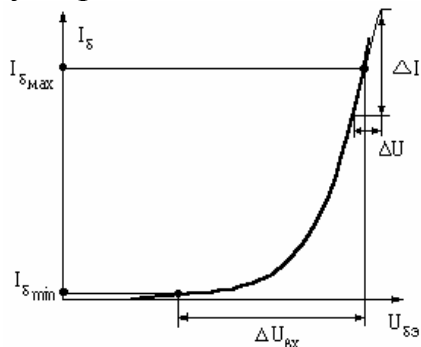


Рис.3.8. Входная характеристика транзистора

Из рис.3.7 находятся значения токов базы  $I_{\sigma.\min}$  и  $I_{\sigma.\max}$ , которые на рис. 3.8 определяют  $\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\sigma}$  для обеспечения выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$ .

### 3.6.2. Аналитический метод

Если транзисторы работают в схеме включения с общим эмиттером, то коэффициент передачи по напряжению может быть найден согласно выражению

$$K_{U.\text{анал}} = \frac{\beta \cdot R_n}{R_{\text{вх}}},$$

где -  $R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$  входное сопротивление транзистора, находится

из входной характеристики (рис.3.8) при входном токе  $I_{\sigma.\max}$ .

Величина  $R_{\text{вх}}$  определяется графически. В точке тока  $I_{\sigma.\max}$  на касательной к входной характеристике строится треугольник, из которого определяется входное сопротивление по переменному току

-  $\beta$  соответствует току нагрузки (рис.3.3).

### 3.6.3. С учетом местной обратной связи

Исходя из найденных номинальных значений сопротивлений резисторов  $R_{oc}$  и  $R_6$ , рассчитывается коэффициент передачи по напряжению бустера

$$K_{U.\text{расч}} = K_{УМ} = \frac{R_{oc}}{R_6}$$

Естественно, все рассчитанные значения коэффициентов передачи по напряжению должны быть неодинаковыми, но 1-ое и 2-ое значения должны быть близкими по величине.

## 3.7. Оценка нелинейных искажений

Наибольшие искажения в схеме УМ обусловлены наличием в тракте усиления нелинейных элементов (элементов с нелинейными характеристиками – транзисторов и др.), а также не симметрией двухтактного выходного каскада. Наибольшие нелинейные искажения вносятся бустером, где амплитуда сигнала максимальна. Коэффициент нелинейных искажений  $K_{НИ} = K_{\text{гарм}}$  в значительной степени зависит от режима работы (класса усиления) схемы бустера, разброса параметров пар элементарных транзисторов.

Оценка нелинейных искажений производится с помощью сквозной характеристики. Сквозная характеристика, т.е. зависимость  $I_k = f(U_\Gamma)$ , строится для одного плеча схемы выходного каскада, по уравнению

$$U_\Gamma = U_{бэ} + I_B \cdot R_\Gamma,$$

когда  $R_\Gamma = R_{\text{вых.пред.каскада}} = R_{\text{вых.ОУ}}$

При этом используются входные и выходные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ. Оценка нелинейных искажений проводится по методу 5-ти ординат.

Построение сквозной характеристики производится следующим образом. Из семейства выходных характеристик (рис.3.7) находят значения токов базы для точек пересечения линий коллекторных токов и нагрузочной линии. Первой точкой является ток базы при токе коллектора равным 1 мА (класс усиления УМ – АВ). Для этого значения тока базы из входной характеристики транзистора (рис.3.8) находится напряжение  $U_{бэ1}$ .

Основную часть напряжения  $U_\Gamma$  составляет именно это напряжение, к которому добавляется второе слагаемое из произведения  $i$ -го значения тока базы и выходного сопротивления операционного усилителя (из таблицы 3.2)

Для всех токов базы от минимального до максимального значения рассчитываются значения напряжения  $U_\Gamma$ . Токи коллектора принимаются такой величины, которая соответствует значению в точке пересечения линии коллекторного тока и линии нагрузки. Все принятые и найденные значения токов и напряжений заносятся в таблицу 3.5.

**Таблица 3.5**

$I_B$ (мкА)	$I_k$ (мА)	$U_{бэ}$ (В)	$U_\Gamma$ (В)
Например 100	1		

Используя данные таблицы 3.5 строится сквозная характеристика вида  $I_k = f(U_\Gamma)$  (рис. 3.9).

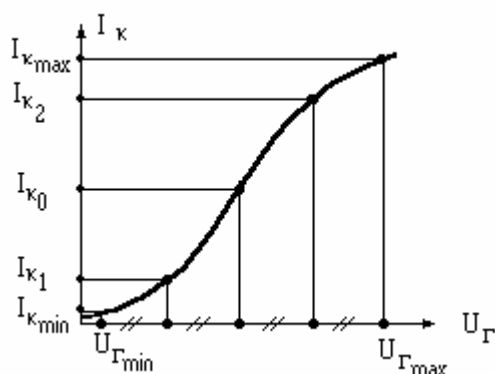


Рис.3.9. Сквозная характеристика выходной цепи бустера

Разбивая обрезок  $U_{\Gamma\min} \dots U_{\Gamma\max}$  на четыре равные части определяются пять значений токов:  $I_{k.\min}, I_{k_1}, I_{k_0}, I_{k_2}, I_{k.\max}$ . С учетом асимметрии плеч, задавшись коэффициентом асимметрии  $b = 0.05 - 0.1$ , уточним найденные ранее пять значений токов плеч.

$$\begin{aligned} I_{k.\min} &= -(1-b) \cdot I_{k.\min}, \\ I_{k.2} &= -(1-b) \cdot I_{k.2}, \\ I_{k.0} &= 2 \cdot b \cdot I_{k_0}, \\ I_{k.1} &= (1+b) \cdot I_{k_1}, \\ I_{k.\max} &= (1+b) \cdot I_{k.\max}. \end{aligned}$$

По полученным пяти значениям токов плеч выходного каскада рассчитываются значения амплитуд четырёх высших гармоник тока коллектора.

$$\begin{aligned} I_{k(1)} &= \frac{I_{k.\max} - I_{k.\min} + I_{k.1} - I_{k.2}}{3} \text{ (мА)} \\ I_{k(2)} &= \frac{I_{k.\max} + I_{k.\min} - 2 \cdot I_{k.0}}{4} \text{ (мА)} \\ I_{k(3)} &= \frac{I_{k.\max} - I_{k.\min} - 2 \cdot (I_{k.1} - I_{k.2})}{6} \text{ (мА)} \\ I_{k(4)} &= \frac{I_{k.\max} + I_{k.\min} - 4 \cdot (I_{k.1} + I_{k.2}) + 6 \cdot I_{k.0}}{12} \text{ (мА)} \end{aligned}$$

Проводится проверка найденных значений токов гармоник по формуле:

$$\begin{aligned} I_{k.\max.} &= I_{k.\text{ср.}} + I_{k(1)} + I_{k(2)} + I_{k(3)} + I_{k(4)}, \\ \text{где } I_{k.\text{ср.}} &= \frac{I_{k.\max} + I_{k.\min} + 2 \cdot (I_{k.1} + I_{k.2})}{6} \text{ (мА)} \end{aligned}$$

Коэффициент нелинейных искажений или коэффициент 1-ой гармоники сигнала выходного каскада рассчитывается следующим образом:

$$K_{НИ} = \frac{\sqrt{I_{k(2)}^2 + I_{k(3)}^2 + I_{k(4)}^2}}{I_{k(1)}}$$

Найденное значение коэффициента нелинейных искажений (гармоник) обязательно должно быть меньше 1 и находиться в пределах 20 – 85%.

С учётом частотных свойств операционного усилителя и наличия глубокой отрицательной обратной связи в выходном каскаде значение коэффициента нелинейных искажений должно быть пересчитано

$$K_{\Gamma}^{ООС} = \frac{K_{\Gamma}}{F},$$

где  $K_{\Gamma}$  и  $K_{\Gamma}^{ООС}$  - коэффициенты гармоник без ООС и с ООС,  $F$  – глубина ООС, равная:

$$F = \frac{K_{U.ЛAЧX}}{K_{U.OOC}} = \frac{K_U^{f_B}}{K_{U.расч}},$$

Коэффициент  $K_U^{f_B}$  в относительных единицах определяется из ЛАЧХ операционного усилителя выходного каскада на заданной частоте  $f_B$ . Значение  $K_{U.расч}$  принимается в соответствии с расчетами в подразделе 3.6.3.

Полученное значение коэффициент нелинейных искажений сравнивается с требованиями задания. Если требования задания не выполнены, то необходимо принять меры для уменьшения величины  $K_{Г}^{OOC}$ , например, введением местной отрицательной последовательной обратной связи по току в цепи выходных транзисторов последнего каскада.

## 4. Расчет предварительных усилителей

Схема УМ должна обеспечивать необходимое усиление, рассчитанное во втором разделе с суммарным коэффициентом усиления  $K_{U_r} K_{U_r}$ . В подразделе 3.6.3 найдено значение коэффициента передачи по напряжению оконечного каскада  $K_{U_{буст}}$ . На оставшиеся три каскада (входной и промежуточные) усиление должно составлять

$$K_{U_{вх+пром}} = \frac{K_{U_r}}{K_{U_{буст}}}$$

Условно принимаем равное усиление на каждый из каскадов с коэффициентом передачи по напряжению  $K_{U_i}(\text{дБ}) = \frac{K_{U_{вх+пром}}(\text{дБ})}{N-1}$  где N- число каскадов, найденное во 2-ом разделе; или для относительных единиц усиления по напряжению  $K_{U_i} = \sqrt[N-1]{K_{U_{вх+пром}}}$ .

Как уже было отмечено во 2-м разделе, входным каскадом УМ является дифференциальный каскад. Произведем его расчет. Схема дифференциального входного каскада представлена на схеме рис.4.1.

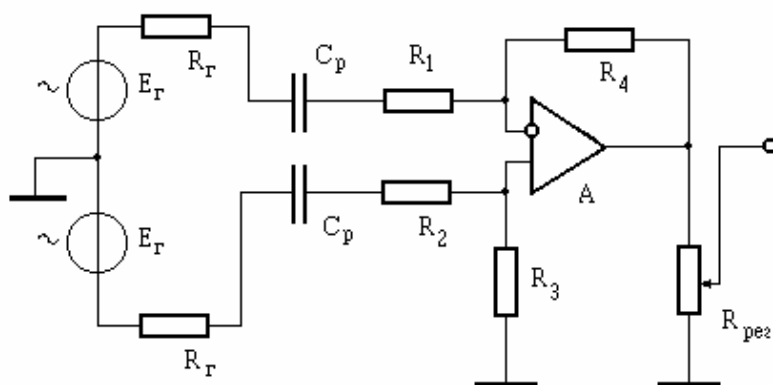


Рис.4.1. Схема дифференциального входного каскада

### 4.1. Выбор ОУ для предварительного усилителя

Выбор ОУ производится из следующих соображений:

$$I_{вх.оу} < I_r$$

$$U_{вых.оу} < E_{ИП} = 15 - 18 \text{ В.}$$

$$f_{в.} < f_{T оу}$$

Принимается ОУ типа \_\_\_\_\_ [1, 2, 5]. Если для входного и промежуточных каскадов выбран ОУ одного типа, то повторное представление табличных данных и схем включения не производится, если другого типа, то необходимо это сделать, представив таблицу значений и электрические схемы.

Далее проводится расчет элементов схемы. Рассчитывается сопротивление резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R_1 = R_2 \leq \frac{U_{\text{ex.max}}}{10 \cdot I_{\text{ex.OY}}} \text{ (Ом)}$$

Так как рассчитываемая схема является усилителем мощности, то следует обеспечить согласование сопротивлений не только по выходу, но и по входу. Поэтому принимаются номинальные значения сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  равные выходному сопротивлению источника сигнала, но лежащие в пределах 5 – 10 кОм. Принимаются номинальные значения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  \_\_\_\_\_.

Сопротивление резистора  $R_4$  рассчитывается исходя из ранее принятых значений  $K_{U_i}$ . Тогда

$$R_4 = K_{U.1} \cdot R_1$$

Принимается номинальное значение \_\_\_\_\_.

Сопротивление резистора  $R_3$  принимается равным  $R_4$ :

При найденных значениях сопротивлений резисторов уточняется коэффициент передачи по напряжению усиления схемы входного каскада по формуле  $K_{u.1} = \frac{R_4}{R_1}$

Сопротивления регулировочного резистора  $R_5$  принимается из следующего условия:

$$R_{\text{рег}} \geq R_{H.\text{min.OY}} \text{ (кОм)}$$

где  $R_{H.\text{min.OY}}$  должно соответствовать табличным данным ОУ.

Принимается переменное сопротивление номинального значения \_\_\_\_\_.

## 4.2. Расчёт 1-го промежуточного каскада

Схема этого каскада изображена на схеме рис.2.2. Тип ОУ для 1-го промежуточного каскада усиления принят в подразделе 4.1.

Определим сопротивление резистора  $R_1$ :

$$R_1 \leq \frac{U_{\text{ex.макс}}}{10 \cdot I_{\text{ex.OY}}} \text{ (Ом)},$$

$$\text{где } U_{\text{ex.макс.}} = E_{\Gamma} \cdot K_{U.\text{диф}}$$

Принимается номинальное сопротивление резистора  $R_1$  (5 – 10 кОм).

Коэффициент усиления по напряжению 1-го промежуточного каскада  $K_{u.1}$  принимается равным согласно выше приведённым расчётам. Исходя из этого значения, производится расчет сопротивления  $R_2$ .

$$R_2 = K_{U.1} \cdot R_1 \text{ (Ом)}$$

Принимается сопротивление резистора  $R_2$  номинального значения \_\_\_\_\_ .

Затем уточняется величина коэффициента передачи по напряжению схемы 1-го промежуточного каскада

$$K_{U.1} = \frac{R_2}{R_1}$$

Рассчитывается сопротивление резистора  $R_3$ :

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Принимается номинальное значение \_\_\_\_\_ .

### 4.3. Расчет 2-го промежуточного каскада

Схема этого каскада также изображена на схеме рис.2.2.

Тип ОУ для 2-го промежуточного каскада усиления принят в подразделе 4.1.

Определим сопротивление резистора  $R_1$ :

$$R_1 \leq \frac{U_{ex.макс}}{10 \cdot I_{ex.ОУ}} \text{ (Ом) ,}$$

$$\text{где } U_{ex.макс} = E_{Г} \cdot K_{U.диф} \cdot K_{U.1}$$

Принимается номинальное сопротивление резистора  $R_1$ , также лежащее в пределах 5 – 10 кОм.

Коэффициент усиления по напряжению 2-го промежуточного каскада  $K_{u.2}$  принимается равным согласно выше приведённым расчётам. Исходя из этого значения, производится расчет сопротивления  $R_2$ .

$$R_2 = K_{u.2} \cdot R_1 \text{ (Ом)}$$

Принимается сопротивление резистора  $R_2$  номинального значения \_\_\_\_\_ .

Затем уточняется величина коэффициента передачи по напряжению схемы 2-го промежуточного каскада

$$K_{u.2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Рассчитывается сопротивление резистора  $R_3$ :

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Принимается номинальное значение \_\_\_\_\_ .

#### 4.4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика 2-го каскада

Согласно заданию требуется привести ЛАЧХ для одного из каскадов усилителя мощности. Для второго промежуточного каскада усилителя на ОУ \_\_\_\_\_, из [1, 2, 5] приводится ЛАЧХ усилителя. Коэффициент передачи схемы по напряжению равен  $K_{U.2}$ . Для этой величины проводится нагрузочная линия, которой соответствует значение  $K_{U.2(об)} = 20 \cdot \lg K_{U.2}$  (дБ).

В качестве примера на рис.4.2. приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика 2-го промежуточного каскада

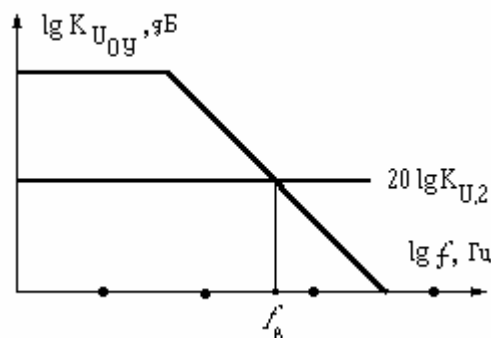


Рис.4.2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика 2-го промежуточного каскада усиления.

## 5. Полный расчет схемы усилителя мощности

### 5.1. Оценка усилительных свойств схемы

Рассчитаем коэффициент передачи по напряжению всей схемы УМ, например, при двух промежуточных каскадах усиления

$$K_{U_{\Sigma}} = K_{U_{ex.диф}} \cdot K_{U.1} \cdot K_{U.2} \cdot K_{U.УМ}$$

Значения всех коэффициентов усиления были получены подразделах 3.6.3, 4.1 – 4.3.

Рассчитаем относительную погрешность усиления:

$$K_{U.отн} = \left| \frac{K_{U.ТЕОР.} - K_{U.расч}}{K_{U.ТЕОР.}} \right| \cdot 100\%$$

здесь,  $K_{U.ТЕОР.}$  - требуемое усиление, рассчитанное во 2-ом разделе,  $K_{U.расч}$  - полученное усиление с коэффициентом передачи  $K_{U_{\Sigma}}$

Рассчитанное значение относительной погрешности не должно превышать величины  $\pm 5\%$ . Если полученная величина относительной погрешности по напряжению не отвечает предъявляемым требованиям, то расчеты каскадов усиления следует переделать.

### 5.2. Расчёт емкостей разделительных конденсаторов

Для развязки по постоянному току источника сигнала и усилителя используются разделительные конденсаторы. Перед нагрузкой ставить разделительный конденсатор не имеет смысла, так как в режиме покоя на выходе схемы имеет место нулевой потенциал. При наличии  $n$  разделительных конденсаторов в УМ заданный коэффициент частотных искажений необходимо поделить поровну между всеми цепями, создающими НЧ-искажения

$$M_{n_i} = \sqrt[n]{M_{н.ЗАД}}$$

где  $M_{н.ЗАД}$  подставляется в формулу в относительных единицах,

$$M_{н.ЗАД.отн} = 10^{\frac{M_{н.ЗАД.дБ}}{20}}$$

$n$ - число цепей, создающих НЧ-искажения.

В нашем случае число разделительных конденсаторов на входе равно 2 (по каждому из входов дифференциального каскада), т.е.  $n=2$  (рис.4.1).

Ёмкость разделительного конденсатора  $C_p$  находится из выражения постоянной времени для области нижних частот

$$\tau_n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \sqrt{M_{n_i}^2 - 1}} \quad (с)$$

когда  $\tau_n = C_p \cdot (R_\Gamma + R_{1.или2})$

$f_n$  – нижняя граничная частота.

Принимается емкость конденсаторов  $C_p$  номинального значения \_\_\_\_\_

### 5.3. Проверка работы в области верхних частот

Снижение АЧХ УМ в области верхних частот обусловлен частотными искажениями каскадов на ОУ и бустера, а также влиянием ёмкости нагрузки.

Коэффициент частотных искажений на верхней граничной частоте  $f_B$  равен произведению коэффициентов каждого каскада УМ.

$$M_{B.\Sigma} = M_{B.входн} \cdot M_{B.1} \cdot M_{B.2} \cdot M_{B.выходн} \cdot M_{B.n},$$

где  $M_{B.i}$  коэффициенты частотных искажений каскадов схемы и цепи нагрузки  $R_n C_n$ .

В случае, когда в качестве активных элементов схемы используются ОУ и имеет место  $f_{T.OY} \gg f_B$ , то каскады на ОУ не оказывают влияния на ВЧ-искажения, т.е.

$$M_{B.входн} = M_{B.1} = M_{B.2} = 1$$

Коэффициент частотных искажений бустера в ВЧ-области определяется следующим образом:

$$(M_{B.выходн})^{-1} = \{1 + (M_B - 1) \cdot (1 - K_{U.буст})\}^{-1},$$

$$\text{где } M_B = \sqrt{1 + \left(\frac{f_B}{f_{\beta.транз}}\right)^2}$$

Коэффициент частотных искажений, определяемый влиянием цепи нагрузки  $R_n C_n$  в области ВЧ, рассчитывается по формуле:

$$M_{B.нагр} = \sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot \tau_n)^2},$$

$$\text{где } \tau_n = C_n \cdot (R_{вых.УМ} \parallel R_n) \text{ (с)}$$

Теперь рассчитывается результирующее значение коэффициента частотных искажений в ВЧ-области  $M_{B.\Sigma}$ . Его величина должна быть меньше заданного значения  $M_{B.зад}$ .

### 5.4. Расчёт КПД

Схема выходного каскада УМ работает в режиме класса АВ. Рассчитывается коэффициент полезного действия схемы

$$КПД = \frac{P_{вых}}{P_{номр}} \cdot 100\%,$$

где  $P_{вых}$  - максимальная мощность полезного сигнала.

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}}{2} \text{ (Вт)}$$

$P_{\text{потр}}$  - потребляемая мощность при данном режиме

$$P_{\text{потр}} = 2 \cdot E_{\text{П}} \cdot (I_{\text{входн.потр}} + I_{1.\text{потр}} + I_{\text{потр.2}}) + 2 \cdot I_{\text{вых.}} \cdot E_{\text{П}} \text{ (Вт)}$$

Полученное значение коэффициента полезного действия не должно превышать значения 20%

### 5.5. Расчёт фильтров в цепях питания операционных усилителей

Поскольку напряжение источника питания схемы значительно превышает допустимое напряжение питания операционных усилителей входного и промежуточных каскадов, то избыточное напряжение необходимо «погасить» с помощью фильтров в каждом из каскадов. Целесообразно включить фильтр для каждого ОУ, т.к. включение общего фильтра для всех ОУ потребует резистора с большим значением допустимой мощности ввиду большого проходящего через него тока. Поэтому принимаются фильтры в цепях питания каждого ОУ. Фильтры рассчитываются так, чтобы напряжение питания для каждого было одинаковое и составило  $E_{\text{п.ов.}} = 15 \text{ (В)}$ . Если ОУ одинаковые, то они имеют одинаковые токи потребления, то проводится расчет одной схемы фильтра, т.е. рассчитываются один резистор и один конденсатор в каждой цепи питания ОУ ( $R_{\phi 1} = R_{\phi 2}, C_{\phi 1} = C_{\phi 2}$  и т.д.). На рис.5.3. изображена схема первых 3-х каскадов УМ с фильтрами в цепях питания ОУ.

Как уже ранее было отмечено, входной и каскады предварительного усиления УМ построены на ОУ (это видно из схемы рис.5.3.). Эти ОУ были выбраны ранее в пунктах 4.1-4.3. Параметры ОУ, необходимые для расчета фильтров приведены в таблице 5.1 (см. таблицу 3.2).

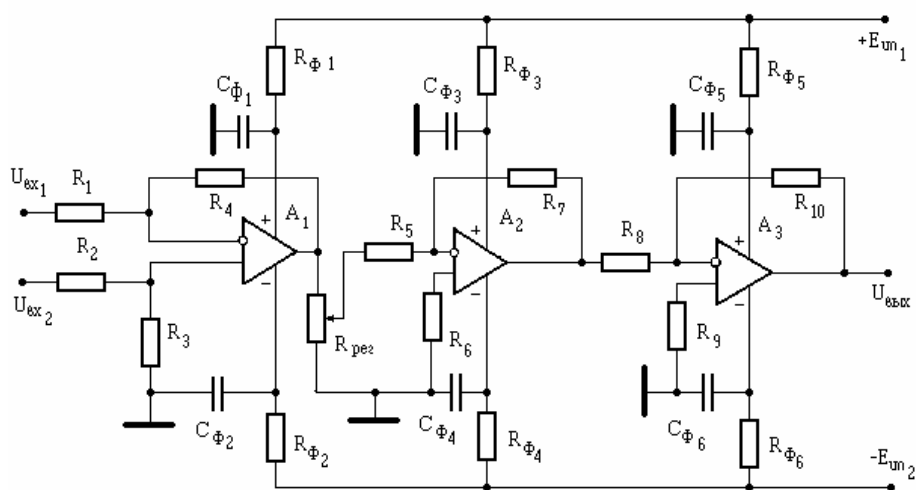


Рис.5.3. Фильтры в цепях питания ОУ.

Таблица 5.1

Тип ОУ	_____
$E_{\text{пит.}}$ (В)	_____
$I_{\text{потр.}}$ (мА)	_____

Для схемы принято напряжение источника питания  $E_1 = E_{\text{пит}}$  (В)

Расчет сопротивления резистора в фильтрах проводится по формуле

$$R_{\phi.1} = \frac{E_1 - E_{\text{ном.ОУ}}}{I_{\text{ном.ОУ}}} \text{ (кОм)}$$

Принимается сопротивление номинального значения \_\_\_\_\_.

Расчет ёмкости конденсатора в фильтре проводится из условия

$$C_{\phi} \cdot R_{\phi} = 10 \cdot \tau_n,$$

$$\text{где } \tau_n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \text{ (с)}$$

Принимается ёмкость номинального значения \_\_\_\_\_ (мкФ).

Допускается проведение расчета параметров фильтров, исходя из обеспечения заданного коэффициента пульсаций. Данная методика расчета изложена в работе [3].

## 5.6. Электрическая схема и спецификация элементов

На рис. 5.4 представляется принципиальная электрическая схема рассчитанного усилителя мощности. Схема представляется на листах формата А3 или А4, или на миллиметровой бумаге соответствующего размера. Нумерация элементов схемы должна быть сквозная (сверху-вниз и слева-направо), индексы элементов, принадлежащие только этой электрической схеме, в том числе всех резисторов и конденсаторов, должны быть только в цифровом виде. Названия типа  $R_{\phi}$  или  $C_{\phi}$  не допустимы. Для изображения операционных усилителей рекомендована прямоугольная форма (рис. 3.2). Изображения различных типов ОУ могут отличаться.

Порядок представления элементов при составлении таблицы следующий:

1. резисторы,
2. конденсаторы,
3. диоды,
4. транзисторы,
5. операционные усилители.

Пример заполнения таблицы.

Таблица 5.2

<i>№</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Номинал</i>	<i>Кол-во</i>
1	R1, R8, R14	Резистор, _____ (кОм)	3
	R2 и т.д.	Резистор, _____ (кОм)	1
2	R9	Сопротивление СП, 1.1(кОм)	1
3	C1, C2 и т.д.	Конденсатор, _____ (пФ)	2
4	VD1, VD2	Диод _____	2
5	VT1 и т.д.	Транзистор _____	1
6	DA1, DA2, DA3	Операционный усилитель _____	3

В заключение расчетно-пояснительной записки должен быть представлен список использованной литературы. Литература может отличаться от рекомендованной, но обязательно для данной работы должен быть **свой** список.

Подпись исполнителя работ в конце расчетно-пояснительной записки не ставится, подпись должна быть на титульном листе.