

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
С МОДЕЛИРОВАНИЕМ НАСТРОЙКИ НА ЭВМ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к курсовому проектированию*

С А М А Р А
Издательство СГАУ
2010

УДК СГАУ : 621.382.047(075)

П791

Составители: Ю.С. Дмитриев, А.А. Грецов

Рецензент: к. техн. наук, доц. В.А. Глазун

Проектирование широкополосного усилителя на основе интегральных микросхем с моделированием настройки на ЭВМ: метод. указания к курсовому проектированию/ сост. Ю.С. Дмитриев, А.А. Грецов – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 28 с.: ил.

Содержатся рекомендации к выполнению и оформлению курсового проекта по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств», методики эскизного и электрического расчета, а также моделирования настройки усилителя на ЭВМ. Предназначены для студентов радиотехнического факультета специальности 210302 – «Радиотехника».

Составлены на кафедре радиотехники и МДС.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнением этого курсового проекта завершается изучение дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

Аналоговые электронные устройства весьма разнообразны, однако среди них доминируют усилители напряжения. Усилители применяются в передающей и приемной радиоаппаратуре, во вспомогательных устройствах и устройствах электропитания. Поэтому можно считать усилители одним из важнейших типов электронных преобразователей аналоговых сигналов. Данный курсовой проект посвящен проектированию специального широкополосного усилителя на основе интегральных микросхем.

В процессе выполнения курсового проекта приобретаются практические навыки по расчету и моделированию усилителя.

При выполнении курсового проекта студент может пользоваться типовым вариантом методики проектирования, представленным в предлагаемых методических указаниях. Однако студенты, имеющие творческий потенциал, могут выполнить проектирование и по какому-либо другому варианту, который, по их мнению, более интересен. Творческий подход к инженерному труду не только не порицается, но и поощряется как самоудовлетворением, так и повышенной оценкой при защите проекта.

1 ЭСКИЗНЫЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ

Основная проблема, которая возникает при эскизном проектировании усилителя, – это обеспечение непротиворечивого сочетания заданных значений коэффициента усиления, полосы пропускания и нелинейных искажений.

Эскизный расчет усилителя включает в себя следующие этапы:

– решение вопроса об использовании отрицательной обратной связи (ООС);

– выбор варианта защиты выходного каскада от перегрузки по току;

– выбор функциональной схемы усилителя;

– определение требований к используемым микросхемам;

– выбор электрической схемы усилителя и краткое описание его работы.

При решении вопроса об использовании ООС следует учитывать, что применение ООС уменьшает коэффициент усиления, но расширяет полосу пропускания (связи типа «Н» и «У»), повышает термостабильность, стабильность коэффициента усиления и уменьшает нелинейные искажения. В тех случаях, когда положительное действие ООС имеет существенное значение, принимают решение об использовании ООС.

Приняв решение об использовании ООС, требуемое значение ее глубины определяют с учетом нелинейных искажений по нечетным гармоникам в операционном усилителе (ОУ) с ООС:

$$F_{\text{треб.}} \approx \sqrt[3]{\frac{51 \times U_{\text{вх.т.зад.}}^2}{K_{\text{н.зад.}}}}$$

где $U_{\text{вх.т.зад.}}$ и $K_{\text{н.зад.}}$ – соответственно, заданные значения амплитуды входного сигнала и коэффициента нелинейных искажений (коэффициента гармоник).

С учетом полученного значения $F_{треб.}$, следует выбирать значение общего расчетного коэффициента усиления, при разомкнутой обратной связи, по формуле:

$$K_{расч.} = F_{треб.} \times K_{зад.},$$

где $K_{зад.} = \frac{U_{вых.т.зад.}}{U_{вх.т.зад.}}$ – заданное значение коэффициента усиления;

$U_{вых.т.зад.}$ – заданное значение амплитуды выходного сигнала.

Далее производится выбор варианта защиты выходного каскада от перегрузки по току. Здесь следует учитывать то, что, хотя статическая защита реализуется более простым схмотехническим вариантом, она характеризуется, при коротком замыкании в нагрузке, четырехкратным увеличением рассеиваемой (на выходных транзисторах) мощности, что приводит к увеличению габаритов и массы усилителя. Поэтому, рекомендуется применять динамический вариант защиты выходного каскада от перегрузки по току. Так как такой вариант никогда не используется внутри интегральных микросхем, то следует предусмотреть дополнительный выходной каскад (эмиттерный повторитель) с динамической защитой. Студенты, желающие применить свой творческий потенциал, могут попробовать спроектировать иной вариант динамической защиты (с использованием внешней обратной связи по перегрузке).

Функциональную схему усилителя можно составить на основе одного, двух или трех операционных усилителей (микросхем). Требуемые значения параметров операционных усилителей (ОУ) для разных вариантов функциональной схемы представлены в таблице 1.

Определив значения требуемых параметров ОУ, следует ориентировочно выбрать тип микросхемы ОУ, удовлетворяющий полученным значениям по коэффициенту усиления (K_0) и частоте единичного усиления (f_T). При этом должны выполняться условия: $K_0 \geq K_{расч.}$; $f_T \geq f_T^*$.

Для выбора типа микросхемы можно воспользоваться данными из таблицы 2 (параметры других ОУ следует искать в специальном справочнике).

Таблица 1 – Требуемые значения параметров ОУ

Количество основных ОУ в составе проектируемого усилителя	Минимальное значение требуемого коэффициента усиления (K_0) ОУ	Ориентировочное значение верхней частоты единичного усиления f_T^* каждого ОУ
1	$K_{расч.}$	$f_{верх.зад.3дБ} \times K_{зад.}$
2	$\frac{K_{расч}}{\sqrt[6]{K_{зад}^5}} \approx \frac{K_{расч}}{1+0,14 \times \sqrt{K_{зад}}}$	$\frac{f_{верх.зад.3дБ} \times \sqrt{K_{зад}}}{0,643} \times \left[0,4 + 0,002 \times (\sqrt{K_{зад}} - 15)^2 \right]$
3	$\frac{K_{расч}}{\sqrt[6]{K_{зад}^5}} \approx \frac{K_{расч}}{1,15 \times \sqrt{K_{зад}}}$	$1,1 \times f_{верх.зад.3дБ} \times \sqrt[3]{K_{зад.}}$
<p>Примечание 1. Значение f_T^* – ориентировочное с учетом наклона амплитудно-частотной характеристики (20...40) $\frac{дБ}{дек}$.</p> <p>Примечание 2. $f_{верх.зад.3дБ}$ – заданное значение верхней границы полосы пропускания по уровню «минус 3дБ»</p> <p>Примечание 3. $f_{верх.3дБ} \geq \frac{f_{верх.м.зад.}}{\sqrt{M^2 - 1}}$, где М – коэффициент частотных искажений в абсолютных единицах ($M_{абс}$); $f_{верх.м.зад.}$ – заданное значение верхней границы полосы пропускания с заданным значением коэффициента частотных искажений.</p> <p>Примечание 4. $M_{абс} = 10^{\frac{МдБ}{20}} \geq 1$</p>		

Таблица 2 – Ориентировочные параметры некоторых ОУ, необходимые для эскизного проектирования

Тип микросхемы	K_0	f_T , Гц	Аналог	Коррекция АЧХ	ЭДС источника питания, В
140УД7,8,20	$5 \cdot 10^4$	$(0,8...1) \cdot 10^6$	μА741	Внутр.	±15
154УДЗ	$8 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^6$	НА-2500	Внешн.	±15
НА-2530	$2 \cdot 10^6$	$70 \cdot 10^6$	154УД2	Внутр.	±15
НА-2539	$15 \cdot 10^3$	$600 \cdot 10^6$	1433УД1	Внутр.	±15
1420УД1	10^3	$1,5 \cdot 10^9$	NE-5539	Внутр.	±12
140УД30	$5 \cdot 10^5$	$50 \cdot 10^6$	ОР-42	Внутр.	±15

Выбрав тип микросхемы ОУ, следует заполнить таблицу с конкретными параметрами этой микросхемы. Вид таблицы приведен в таблице 3. В списке использованных источников должен быть указан тот справочник, из которого получены параметры выбранной микросхемы.

Таблица 3 – Параметры выбранных микросхемы ОУ

Тип микросхемы ОУ	Напряжение питания	К0	f_T , МГц	Максимальная сила выходного тока, мА	Допустимое сопротивление нагрузки, Ом	Сила входного тока, мкА	Напряжение смещения, В	Сила тока потребления, А	Допустимая рассеиваемая мощность, Вт	Входное сопротивление, МОм	Входная емкость, пФ

Сопоставляя данные таблиц 1 и 2 следует выбрать вариант функциональной схемы усилителя (см. рисунок 1). При выборе функциональной схемы усилителя необходимо проверить выполнение условия:

$$U_{\text{вых.м.зад.}} \leq E_{\text{ПДУ}} - (2...3)B,$$

где $E_{\text{ПДУ}}$ – ЭДС источника питания ОУ.

Если условие не выполняется, то следует усложнить функциональную схему усилителя по сравнению с вариантами, показанными на рисунке 1. В этом случае следует применить для последнего из основных ОУ «плавающее питание».

В этом случае необходимо:

– определить значение коэффициента кратности «плавающего питания»:

$$K_{\text{кратн.}} = \frac{U_{\text{вых.м.зад.}}}{E_{\text{ПДУ}} - (2...3)B};$$

Значение $K_{\text{кратн.}}$ не должно превышать двух единиц.

– скорректировать значение расчетного коэффициента усиления при разомкнутой обратной связи.

Скорректированное значение:

$$K_{расч.} = \frac{F_{треб.} \times K_{зад.}}{K_{крит.}}$$

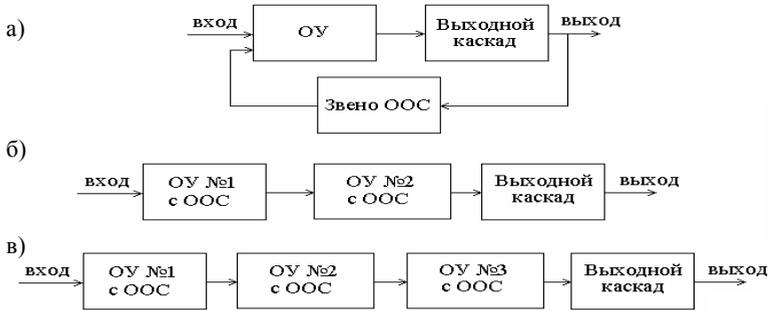


Рисунок 1 – **Варианты функциональных схем усилителя:**

а) функциональная схема усилителя на основе одного ОУ; б) функциональная схема усилителя на основе двух ОУ; в) функциональная схема усилителя на основе трех ОУ

Далее следует выбрать вариант электрической схемы усилителя. Вначале определить тип используемой ООС («Н» или «Y»). ООС типа «Н» обеспечивает большее значение входного сопротивления ОУ при равных с ООС типа «Y» верхних границах полосы пропускания. Поэтому рекомендуется применять именно ООС типа «Н».

Затем следует выбрать вариант построения выходного каскада. Функция этого каскада – усиление мощности. Следовательно, здесь целесообразно использовать одну из разновидностей эмиттерных повторителей (классический или комплементарный). Если требуемое значение выходной мощности:

$$P_{вых.} = \frac{U^2}{2 \times R_{н.зад.}} \quad (\text{где } R_{н.зад.} \text{ – заданное значение сопротивления нагрузки}),$$

превышает 0,08 Вт, то следует выбрать комплементарный вариант выходного каскада. В противном случае можно использовать как комплементарный, так и классический варианты повторителей. При использовании комплементарных

тарного повторителя следует предусмотреть использование схемотехнических приемов подавления нелинейных искажений. С учетом изложенного, электрическая схема усилителя (на основе двух ОУ) имеет вид, представленный на рисунке 2.

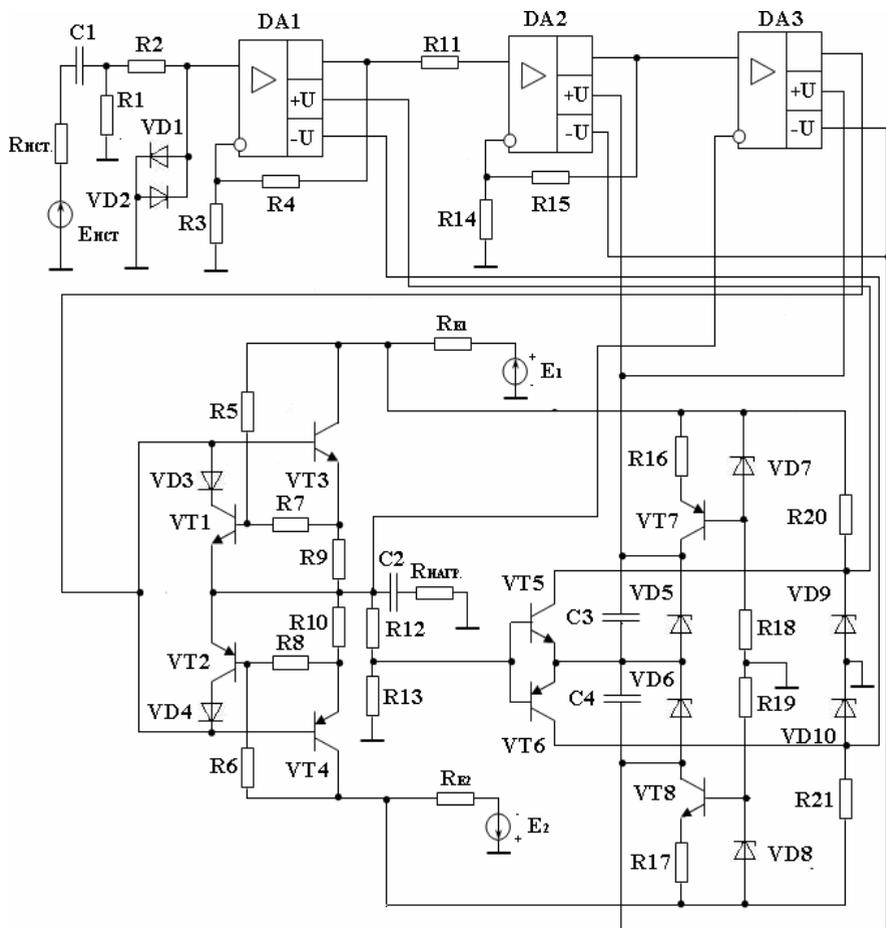


Рисунок 2 – Электрическая схема усилителя на основе двух ОУ (DA1 и DA2) с «плавающим питанием»

На рисунке 2 показаны два звена усиления напряжения на основе ОУ (DA1 и DA2) и выходной каскад усиления мощности (VT3, VT4). Звенья усиления напряжения выполнены по одинаковой схеме с ООС типа «Н» (резисторы R_3, R_4 и R_{14}, R_{15}). Резисторы R_1, R_2 и R_{11} введены в схему для выравнивания сопротивлений, подключенных к двум входам каждого ОУ, что необходимо для термостабилизации. Во входной цепи усилителя DA1 предусмотрена цепь защиты от перенапряжения, реализованная на элементах R_1, R_2 и VD1, VD2.

Выходной каскад усилителя реализован на основе комплементарного повторителя со встроенной динамической защитой от перегрузки по току (VT1, VT2, VD3, VD4, $R_5 \dots R_{10}$), а также уменьшением нелинейных искажений с помощью вспомогательного ОУ (DA3), коэффициент передачи которого (с ООС типа «Н») равен единице. «Плавающее питание» применено для смещения питающих напряжений ОУ DA2 и DA3 с частотой входного сигнала и пропорционально амплитуде выходного сигнала DA1. «Плавающее питание» реализовано с помощью параметрических стабилизаторов на основе стабилитронов VD5, VD6. Пропорциональность и частота смещения напряжения питания обеспечивается, соответственно, делителем напряжения (резисторы R_{12}, R_{13}) и вспомогательным повторителем (VT5, VT6). Для расширения частотного диапазона формирователя «плавающего питания» применены стабилизаторы силы тока (VT7, VT8, резисторы R_{16}, R_{17} , а так же стабилитроны VD7, VD8 и резисторы R_{18}, R_{19}).

Питание усилителя DA1 и вспомогательного повторителя реализовано с помощью параметрических стабилизаторов (стабилитроны VD9, VD10 и резисторы R_{20}, R_{21}).

Эскизное проектирование завершается таблицей, в которой сведены основные параметры проектируемого усилителя.

Таблица 4 – Эскизные значения основных параметров проектируемого усилителя

Наименование и размерность параметра	DA1	DA2	DA3	...	Вых. каскад	Весь усилитель
Коэффициент усиления по напряжению	$\sqrt{K_{зад}}$	$\sqrt{K_{зад}}$	1		1	$K_{зад}$
Коэффициент нелинейных искажений	$\frac{K_{г.зад}}{3}$	$\frac{K_{г.зад}}{3}$	-		$\frac{K_{г.зад}}{3}$	$K_{г.зад}$
Коэффициент частотных искажений на верхней частоте, дБ	$0,4M_{в.зад}$	$0,4M_{в.зад}$	$0,1M_{в.зад}$		$0,1M_{в.зад}$	$M_{в.зад}$
Коэффициент частотных искажений на верхней частоте в абсолютных единицах	M_1	M_2	M_3		M_4	$M_{в.зад.abc}$

На этом эскизное проектирование завершено.

2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ

Электрический расчет усилителя обычно ведется от выхода ко входу и включает в себя следующие этапы:

- расчет по постоянному току;
- расчет по переменному току;
- выбор номинальных значений параметров элементов.

2.1 Расчет по постоянному току

а) Определение требуемого напряжения питания.

$$E_1 = E_2 = \min E_{II} = 1,05 \times [1,2 \times U_{\text{вых.т.зад.}} + U_{R9} + U_{\text{бэ.3}} + 2,5B],$$

здесь $U_{R9} \leq 0,6B$;

$$U_{\text{бэ.3}} \approx 0,65B.$$

Далее следует выбрать значение E_n как ближайшее целое больше рассчитанного минимального значения.

б) Выбор транзисторов производится по четырем параметрам:

$$\text{из справочника} \left\{ \begin{array}{l} U_{\text{кэ.доп.}} \geq \max U_{\text{кэ}} \\ I_{\text{к.доп.}} \geq \max I_{\text{к.средн.}} \\ P_{\text{к.доп.}} \geq \max P_{\text{трз.}} \\ f_T \geq f^*_{\text{верх.трз}} \end{array} \right\} \text{из расчета.}$$

в) Для транзисторов VT3 и VT4:

$$\begin{aligned} \max U_{\text{кэ.3}} &= \max U_{\text{кэ.4}} = E_n + U_{\text{вых.т.зад.}}; \\ \max I_{\text{к.3.средн.}} &= \max I_{\text{к.4.средн.}} = \frac{I_{\text{вых.т.}}}{\pi}, \text{ здесь } I_{\text{вых.т.}} = \frac{U_{\text{вых.т.зад.}}}{R_{\text{н.зад.}}}; \end{aligned}$$

$$\max P_{к.3} = \max P_{к.4} = [0,32 \times E_{II} \times U_{\text{вых.т.зад.}} - 0,25 \times U_{\text{вых.т.зад.}}^2] \times \frac{1}{R_{н.зад.}} ;$$

$$f_{\text{верх.3}}^* = f_{\text{верх.4}}^* \approx 4 \times f_{\text{верх.зад.}}^* .$$

Выбор транзисторов производится с помощью справочника, который должен быть указан в списке использованных источников.

Если в справочнике указано значение β в интервале от β_{\min} до β_{\max} , то расчетное значение следует определить по формуле $\beta_{\text{расч}} = \sqrt{\beta_{\min} \times \beta_{\max}}$.

Если выбраны составные транзисторы (например, КТ972, КТ973), то для них следует удвоить значения φ_T и $U_{\text{бэ,покоя}}$.

Выбор транзисторов следует оформить в виде таблицы (см. таблицу 5). Такая таблица оформляется для каждого выбранного типа транзисторов. Комплементарные транзисторы обладают идентичными параметрами, поэтому для них можно оформлять одну таблицу на каждую комплементарную пару.

Таблица 5 – **Выбор транзистора(ов) VT....**

Наименование расчетного параметра	Значение расчетного параметра	Наименование справочного параметра	Значение справочного параметра	Наименование выбранного транзистора	Параметры			
					β	$C_{к}$	R_{I}	$I_{к.о}$
$\max U_{кэ}$, В		$U_{кэ.доп}$, В						
$\max I_{к.среди}$, А		$I_{к.доп}$, А						
$\max P_{мпз}$, Вт		$P_{к.доп}$, Вт						
$f_{\text{верхмпз}}^*$, МГц		f_T , МГц						

г) Расчет параметров цепи динамической защиты выходных транзисторов от перегрузки по току.

Сила тока в нагрузке при коротком замыкании в нагрузке:

$$\Delta I = I_{кз} = \frac{2 \times (\max P_{к.3})}{E_n} .$$

Для динамической защиты сопротивления ограничивающих резисторов:

$$R_9 = R_{10} = \frac{0,6}{\Delta I + \frac{E_{II}}{R_H}}.$$

Сопротивление добавочных резисторов: $R_7 = R_8 = \frac{E_{II} - 0,6}{0,6} \times R_9$.

Сопротивление балластных резисторов: $R_5 = R_6 = \frac{R_7 \times R_H}{R_9}$.

Проверка правильности расчета параметров цепи динамической защиты:

– при коротком замыкании в нагрузке, сила тока в резисторе R_5 :

$$I_{R5} = \frac{E_{II} - 0,6}{R_5};$$

– падение напряжения на резисторе R_9 : $U_{R9} = R_9 \times (\Delta I + I_{R5})$;

– напряжение на базно-эмиттерном переходе VT3: $U_{бэ.3.кз} = U_{R9} + I_{R5} \times R_9$;

Если $U_{бэ.3.кз} \approx 0,6B$ (с погрешностью не более $\pm 10\%$), то расчет цепи динамической защиты выполнен правильно.

д) Выбор диодов VD3 и VD4.

Диоды VD3 и VD4 включены встречно с коллекторными p-n переходами транзисторов VT1 и VT2 и предназначены для предотвращения несанкционированного открывания коллекторных переходов VT1 и VT2 в нерабочий полупериод для соответствующих плеч комплементарного повторителя.

Выбор типа диодов VD3 и VD4 производится по допустимой силе среднего тока диода, которая не должна превышать максимального значения выходной силы тока усилителя DA3 (см. таблицу 3).

е) Выбор транзисторов VT1 и VT2.

Для них: $U_{к.э}$ не имеет значения. Принять $U_{к.э} \approx 1B$;

$$\max I_{к.1.средн} = \max I_{к.2.средн} = \max I_{вых. DA3} \text{ (см. таблицу 3);}$$

$$\max P_{к.1} = \max P_{к.1} = (\max U_{к.э.1}) \times (\max I_{к.1.средн})$$

$$f_{верх.1}^* = f_{верх.2}^* \text{ безразлично.}$$

ж) Расчет параметров преобразователя «плавающего питания».

– определение сопротивлений резисторов R_{12} и R_{13} :

$$R_{13} = (10 \dots 20) \times R_{н} \times \left(0,9 - \frac{1,1}{K_{кратн}} \right), R_{12} = (10 \dots 20) \times R_{н} - R_{13}.$$

– выбор транзисторов VT5 и VT6.

Для них: $\max U_{кэ.5} = \max U_{кэ.6} = E_{ПГУ}$;

$$\max I_{к.5} = \max I_{к.6.средн} \approx 2 \times I_{потребл.ГУ}$$

здесь значение $I_{потребл.ГУ}$ взять из таблицы 3.

$$\max P_{к.5} = \max P_{к.6} = (\max U_{кэ.5}) \times (\max I_{к.6.средн});$$

$$f_T^* = 4 \times f_{верх.м.зад}.$$

– выбор транзисторов VT7 и VT8.

Для них: $\max U_{кэ.7} = \max U_{кэ.8} = E_{П} - E_{ПГУ}$;

$$\max I_{к.7.средн.} = \max I_{к.8.средн.} \approx 2 \times I_{потребл.ГУ} + 0,005 \text{ А};$$

$$\max P_{к.7} = \max P_{к.8} = (\max U_{кэ.7}) \times (\max I_{к.7.средн});$$

f_T^* не имеет значения.

– выбор стабилитронов VD5 и VD6.

Выбор производится по трем параметрам:

Напряжение стабилизации: $U_{см.5} = U_{см.6} = E_{ПГУ}$

(это равенство должно выполняться с погрешностью не более $\pm 10\%$);

Допустимая сила тока: $I_{см.дон} \geq \max I_{к.7.средн}$;

Допустимая рассеиваемая мощность: $P_{см.дон} \geq (U_{см.5}) \times (\max I_{к.7.средн})$.

Выбор стабилитронов следует оформить в виде таблицы, аналогичной таблице 6.

Таблица 6 – **Выбор стабилизаторов VD...**

Наименование расчетного параметра	Значение расчетного параметра	Наименование справочного параметра	Значение справочного параметра
U_{cm} , В		U_{cm} , В	
$\max I_{к.7.средн.}$, А		$I_{cm.дон.}$, А	
$P_{cm.дон.}$, Вт		$P_{cm.дон.}$, Вт	

– выбор стабилизаторов VD7 и VD8:

Напряжение стабилизации: $U_{cm.7} = U_{cm.8} = (0,1...0,2) \times E_{II}$.

Средняя сила тока: $I_{VD7.средн.} = I_{VD8.средн.} = \frac{10 \times I_{к.7.средн.}}{\beta_7}$.

Рассеиваемая мощность: $P_{VD.7} = P_{VD.8} = (U_{cm.7}) \times (I_{VD7.средн.})$.

Выбор стабилизаторов оформить в виде таблицы, аналогичной таблице 6.

– расчет сопротивлений резисторов R_{16} и R_{17} : $R_{16} = R_{17} = \frac{U_{cm.7} - U_{бэ.7}}{I_{к.7.средн}}$,

здесь $U_{бэ.7} \approx 0,65В$.

– выбор стабилизаторов VD9 и VD10:

Напряжение стабилизации: $U_{cm.9} = U_{cm.10} = E_{IIОУ}$;

Средняя сила тока: $I_{VD9.средн.} = I_{VD10.средн.} = 3 \times I_{потреблОУ} + 0,005 А$.

Рассеиваемая мощность: $P_{VD9} = P_{VD10} = (U_{cm.9}) \times (I_{VD9.средн.})$.

Выбор стабилизаторов оформить в виде таблицы, аналогичной таблице 6.

– расчет сопротивлений резисторов R_{20} и R_{21} :

$$R_{20} = R_{21} = \frac{E_{II} - U_{cm.9}}{I_{VD9.средн}}$$

Далее следует проверить значение глубины обратной связи для стабилизатора силы тока (VT7, VT8):

$$F_7 = F_8 = 1 + S_7 \times R_{16}, \text{здесь } S_7 = \frac{I_{к.7.средн}}{\varphi_T}$$

Если $F_7 \geq 10$, то можно переходить к следующим этапам проектирования. В противном случае следует посоветоваться с преподавателем.

– расчет сопротивлений резисторов R_{18} и R_{19} : $R_{18} = R_{19} = \frac{E_{II} - U_{см.7}}{I_{VD7\text{ средн.}}}$.

– расчет сопротивлений резисторов R_3 , R_{14} и R_{11} .

По постоянному току сопротивления этих резисторов можно определить с помощью следующей формулы: $R_3 = R_{14} \leq \frac{R_{ex.OV}}{20}$.

Для термостабилизации необходимо выполнить условия:

$$R_1 + R_2 = R_3, R_{11} = R_{14}.$$

В расчете для переменного тока (для верхних частот) значения сопротивлений резисторов R_3 и R_{14} могут быть скорректированы в сторону уменьшения. Кроме того, там же будет произведено определение сопротивлений R_1 и R_2 (т.е. распределение суммарного сопротивления на отдельные части).

2.2 Расчет по переменному току

а) Расчет для средних частот.

Здесь необходимо определить значение сопротивлений R_4 и R_{15} для обеспечения требуемого коэффициента усиления:

$$R_4 = R_{15} = R_3 \times \sqrt{K_{зад.}}$$

Кроме того, здесь следует определить КПД проектируемого усилителя:

$$\eta_{ус} = \frac{P_n}{P_{потребл.}}$$

где $P_{потребл.} = 2 \times E_{II} \times I_{потребл.ус}$, $P_n = \frac{U_{вых.м.зад.}^2}{2 \times [R_n \parallel (R_{12} + R_{13})]}$,

$$I_{потребл.ус} = 3 \times I_{потребл.OV} + I_{к.з.сп} + I_{к.7.сп} + I_{K18} + I_{VD9\text{ сред.}};$$

$$I_{к.з.сп} = \frac{U_{вых.м.зад.}}{\pi \times [R_n \parallel (R_{12} + R_{13})]}, I_{R18} = \frac{E_{II} - U_{см.7}}{R_{18}};$$

б) Расчет для низких частот.

Здесь производится расчет значений емкости разделительных конденсаторов C_1, C_2 .

При расчете емкостей разделительных конденсаторов следует учитывать то, что сопротивление во входной цепи проектируемого усилителя значительно больше, чем в выходной цепи. Поэтому, для уменьшения габаритов конденсаторов, следует выбрать постоянную времени входной цепи в три раза больше, чем постоянная времени выходной цепи:

$$C_2 = \frac{1}{2 \times \pi \times f_{\text{нижн. зад.}} \times R_n \times \sqrt{M_{\text{нижн.}}^2 - 1}}.$$

Здесь значение $M_{\text{нижн.}}$ должно быть выражено в абсолютных единицах.

$$C_1 = \frac{3}{2 \times \pi \times f_{\text{нижн. зад.}} \times \sqrt{M_{\text{нижн.}}^2 - 1} \times (R_{\text{ист.}} + R_1)}.$$

Значение сопротивления R_1 принять (временно) равным R_3 (значение сопротивления R_1 будет определено в расчете для верхних частот и там же, возможно, будет произведено уточнение значения емкости C_1).

Блокирующие конденсаторы C_3, C_4 предназначены для уменьшения пульсации напряжения. Их емкость не должна превышать 1 мкФ и может быть уточнена на этапе моделирования.

в) Расчет для верхних частот.

Здесь следует начать с анализа графика АЧХ выбранного (в качестве DA1 и DA2) ОУ. Если график АЧХ (при коэффициентах усиления больших, чем $\sqrt{K_{\text{зад}}}$) имеет в области верхних частот два наклона – $20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ и $40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, то частоту трехдецибелной верхней границы полосы пропускания каждого ОУ (DA1 или DA2) можно определить с помощью следующей формулы:

$$f_{\text{верх.3дБ DA1,2}} = (0,643 + 0,337 \times e^{\frac{-0,7 \times f_1}{f_2}}) \times f_1,$$

здесь f_1 – частота взаимного пересечения графика АЧХ ОУ и линии

$$K = \sqrt{K_{\text{зад.}}} ;$$

f_2 – частота излома асимптотической АЧХ ОУ (переход от наклона $20 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$ к наклону $40 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$).

Значения частот f_1 и f_2 следует определить из графика АЧХ, как показано на рисунке 3.

На рисунке 3 показаны два варианта (линии 1,2) расположения линии $K = \sqrt{K_{\text{зад}}}$.

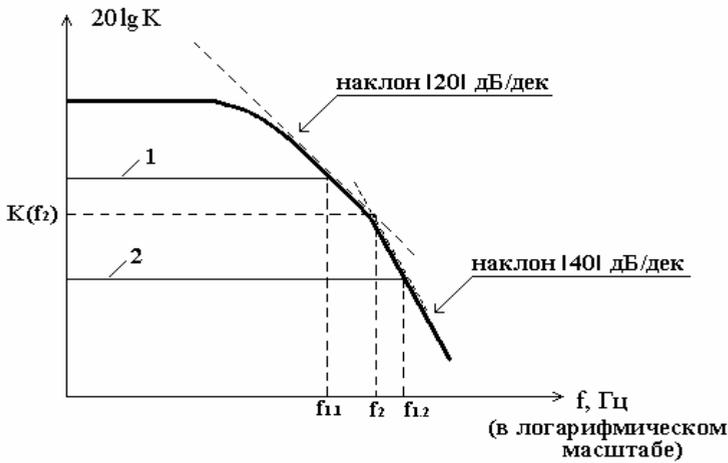


Рисунок 3 – Вид типовой АЧХ ОУ

В первом варианте частота $f_1 = f_{1.1}$ попадает на участок АЧХ с наклоном $20 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$. А во втором варианте частота $f_1 = f_{1.2}$ попадает на участок АЧХ с наклоном $40 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$. Далее следует определить значение верхней частоты полосы пропускания двух ОУ (DA1 и DA2) с учетом заданного значения коэффициента частотных искажений.

Для варианта №1:

$$f_{\text{верх.М. DA (1+2)}} = 0,643 \times f_{\text{верх.3дБ DA1,2}} \times \sqrt{M_{\text{в.зад.абс.}}^2 - 1}.$$

При определении значения верхней частоты полосы пропускания для варианта №2, следует посоветоваться с преподавателем.

Если значение частоты $f_{\text{верх.М.ДА}(1+2)} = f_{\text{верх.зад.}}$ (с погрешностью не более $\pm 10\%$), то можно переходить к последующим этапам проектирования. И первое, что теперь следует сделать – это уточнить значения сопротивлений в цепи ООС основных ОУ (DA1 и DA2).

В разделе 2.1 были определены значения сопротивлений $R_3 = R_{14}$ без учета верхних частот.

Для того, чтобы входные цепи ОУ DA1 и DA2 не понижали верхнюю границу полосы пропускания проектируемого усилителя, необходимо выбрать значение сопротивлений $R_3 = R_{14}$ следующим образом:

$$R_3 = R_{14} \leq \frac{1}{4 \times \pi \times f_{\text{верх.3дБ DA1,2}} \times C_{\text{вх.ОУ}}}.$$

Здесь $C_{\text{вх.ОУ}}$ – входная емкость выбранных ОУ. (Если значение $C_{\text{вх.ОУ}}$ для выбранного усилителя найти не удастся, то можно взять типовое значение для широкополосных ОУ 4 пФ).

Если полученные значения сопротивлений $R_3 = R_{14}$ отличаются от значений из раздела 2.1 более чем на $\pm 10\%$, то следует скорректировать значения сопротивлений R_4 и R_{15} по формуле:

$$R_4 = R_{15} = R_3 \times \sqrt{K_{\text{зад.}}}.$$

Если $f_{\text{верх.м.ДА}(1+2)} \geq 1,1 \times f_{\text{верх.зад.}}$, то следует снизить верхнюю границу полосы пропускания с помощью введения дополнительных конденсаторов (на рисунке 2 не показаны), включенных параллельно резисторам R_4 и R_{15} . Емкость дополнительных конденсаторов можно определить с помощью следующих формул.

$$\text{Для варианта 1: } C_{\text{дон.1}} = \frac{f_{\text{верх.3дБ DA1,2}}}{2 \times \pi \times R_4 \times k(f_2) \times f_2 \times f_{\text{верх.зад.}}}.$$

Здесь $k(f_2)$ – значение коэффициента усиления ОУ для частоты f_2 .

Для варианта 2: $C_{дон.2} = \frac{f_{верх.зdB DA1,2}}{2 \times \pi \times R_4 \times k(f_2)^2 \times f_2 \times f_{верх.зад.}}$.

Если $f_{верх.зdB DA1,2} \leq 0,9 \times f_{верх.зад.}$, то следует проконсультироваться у преподавателя.

Далее следует выбрать диоды VD1 и VD2, а так же определить сопротивления резисторов R_1 и R_2 .

Диоды следует выбрать с минимальной емкостью закрытого состояния ($C_{диод}$). Другие параметры безразличны.

Значение сопротивления R_2 следует выбрать таким образом, чтобы постоянная времени $[R_2 \times (2 \times C_{диод} + C_{ex.OV})]$ соответствовала частоте среза в 2...3 раза выше, чем $f_{верх.зад.}$

$$R_2 \approx \frac{1}{2 \times \pi \times (2 \dots 3) \times f_{верх.зад.} \times (2 \times C_{диод} + C_{ex.OV})}$$

$$R_1 = R_3 - R_2.$$

Если значение сопротивления $R_1 \approx R_{ист}$, то необходимо увеличить значения сопротивлений R_4 и R_{15} в $\sqrt{2}$ раз.

Если значение сопротивления R_2 будет меньше 100Ом, то следует проконсультироваться у преподавателя.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСТРОЙКИ УСИЛИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

3.1 Подготовка к моделированию

Здесь необходимо вспомнить приемы работы с ППП «OrCAD». Моделирование ведется по электрической схеме аналогичной показанной на рисунке 2. Здесь значения сопротивлений резисторов $R_{E1} = R_{E2}$ можно определить по формуле:

$$R_E = R_{E1} = R_{E2} = \frac{0,05 \times E_{II}}{I_{\text{потреб. ус.}}},$$

где значение $I_{\text{потреб. ус.}}$ было определено в разделе 2.2.а.

Если в библиотеке транзисторных моделей нет составных транзисторов КТ972, КТ973, то их можно заменить соответствующим (по схеме Дарлингтона) включением двух транзисторов (имеющихся в библиотеке) с аналогичными значениями C_k и f_m . При этом следует изменить в модели используемых транзисторов значение β , приняв его равным (у каждого из двух транзисторов заменяющих один составной) $\sqrt{\beta_{\text{сост}}}$.

Для моделирования по постоянному току рекомендуется использовать модель усилителя $\mu A741$ из библиотеки OPAMP.

Для всех других видов анализа рекомендуется использовать упрощенную модель усилителя HA-2539 из библиотеки HARRIS. Для этого выполнить следующую последовательность действий:

- выделить элемент правой кнопкой мыши и выбрать Edit PSpice Model;
- удалить содержимое нижнего окна, и ввести текст упрощенной модели:

```

*HA2539 MACRO-MODEL
* NODE 3 -> +IN, NODE 4 -> -IN, NODE 16 -> OUTPUT
* NODE 20 -> +Vs, NODE 21 -> -Vs
.SUBCKT HA-2539/HA 3 4 20 21 16 params: Kyc=4E4
Eamp 5 0 value={Kyc*V(3,4)}
r 5 16 50
cout 16 0 80n
rin+ 3 0 5meg
rin- 4 0 5meg
.ends

```

3.2 Моделирование по постоянному току (в режиме DC)

В моделировании по постоянному току следует замкнуть конденсаторы C_1 и C_2 накоротко, а конденсаторы C_3, C_4 можно отключить.

– вначале следует разомкнуть цепь резистора R_{11} и наблюдать на экране монитора вид статической зависимости выходного напряжения ОУ DA1 от напряжения источника сигнала. Правильный вид такой зависимости изображен на рисунке 4.

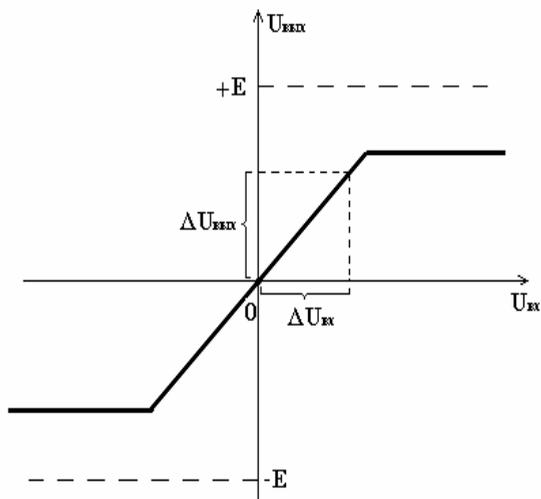


Рисунок 4 – Вид статической характеристики DA1

Здесь должно выполняться условие: $\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \sqrt{K_{\text{зад}}}$.

– затем следует восстановить цепь резистора R_{11} и отключить неинвертирующий вход DA3 от выхода DA2. При этом вид статической характеристики двух ОУ DA1 и DA2 должен быть аналогичен предыдущему варианту

за исключением того, что $\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = K_{\text{зад}}$.

– на следующем этапе следует восстановить подключение входа DA3 к выходу DA2, но отключить выход DA3 от базовых выводов VT3 и VT4 комплементарного повторителя. В этом случае зависимость $U_{\text{вых.DA3}}$ от $U_{\text{вх}}$ должна остаться такой же, как зависимость $U_{\text{вых.DA2}}$ от $U_{\text{вх}}$.

– далее следует восстановить подключение выхода DA3 ко входу комплементарного повторителя (VT3, VT4) и наблюдать зависимость выходного напряжения всего усилителя от входного сигнала. Эта зависимость должна совпадать с аналогичной зависимостью из предыдущего этапа.

3.3 Моделирование настройки по переменному току

Вначале следует восстановить исходные подключения конденсаторов $C_1 \dots C_4$ и заменить источник сигнала на источник переменного напряжения.

Задание диапазона анализируемых частот следует осуществить в логарифмическом масштабе с двумя точками на частотной октаве (или четырьмя точками на частотной декаде). Далее следует наблюдать на экране монитора вид графика АЧХ, из которого следует определить верхнюю и нижнюю границы полосы пропускания. Если значения на границах частот на границах полосы пропускания отличаются от заданных значений более чем на 10%, то следует скорректировать емкости конденсаторов: для нижней границы – C_1, C_2 , а для верхней границы – $C_{\text{дон}}$ (если он введен в схему). Завершается моделирование по переменному току определением коэффициента нелинейных искажений для среднего геометрического значения частоты $f_{\text{средн.}} = \sqrt{f_{\text{нижн.зад.}} \times f_{\text{верх.зад.}}}$ при заданном значении амплитуды входного напряжения.

3.4 Моделирование влияния разброса сопротивлений резисторов на основные параметры усилителя

Здесь следует провести анализ по методу Монте-Карло от диапазона разброса сопротивлений ($\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$).

Исследуемые параметры: коэффициенты усиления и искажений, граничные частоты полосы пропускания.

Результаты записать в таблицу 7.

Таблица 7 – Влияние разброса сопротивлений

Параметр	Допустимый разброс сопротивлений		
	5%	10%	20%
Коэффициент усиления			
Верхняя граница полосы пропускания, МГц			
Нижняя граница полосы пропускания, МГц			
Коэффициент нелинейных искажений			

3.5 Моделирование влияния изменения температуры на основные параметры усилителя

Здесь проводится анализ влияния температуры при следующих ее значениях: -50°C ; 0°C ; $+50^{\circ}\text{C}$.

Результаты следует записать в таблицу 8.

Таблица 8 – Влияние измерений температуры

Параметр	Значения температуры		
	-50°C	0°C	$+50^{\circ}\text{C}$
Коэффициент усиления			
Верхняя граница полосы пропускания, МГц			
Нижняя граница полосы пропускания, Гц			
Коэффициент нелинейных искажений			

Завершается этап моделирования представлением(распечаткой):

- результатов определения нелинейных искажений (по 10 гармоникам);
- графиков статической характеристики всего усилителя;
- графика АЧХ всего усилителя;
- таблиц 7 и 8;
- графика временной зависимости (один или два периода) выходного напряжения для частоты $f_{\text{средн}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное внимание преподавателя при проверке пояснительной записки к курсовому проекту будет обращено на следующее:

- составление и оформление пояснительной записки СТП;
- соответствие задания выполненному проекту;
- правильность и обоснованность расчетов;
- правильности построения текста и пользования терминами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО СГАУ 02068410-004-2007. [Текст].
2. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст]: в 2т. / У. Титце, К. Шенк / Пер. с нем. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2008. – 1774 с.
3. Операционные усилители и компараторы. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2002. – 560 с.
4. Справочник разработчика и конструктора РЭА. [Текст] – М., 1993. – 526 с

Учебное издание

Составители:

*Дмитриев Юрий Степанович
Грецов Андрей Александрович*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
С МОДЕЛИРОВАНИЕМ НАСТРОЙКИ НА ЭВМз**

Методические указания к курсовому проектированию

Редактор И.И. Спиридонова
Компьютерная доверстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 25.04.2010 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. С. – 15/2010

Самарский государственный аэрокосмический университет
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.