

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Кафедра электроники и схемотехники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к курсовому проектированию по дисциплине “**схемотехника**”

Проектирование усилителя-фотоприёмника ВОСПИ

Санкт-Петербург

2019 г

УДК

Методические указания к курсовому проектированию по курсу «схемотехника» студентам специальности 09.03.01 и 11.03.02.

Составители:

План УМД 2019 г.

Одобрено редакционно-издательским советом Университета.
Протокол № от 12.г.

Приведены основные требования к курсовому проектированию, примеры заданий, указания по выполнению курсового проекта, узловые вопросы расчёта принципиальной схемы. Даются практические советы по проектированию широкополосных и импульсных усилителей, выполненных на интегральных схемах, полевых и биполярных транзисторах, используемых в телевидении, волоконных системах связи, измерительной технике, в радиорелейных линиях связи. В проекте предусмотрено использование компьютерной программы Fastmean, разработанной в Университете.

Методические рекомендации предназначены для обучения по специальности 09.03.01 и 11.03.02.

Ответственный редактор .

Рецензент

1.Содержание и порядок выполнения проекта

1.1.Требования к проектируемому устройству

Содержанием курсового проекта является проектирование широкополосного RC -усилителя, источником сигнала которого является генератор тока. Подобные усилители находят широкое применение помимо оптической связи в видеоаппаратуре, а также в блоках управления радио- и видеотехникой. Особенность проектирования заключается в том, что по ряду показателей – стабильности коэффициента усиления, динамическому диапазону входных сигналов и полосы пропускания, к усилителям предъявляются достаточно высокие требования. Поэтому данное методическое указание поможет в проектировании подобных устройств.

1.2.Проектное задание.

Задание на курсовой проект представляет собой технические условия, по которым надлежит спроектировать устройство, работающее в режиме *малого сигнала*. В задании каждому студенту указываются следующие данные:

- тип полевого транзистора,
- тип биполярного транзистора,
- тип операционного усилителя,
- напряжение источника питания E_0 ,
- сопротивление внешней нагрузки R_{2H} ,
- нижняя рабочая частота $f_{H\sqrt{2}}$,
- верхняя рабочая частота $f_{B\sqrt{2}}$
- ..выходное напряжение U_2 .

1.3.Содержание курсового проекта.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и чертежа принципиальной схемы с перечнем элементов. Пояснительная записка содержит задание, описание схемы усилителя, расчет основных параметров усилителя и элементов принципиальной схемы, сравнение полученных результатов с требованиями технического задания. В конце записки приводится список используемой литературы, перечень элементов принципиальной схемы и оглавление. Чертеж принципиальной схемы и перечень элементов вычерчивается с помощью компьютера на отдельных листах.

Состав и порядок расположения материала в курсовом проекте:

1. Титульный лист с *обязательным* указанием номера зачетной книжки, Фамилией И.О. студента, выполнившего проект.
2. Задание в соответствии с вариантом.

3. Основная часть: отражение хода рассуждения о работе схемы, параметров расчета, формул и обозначения величин, их единиц измерения; схемы компьютерного моделирования с параметрами и анализом их работы, сопоставление с расчетными данными, выводами и т.д.

4. Заключение о свойствах спроектированной схемы и соответствии параметров её работы требованиям технического задания по частотному диапазону и уровню выходного сигнала.

5. Список используемой литературы.

6. Приложения: чертёж принципиальной электрической схемы, спецификация – перечень элементной базы схемы с параметрами, выполненными в соответствии с ЕСКД.

Нумерация страниц обязательна.

1.4. Общие правила выполнения.

Курсовой проект оформляется в соответствии с ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Курсовой проект оформляется на стандартных листах (203 X 288) мм, которые сшиваются в папке скоросшивателя. Писать надо на одной стороне листа, оставляя поля 2-3 см. Страницы и рисунки нумеруются, иллюстрированный материал выполняется по правилам единой конструкторской документации. Расчётные формулы приводятся полностью с объяснением буквенных обозначений. Расчетные части должны отражать формулы, вычисления и их результаты с единицами измерения величин.

Числовые значения подставляются в основных единицах. Результат расчёта заканчивается указанием единицы измерения. Пояснения излагаются литературным языком, без сокращений и жаргонных выражений.

В тексте приводятся таблицы элементов и результаты расчетов; указываются литературные источники, из которых заимствованы материалы. Список использованной литературы приводится в конце работы.

Задания, выполненные с грубыми ошибками или не соответствующие должному варианту, возвращаются студентам для исправления. Исправления ошибок приводятся в конце выполненной работы на отдельных листах.

При оформлении в текстовом редакторе следует соблюдать следующие параметры: шрифт «times new roman», размер шрифта – 14 или «arial» размер –12), печать через 1,5 интервала. Цвет шрифта – черный.

Названия глав, параграфов, пунктов, подпунктов следует начинать с абзаца, их можно писать более крупным кеглем, чем текст. Допускается выделение интенсивностью (полужирный шрифт).

Каждая глава должна начинаться с новой страницы. Названия глав (разделов), параграфов (подразделов) должны соответствовать оглавлению (содержанию) и быть оформлены единообразно во всем документе.

Страницы работы нумеруются арабскими цифрами (нумерация сквозная по всему тексту). Номер страницы проставляют на нижней части листа без точки, черточек и скобок. Титульный лист включается в общую нумерацию, при этом номер на нем не ставится.

Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включают в общую нумерацию страниц курсовой работы (проекта).

В тексте курсового проекта единицы измерения, размерности и обозначения должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002 «Единицы величин», технологическим стандартам и рекомендациям международных организаций: ИСО, МЭК, МОЗМ и др.

По ГОСТ 7.32–2001 формулы и уравнения следует выделять из текста в отдельную строку. Над и под каждой формулой или уравнением нужно оставить по пустой строке. Если уравнение не умещается в одну строку, то оно должно быть перенесено после знаков равенства, умножения, сложения, вычитания и знаков соотношения ($<$, $>$ и т. п.), причем этот знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «Х».

Переносить на другую строку допускается только самостоятельные члены формулы. Не допускается при переносе разделение показателей степени, выражений в скобках, дробей, а также выражений, относящихся к знакам корня, интеграла, суммы, логарифма, тригонометрических функций и т. п.

Если нужны пояснения к символам и коэффициентам с расшифровкой их размерностей, то они приводятся сразу под формулой в той же последовательности, в которой они идут в формуле. Перечень располагают с новой строки после слова «где» в виде колонки; символ отделяют от его расшифровки знаком тире. После расшифровки каждого символа ставят точку с запятой, размерность буквенного обозначения отделяют от текста запятой.

По ГОСТ 7.32–2001 на все таблицы в тексте должны быть ссылки. Таблица должна располагаться непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице. Все таблицы нумеруются.

Слово «Таблица» пишется полностью. Название таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире (например: Таблица 3 – Характеристики каскада предварительного усиления). Точка в конце названия не ставится.

Форма таблицы и все линии в ней выполняются тонкими линиями одинаковой толщины. Заголовок таблицы отделяется линией от остальной части таблицы.

Заголовки граф таблицы начинают с прописных букв, а подзаголовки со строчных, если они составляют одно предложение с заголовком. В конце заголовков и подзаголовков знаки препинания не ставятся. Заголовки указываются в единственном числе. Графа No п/п без необходимости в таблицу не включается. Если цифровые данные в таблице не приводятся, то в графе ставят прочерк (тире).

При переносе таблицы на следующую страницу название помещают только над первой частью, при этом нижнюю горизонтальную черту, ограничивающую первую часть таблицы, не проводят. Над другими частями также слева пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы (например: Продолжение таблицы 1).

Вывод приводят без заголовка, если он является непосредственным продолжением излагаемого материала и грамматически связан с вводной фразой текста, и с заголовком, если вывод имеет самостоятельное значение. Выводы не нумеруются.

По ГОСТ 7.32–2001 на все иллюстрации (рисунки, чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы и т. п.) в тексте должны быть даны ссылки. Рисунки должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице.

На осях графиков указывают наименование и единицу величины, числовые значения которых помещены у делений шкалы на осях. Если на рисунке имеется несколько графиков, то они вычерчиваются разными линиями (непрерывной, штриховой и т. д.), или разными цветами, или около линий ставят порядковые номера с последующей расшифровкой.

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, нумеруются арабскими цифрами, при этом нумерация сквозная, но допускается нумеровать и в пределах раздела (главы).

Подпись к рисунку и название располагается под ним посередине строки. Слово «Рисунок» пишется полностью. Например: Рисунок 1 – Принципиальная схема интегрального усилителя. Точка в конце названия не ставится.

Варианты технических заданий.

Последние три цифры зачетной книжки студента определяют технические требования к курсовому проекту. Например, если номер зачетной книжки 12345**678**, то номер вариант **678**.

Третья цифра с конца номера зачетной книжки из них определяет классификационный индекс полевого транзистора КП 307 и его параметры,

приведенные в табл. 1. Напряжение затвор-исток для всех транзисторов принимаем $U_{зи} = -1 \text{ В}$.

Табл. 1. Параметры полевых транзисторов

№	Параметр	Нач. ток стока $I_{с \text{ нач}}$	Крутизна макс. S_{max}	Напряжение отсечки $U_{\text{отс.}}$
	Единицы измерения	мА	мА/В	В
0	КП 307А	6	9	-1.5
1	Б	10	15	-2.5
2	В	10	15	-2.5
3	Г	16	12	-3.5
4	Д	16	12	-3.5
5	Е	3	8	-1.5
6	Ж	14	4	-3.5
7	А	6	9	-1.5
8	Б	10	15	-2.5
9	В	10	15	-2.5

Для всей линейки модели полевых транзисторов КП 307 входная ёмкость составляет $C_{зи}=5\text{пФ}$, проходная ёмкость $C_{зс}=1.5 \text{ пФ}$.

Вторая цифра с конца номера зачетной книжки определяет типы биполярных транзисторов.

Параметры биполярных транзисторов малой мощности типа n-p-n приведены в табл. 2.

Табл. 2. Параметры биполярных транзисторов

№	Тип транзистора	P_k	$U_{кэ \text{ max}}$	$I_{к \text{ max}}$	$h_{21\text{max}}$	$h_{21\text{min}}$	f_T	C_k	τ_k
		мВт	В	мА			МГц	пФ	пс
0	КТ339А	250	25	25	100	25	300	2	25
1	КТ342Б	250	25	50	500	200	300	8	300
2	КТ325А	225	15	30	90	30	800	2.5	125
3	КТ325В	225	15	30	400	160	1000	2.5	125
4	КТ355А	225	15	30	300	80	1500	2	60
5	КТ375А	200	30	10	300	60	250	5	300
6	КТ382А	100	15	20	330	40	1800	2	15
7	КТ315А	150	25	100	120	30	270	7	150
8	КТ316В	150	15	30	120	40	800	3	150
9	КТ373Г	150	60	50	125	50	250	8	200

Последняя цифра номера зачетной книжки (табл. 3) определяет величину напряжения источника питания E_0 (Рис.1), величину действующего (среднеквадратического) значения выходного напряжения $U_{2н}$, полосу пропускания $f_{н\sqrt{2}}$ и $f_{в\sqrt{2}}$ и тип используемого ОУ.

Табл. 3. Параметры элементов схемы

№	Источник питания E_0	Выходное напряжение U_{2H}	Нижняя частота $f_{H\sqrt{2}}$	Верхняя частота $f_{B\sqrt{2}}$
	В	В	кГц	МГц
0	9	2	10	1
1	10	2.2	20	2
2	11	2.4	30	3
3	12	2.3	10	2
4	9	2	20	1
5	10	2.2	30	2
6	11	2.4	10	3
7	12	3	20	2
8	9	2	30	1
9	10	2.5	30	2

Основные параметры микросхемы AD1 операционного усилителя (ОУ) определяется чётным или нечётным значением последней цифры номера зачетной книжки (табл.4). Цифра 0 считается четной.

Табл. 4. – Основные параметры ОУ

	тип ОУ	Частота единичного усиления f_1	Коэффициент усиления ОУ
чётная	ОРА622	250 МГц	80 дБ
нечётная	ОРА655	400 МГц	55 дБ

Конденсаторы С1-С8 выбираются студентами равными 1...5 мкФ.
Ток источника сигнала $I_{m1}=1\text{мкА}$. Сопротивление внешней нагрузки $R_{2H} = 3 \text{ кОм}$.

2. Описание принципиальной схемы

Принципиальная схема усилителя представлена на рис. 1. Усилитель состоит из предварительных каскадов и основного усилителя [1,2]. Источником сигнала является ток фотодиода – V1. Даже когда свет падает на фотодиод V1, его внутреннее сопротивление при фототоке $I_{m1}=1\text{мкА}$ остаётся большим. Вследствие этого источник сигнала является генератором тока. Элементы C1, R2 образуют развязывающий фильтр нижних частот по цепи питания (E_0).

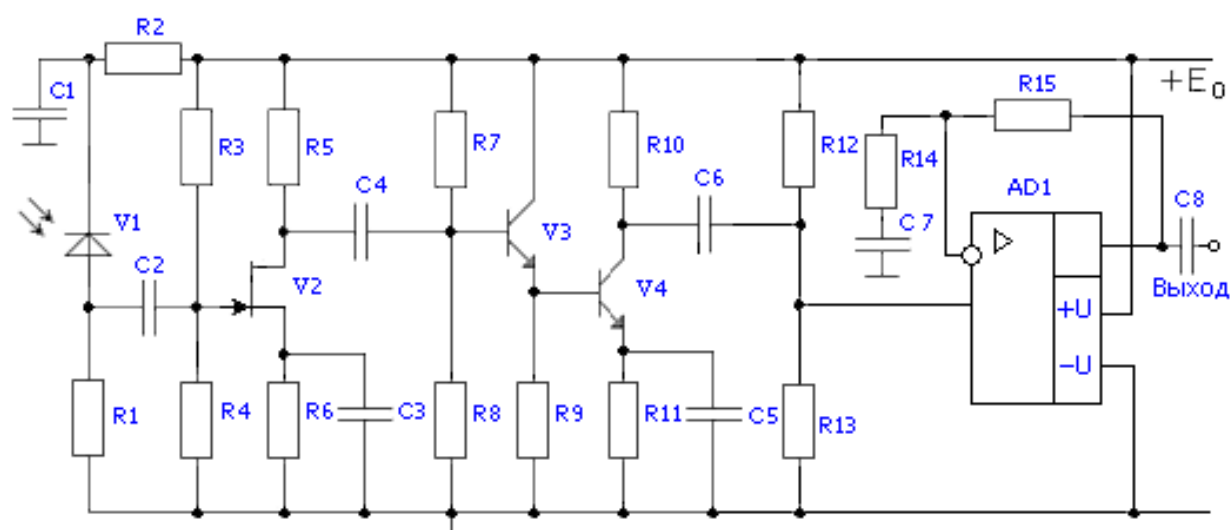


Рис.1 Принципиальная схема усилителя.

В качестве активного элемента первого каскада выбран полевой транзистор, так как он обладает меньшим уровнем собственных шумов и малым входным током затвора. Входная цепь устройства образована входным сопротивлением каскада $V2$ и суммарной емкостью C , состоящей из проходной емкости C_d фотодиода $V1$, входной емкости $C_{вх}$ транзистора $V2$ и емкости монтажа C_m . Хотя входное сопротивление полевого транзистора $V2$ – $r_{зи}$ велико, входное сопротивление каскада определяется делителем напряжения на его затворе (параллельным соединением резисторов $R3$ и $R4$). Данная входная цепь и будет определять частоту верхнего среза $f_{ВХ}$. Биполярный транзистор $V3$, включенный по схеме общий коллектор (ОК) служит буферным каскадом с большим входным и малым выходным сопротивлениями. Транзистор $V4$ включен по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Его нагрузкой является делитель напряжения на резисторах $R12$ и $R13$, обеспечивающий потенциал средней точки однополярного напряжения питания E_0 операционного усилителя $AD1$. По этой причине $R12 = R13$. Чтобы коэффициент усиления каскада на $V4$ не снижался из-за шунтирования его нагрузки $R10$ резисторами $R12$ и $R13$ их следует выбирать равными ($5 \cdot R10$), но не более 2МОм , поскольку входные токи ОУ не превышают десятков **пикоампер** (посмотреть характеристики

можно *Data Sheets* на ОУ на сайтах фирм-производителей и справочных материалов для разработчиков), а токи утечки по печатной плате могут достигать единиц **наноампер**.

Для расширения полосы пропускания в области верхних частот в каскаде ОЭ может быть применена отрицательная обратная связь (ОС) и основанная на ней эмиттерная коррекция (R11, C5) [6] – рис.14. В области нижних частот АЧХ определяется разделительными конденсаторами C2, C4, C6, C7, C8. Блокировочные конденсаторы C3 и C5, устраняющие местную обратную связь по сигналу в транзисторных каскадах, также могут использоваться для частотной коррекции ширины рабочего диапазона частот.

Заметим, что для медленных (температурных) изменений токов, протекающих через транзистор, постоянная времени $R6C3$ и $R11C5$ мала, для таких дестабилизирующих воздействия резисторы $R6$ и $R11$ оказываются незашунтированными и образуют ООС, стабилизирующую работу этих каскадов по температуре.

Основное усиление сигнала по напряжению выполняет транзисторный каскад на транзисторе V4 и ОУ AD1. Операционный усилитель должен довести выходное напряжение на средней частоте диапазона до заданного (действующего значения) U_2 (табл. 3). Сигнал подаётся на неинвертирующий вход. На этот же вход подаётся напряжение смещения с делителя $R12, R13$. Оно необходимо для получения симметричного питания ОУ в схеме с однополярным источником E_0 .

Для того, чтобы ОУ не усиливал постоянное напряжение искусственной средней точки $E_0/2$ в схему введен конденсатор C7. На постоянном токе его сопротивление равно бесконечности (разрыв цепи) и ОУ повторяет постоянную составляющую входного напряжения $E_0/2$, но усиливает в заданное число раз сигнал.

3.Расчет элементов схемы по постоянному току

Расчет элементов необходимо начать с обеспечения режимов работы фотодиода и транзисторов по постоянному току. Схема усилителя по постоянному току представлена на рис. 2. На этом рисунке показаны только те элементы схемы, по которым протекают постоянные токи.

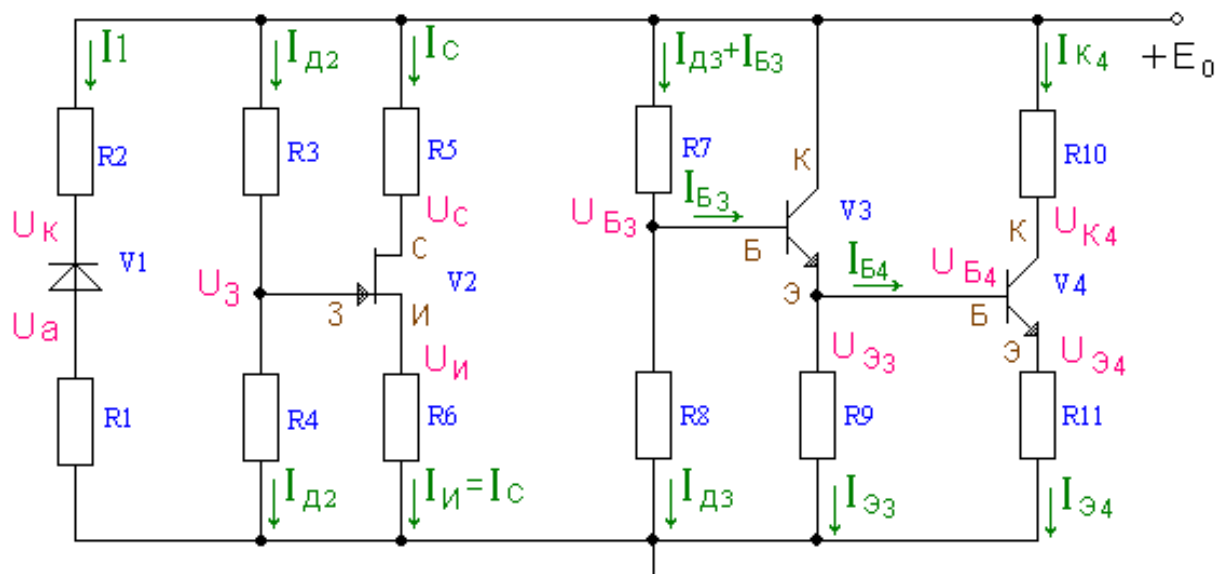


Рис.2 Схема транзисторной части усилителя по постоянному току.

В связи с тем, что конденсаторы не пропускают постоянный ток, рис. 2 представляется состоящим из трех независимых фрагментов (каскадов) схемы: фрагмент с фотодиодом, с полевым транзистором и с биполярными транзисторами.

3.1 Предварительный расчет резисторов по постоянному току

Результаты, которые необходимо представить по данному пункту:

1. Описание работы цепи фотодиода.
2. Подбор и расчет параметров цепи фотодиода.
3. Выбор номинальных значений сопротивлений резисторов R1 и R2 с указанием их точности.
4. На рис. 3, б по данным варианта построить нагрузочную линию и рабочую точку по постоянному току для рассчитанной цепи фотодиода.
5. Рассчитать сопротивление обратносмещенного *p–n–*перехода фотодиода. Сделать вывод с обоснованием, будет ли оно учитываться в эквивалентной модели фотодиода по переменному сигналу.

3.1.1 Предварительный расчет резисторов диода V1

Параметры фотодиода V1-ФДК-227: рабочее напряжение $U_{раб} = 10V$, темновой ток $I_{тем} = 0,1 \text{ мкА}$, амплитуда фототока $I_{м1} = 1 \text{ мкА}$.

Принципиальная схема цепей питания фотодиода V1 и его типовая вольт-амперная характеристика приведены на рис.3. Обратное (запирающее) смещение на фотодиод подается для вывода его в линейную область ВАХ. Одновременно с этим увеличение напряжения $U_{ак}$ уменьшает проходную емкость фотодиода. На рис. 3,б показана также нагрузочная линия. При отсутствии светового сигнала через фотодиод

протекает темновой ток. Он практически не создаёт падения напряжения на резисторах R1, R2. Вследствие этого к фотодиоду прикладывается всё напряжение питания E₀. При заданном уровне фототока исходная рабочая точка перемещается по нагрузочной линии в точку A. Сопротивление фотодиода постоянному току в этой точке с координатами (I₁, U_{ак}) R_д= U_{ак}/ I₁ составляет несколько мегаом. Выберем напряжение анод-катод фотодиода такое, чтобы рабочая точка оказалась на середине линейного участка вольт-амперной характеристики U_{ак}: |U_{ак}| ≈ E₀ / 2. Тогда на резисторах (R1+R2) должно быть падение напряжения, равное (E₀ – U_{ак}). Задав напряжение на аноде U_а = 0.1·E₀, определяем по закону Кирхгофа напряжение на катоде U_к = U_а + U_{ак}. Теперь, зная фототок, вычисляем сопротивления резисторов R1 и R2:

$$R1 = U_a / I_{m1}; \qquad R2 = (E_0 - U_k) / I_{m1}.$$

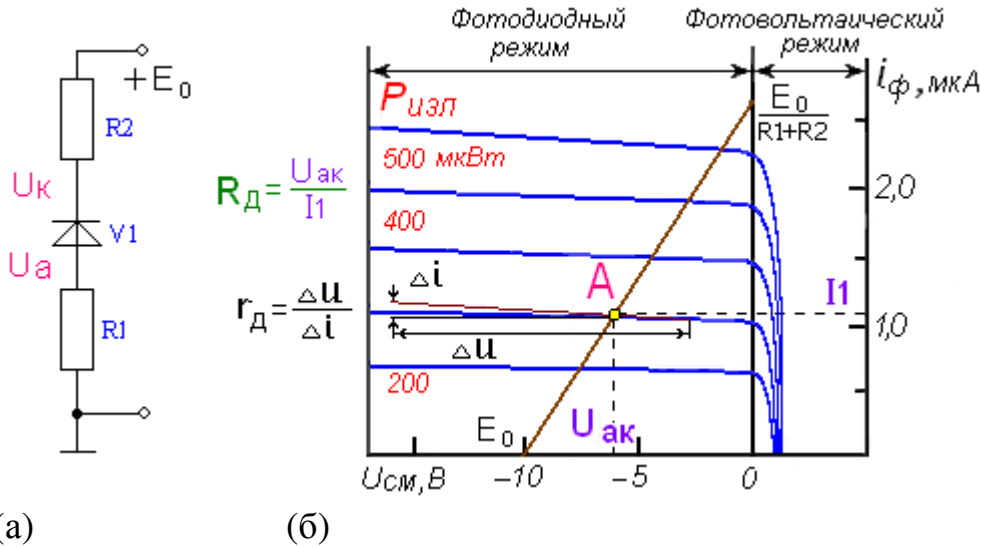


Рис.3 Принципиальная схема цепей питания фотодиода а) и его типовая вольт-амперная характеристика б)

Рассчитанные сопротивления резисторов R1, R2 необходимо выбрать в соответствии с номинальным рядом (Табл.5).

В табл. 5 приведены ряды значащих цифр для всех единиц измерений Ом, кОм, МОм. Выбирается значение, ближайшее к расчетному из ряда заданной точности.

Табл. 5

Класс точности	Шкала номинальных значений сопротивлений и ёмкостей																			
5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62
10%	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56	68

3.1.2 Предварительный расчет по постоянному току каскада на полевом транзисторе V2 (рис.4) [3,4]

Результаты, которые необходимо представить по данному пункту:

1. Описание работы каскада на полевом транзисторе.
2. Подбор и расчет параметров входного каскада.
3. Выбор номинальных значений сопротивлений резисторов $R_3 - R_6$ с указанием их точности.
4. Рассчитать и построить в программе компьютерного моделирования FASTMEAN проходную вольтамперную характеристику полевого транзистора по данным варианта. В расчетной части привести полученную ВАХ.
5. По данным варианта в программе компьютерного моделирования FASTMEAN построить эквивалентную схему каскада на полевом транзисторе по постоянному току по рассчитанным данным и номинальным значениям сопротивлений резисторов $R_3 - R_6$. Сопоставить и проанализировать результаты компьютерного моделирования и расчетных данных. Сделать выводы.
6. Рассчитать сопротивление обратносмещенного $p-n$ -перехода затвор-исток полевого транзистора по данным варианта $R_{зи}$. Сделать вывод с обоснованием, будет ли оно учитываться в эквивалентной модели полевого транзистора по переменному сигналу.

Каждый полевой транзистор имеет свои справочные данные:

Ток стока начальный – $I_{снач}$ (мА);

Максимальная крутизна – $S_{макс}$ (мА/В);

Напряжение отсечки – $U_{отс}$ (В).

Другие показатели: ёмкость затвор-исток – $C_{зи} = 5$ пФ, ёмкость проходная – $C_{зс} = 1.5$ пФ; ток утечки затвора – $I_{ут.з} = 1$ нА; сопротивление затвор – исток $r_{зи} = U_{зи} / I_{ут.з} = 1000$ МОм, для простоты расчетов полагаем одинаковыми.

Принципиальная схема каскада на полевом транзисторе V_2 по постоянному току представлена на рис. 4. Необходимо для заданного типа полевого транзистора вычертить свою вольт-амперную характеристику, используя известные соотношения $I_c = I_{с, нач} \cdot (1 - U_{зи} / U_{отс})^2$ (рис. 4,б).

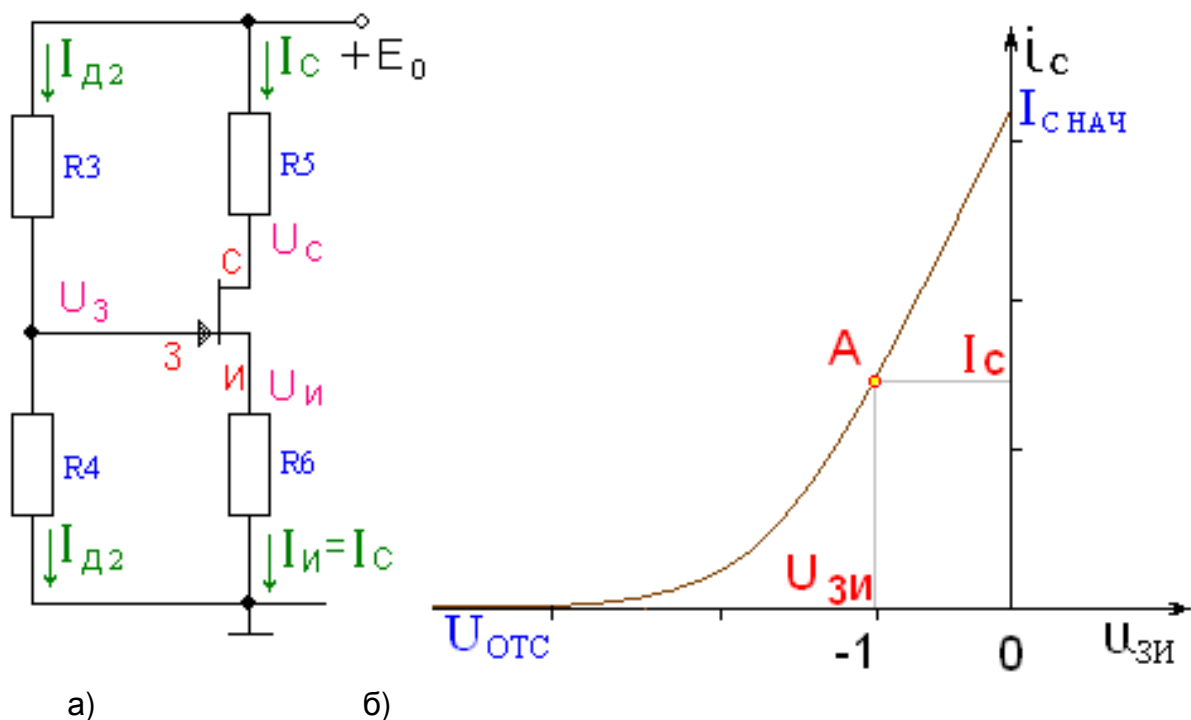


Рис. 4 Принципиальная схема по постоянному току каскада V2 а) и типовая вольт-амперная характеристика полевого транзистора с п-каналом б)

Для расчета резисторов R3, R4, R5 и R6 сначала необходимо рассчитать точку покоя полевого транзистора V2, исходя из его параметров: начального тока стока $I_{c \text{ нач}}$, максимальной крутизны S_{max} и напряжения отсечки $U_{\text{отс}}$.

Выбираем напряжение затвор-исток $U_{\text{зи}} = -1 \text{ В}$. Затем определяем ток покоя стока и крутизну для точки покоя:

$$I_c = I_{c \text{ нач}} \cdot (1 - U_{\text{зи}} / U_{\text{отс}})^2 ; \quad S = S_{\text{max}} \cdot (1 - U_{\text{зи}} / U_{\text{отс}}).$$

Как правило, выбирают напряжение на истоке $U_{\text{и}} = 0.2 E_0$, а напряжение сток-исток $U_{\text{си}} = E_0/2$. Тогда напряжение на стоке равно $U_c = U_{\text{и}} + U_{\text{си}}$. Отсюда сопротивления в цепи истока и стока $R_6 = U_{\text{и}}/I_c$, $R_5 = (E_0 - U_c)/I_c$. Напряжение на затворе U_3 равно $U_3 = U_{\text{и}} + U_{\text{зи}}$.

Рассчитаем сопротивление R4, исходя из заданной верхней частоты $f_{\text{в}\sqrt{2}}$. Так как частота верхнего среза входной цепи $f_{\text{вх}\sqrt{2}}$ должна быть больше $f_{\text{в}\sqrt{2}}$, а она определяется сопротивлением R4 и суммарной емкостью $C = C_{\text{д}} + C_{\text{вх}} + C_{\text{м}}$, где $C_{\text{д}}$ – проходная емкость диода, $C_{\text{вх}}$ – входная емкость транзистора V2, $C_{\text{вх}} = C_{\text{зи}} + (S \cdot R_5 + 1) \cdot C_{\text{зс}}$, $C_{\text{м}}$ – емкость монтажа, можно заключить, что необходимо взять $R_4 \leq 1/(2\pi f_{\text{в}\sqrt{2}} \cdot C)$.

Здесь получив численное значение сопротивления R4, выбираем такое номинальное значение R4 из ряда значений табл.5, которое с учётом отклонения в пределах точности (5...10) % должно не превышать (т.е. должно быть меньше) расчётного значения. После этого определяем ток

делителя, подставив выбранное номинальное значение R_4 в выражение $I_{д2}=U_3/R_4$ и сопротивление резистора в соответствие с правилом Кирхгофа для напряжений во входном контуре каскада: $R_3= (E_0 - U_3)/I_{д2}$.

Проверка расчета по постоянному току с помощью компьютера

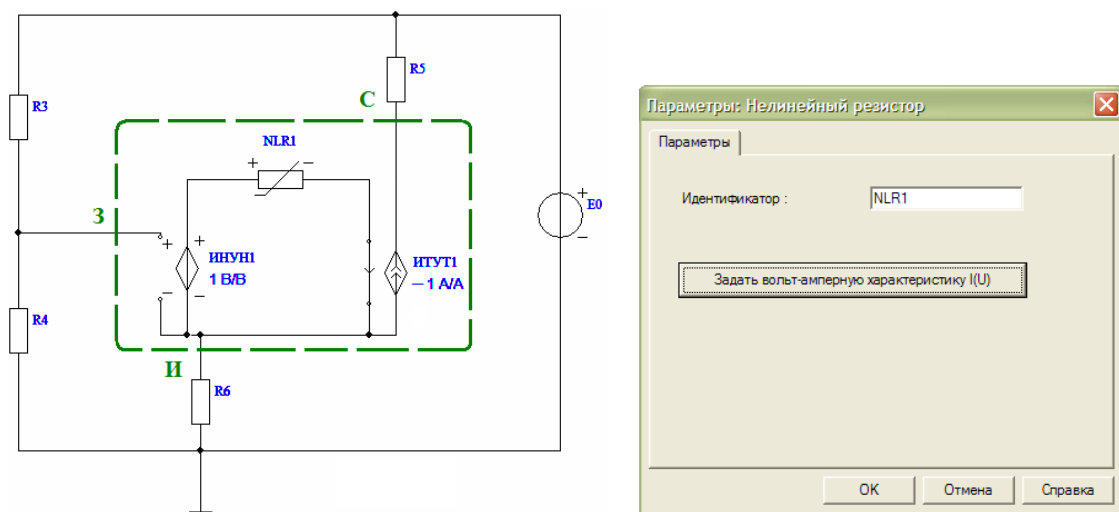
Правильность расчетов сопротивлений после их выбора по номинальному ряду удобно проверить с помощью компьютера [5, 6]. Составим эквивалентную схему каскада на полевом транзисторе (рис. 5, а) и с помощью программы Fastmean произведем расчет. Эта программа сама нумерует узлы и элементы схемы, в порядке соединения элементов в программе. При расчете используются сопротивления резисторов принципиальной схемы (из рис. 1), выбранные по номинальному ряду. Для этого принципиальную схему каскада на транзисторе V_2 (рис. 4, а) преобразуем в эквивалентную схему по постоянному току, заменяя полевой транзистор активными четырехполюсниками типа ИТУТ и ИНУН (рис. 5, а), где $NLR1$ – нелинейное сопротивление, с помощью которого задается сквозная вольт-амперная характеристика полевого транзистора конкретной модели – зависимость выходного тока I_c транзистора от управляющего входного напряжения $U_{зи}$. Чтобы её построить, необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по элементу и в открывшемся диалоговом меню выбрать пункт «Параметры», далее нажать на кнопку «Задать вольт-амперную характеристику» (рис. 5, б). В новом окне удалить имеющиеся точки, заданные программой по умолчанию, нажав на клавишу «удалить». В ячейках « u , В» и « i , А» ввести данные для начальной точки с координатами (0; $I_{c,нач}$) и нажать кнопку «Добавить». Последующие точки вплоть до значения $U_{зи} = U_{отс}$ вольт-амперной характеристики рассчитать с помощью уравнения

$$I_c = I_{c, нач} \cdot (1 - U_{зи} / U_{отс})^2 ,$$

изменяя значения $U_{зи}$ от 0 до значения $U_{зи} = U_{отс}$. График строится на основе 5 – 7 точек.

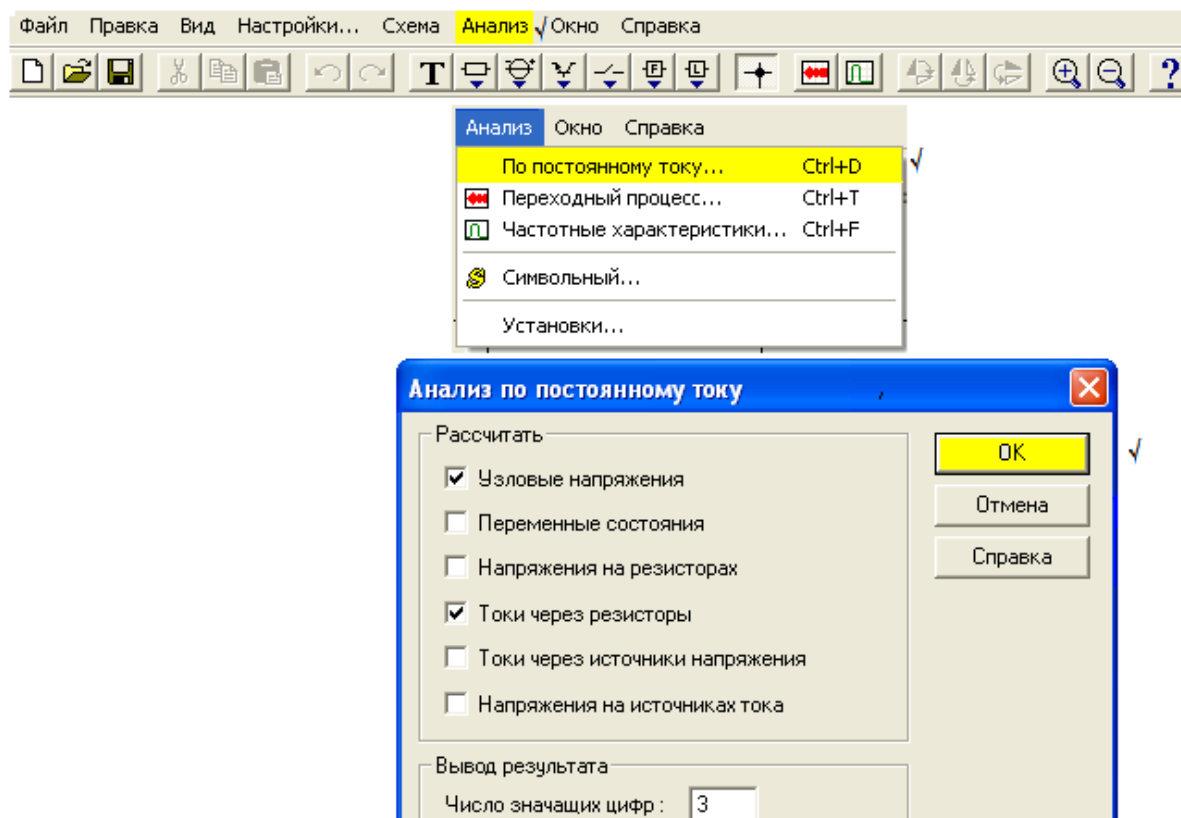
Вследствие несовпадения направления постоянного тока стока в реальном транзисторе и в компьютерной модели (рис. 5, а) коэффициенту передачи тока ИТУТ необходимо присвоить знак минус.

Схема (рис. 5, а) строится с номинальными сопротивлениями резисторов R_3 , R_4 , R_5 и R_6 , E_0 – напряжение питания в соответствии с вариантом, полевой транзистор представлен в виде эквивалентной модели по постоянному току, выделенной контуром зеленого цвета.



(а)

(б)



(в)

Рис. 5. (а) Эквивалентная схема усилительного каскада на V2 по постоянному току и (б) вид окна «Параметры: Нелинейный резистор», (в) последовательность действий при анализе работы схемы на постоянном токе

С помощью команды “Анализ по постоянному току” (рис. 5, в) в схеме рис. 5, а вычислим токи через резисторы и напряжения в узлах. В таблицу 6 вносим все результаты без учета знака.

Табл. 6. результаты компьютерного анализа по постоянному току

Токи и напряжения	$U_{зи}$	$U_{си}$	$I_{д2}$	$I_{и}$
Единицы измерения	В	В	мА	мА
Расчет предварительный				
Результат компьютерного анализа				

Сопоставив результаты компьютерного анализа и предварительных расчетов, следует сделать вывод, верны ли расчеты. Т.к. максимальный разброс от номинальных значений выбранных для схемы сопротивлений резисторов составлял 10 %, то расхождение результатов для каждой величины в пределах этого значения свидетельствуют о том, расчет всех элементов схемы по постоянному току сделан правильно.

3.1.3 Расчет по постоянному току каскадов на биполярных транзисторах V3, V4 (рис. 6)

Биполярные транзисторы, например, КТ382А имеют следующие параметры:

- транзистор биполярный кремниевый;
- $U_{БЭ} = (0.6 \dots 0.7) \text{ В}$;
- коэффициент усиления по току минимальный $h_{21 \min}$;
- коэффициент усиления по току максимальный $h_{21 \max}$;
- частота единичного усиления f_T (МГц);
- максимальный постоянный ток коллектора $I_{к, \max}$ (мА);
- максимальное напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ, \max}$ (В);
- постоянная времени цепи обратной связи τ_k (пс);
- ёмкость коллекторного перехода C_k (пФ);
- допустимая мощность рассеиваемая на коллекторе $P_{к, \text{доп}}$ (мВт).

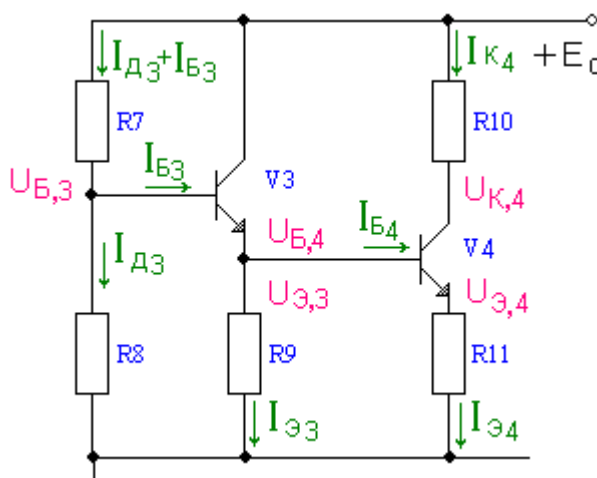


Рис. 6 Принципиальная схема каскадов на биполярных транзисторах по постоянному току

Для расчета сопротивлений резисторов R7, R8, R9, R10 и R11 необходимо выбрать режимы работы транзисторов V3 и V4.

Выбираем ток покоя транзистора V4 $I_{K4} \leq 6 \text{ мА}$. из следующих соображений. Биполярный транзистор как управляемый генератор тока ИТУТ, должен отдавать в нагрузку заданный ток. Если сопротивление внешней нагрузки R_{2H} было бы подключено непосредственно к выходу каскада на транзисторе V4, то величина отдаваемого в нагрузку тока $I_{2H} = U_{2H}/R_{2H}$ составляла бы единицы мА. Следовательно, постоянная составляющая тока I_{K4} должна превышать значение переменного тока I_{2H} , в противном случае весь сигнальный ток уйдет в нагрузку и транзистор войдет в режим отсечки коллекторного тока, что недопустимо. Поэтому в этом случае следует выбирать ток $I_{K4} = I_{2H} + (1...2) \text{ мА} \leq 6 \text{ мА}$. Такой выбор позволяет не перегружать источник питания излишней потребляемой мощностью для работы каскада, уменьшает рассеиваемую в окружающую среду тепловую энергию, обеспечивать более линейный режим работы схемы и ее надежность.

При использовании дополнительного каскада на ОУ транзистор V4 должен отдать ток, немного превышающий входной ток ОУ – в нашем случае десятки **пикоампер**. Это обусловлено тем, что на входе всех типов используемых ОУ стоит дифференциальный каскад на полевых транзисторах.

В режиме микротоков (I_K меньше 100мкА) параметры биполярного транзистора деградируют. Поэтому целесообразно выбирать ток $I_{K4} = (0.5...1.5) \text{ мА}$.

Каскад на транзисторе V3 должен отдать в нагрузку – базовую цепь транзистора V4, переменный ток I_{B4} , поэтому выбрать постоянный коллекторный ток V4 из соотношения: $I_{K3} \leq I_{K4} = (0.1...0.5) \text{ мА}$.

Более того выходное сопротивление источника сигнала для каскада на транзисторе V3 определяется резистором R5 в цепи стока полевого транзистора V2. Межкаскадные потери сигнала зависят от сопротивления источника (R5) и сопротивления нагрузки – входного сопротивления каскада на транзисторе V3 ($R7 \parallel R8 \parallel h_{11}$). Чем меньше коллекторный ток, тем меньше базовый ток и тем выше входное сопротивление каскада, что уменьшает межкаскадные потери.

Установив напряжение коллектор-эмиттер V4 $U_{KЭ,4} = E_0/2$ и напряжение на эмиттере V4 $U_{Э4} = 0.1 \cdot E_0$, можно определить напряжение $U_{B4} = U_{Э3} = U_{Э4} + U_{БЭ}$, где $U_{БЭ} = 0.6 \text{ В}$ – напряжение открывания электронно-дырочного перехода для маломощных кремниевых транзисторов, при

котором в его выходной цепи начинает протекать ток. Напряжение на базе V3 $U_{B3} = U_{Э3} + U_{БЭ}$. Напряжение на коллекторе V4 $U_{К4} = U_{Э4} + U_{КЭ4}$.

Теперь можно вычислить сопротивления резисторов R9, R10 и R11:

$$R9 = U_{Э3} / I_{Э3}, R10 = (E0 - U_{К4}) / I_{К4}, R11 = U_{Э4} / I_{Э4},$$

где $I_{Э3} = I_{К3} + I_{Б3}$, $I_{Э4} = I_{К4} + I_{Б4}$.

Для вычисления токов базы $I_{Б3}$ и $I_{Б4}$ и дальнейших расчетов коэффициенты передачи по току $h_{21,3}$ и $h_{21,4}$ определим с учетом их крайних значений $h_{21} = \sqrt{h_{21min} \cdot h_{21max}}$. Тогда $I_{Б3} = I_{К3} / h_{21}$, $I_{Б4} = I_{К4} / h_{21}$, а $I_{Э3} = I_{К3} \cdot (1 + 1/h_{21})$, $I_{Э4} = I_{К4} \cdot (1 + 1/h_{21})$. В ряде случаев при больших h_{21} принимают равными $I_{Э3} \approx I_{К3}$, $I_{Э4} \approx I_{К4}$.

Для вычисления сопротивлений R7 и R8 нужно знать ток базового делителя $I_{Д3}$.

Обычно его выбирают $I_{Д3} \geq 10 \cdot I_{Б3}$. Сопротивления резисторов $R7 = (E0 - U_{Б3}) / (I_{Д3} + I_{Б3})$, $R8 = U_{Б3} / I_{Д3}$.

3.1.4. Проверка расчета по постоянному току с помощью компьютера

Правильность расчетов сопротивлений после их выбора по номинальному ряду удобно проверить с помощью компьютерной программы FASTMEAN [5, 6]. Для этого принципиальную схему каскадов на транзисторах V3 и V4 (рис. 6) преобразуем в эквивалентную схему по постоянному току, заменяя биполярные транзисторы активными четырехполюсниками типа ИТУТ (рис. 7, б), где H_{11} – входное сопротивление биполярного транзистора на постоянном токе.

Вследствие несовпадения направления постоянного коллекторного тока в реальном транзисторе и в компьютерной модели (рис. 7, б) коэффициенту передачи тока h_{21} необходимо присвоить знак минус (например $h_{21} = -100$).

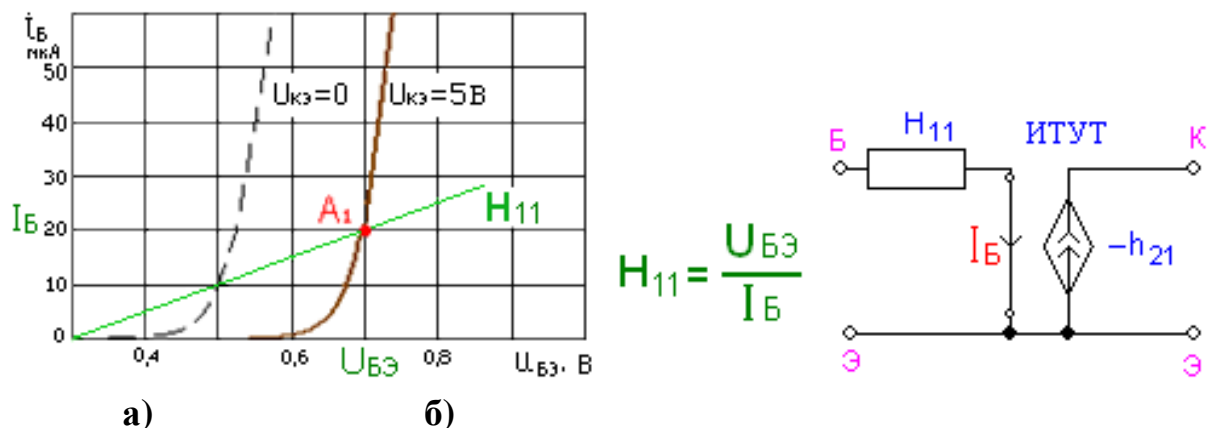


Рис.7. Определение входного сопротивления (а) и эквивалентная схема биполярного транзистора (б) по постоянному току

Составим эквивалентную схему усилителя на биполярных транзисторах (рис. 8) и с помощью программы Fastmean произведем расчет.

Эта программа сама нумерует узлы и элементы схемы, чаще всего в порядке их набора. При расчете используются сопротивления резисторов R7, R8, R9, R10 и R11, выбранные по номинальному ряду, как элементов принципиальной схемы (рис. 1). Сопротивления $H_{11,3}$ и $H_{11,4}$ в схеме на рис. 8 не являются внешними резисторами, они отражают эквиваленты входных сопротивлений переходов база-эмиттер транзисторов V3 и V4 по постоянному току (рис. 8). Их величины можно определить как

$$H_{11,3} = U_{БЭ} / I_{Б3}, H_{11,4} = U_{БЭ} / I_{Б4}, \text{ где } U_{БЭ} = 0.6 \dots 0.7 \text{ В.}$$

Их значения в схеме остаются расчетных значений.

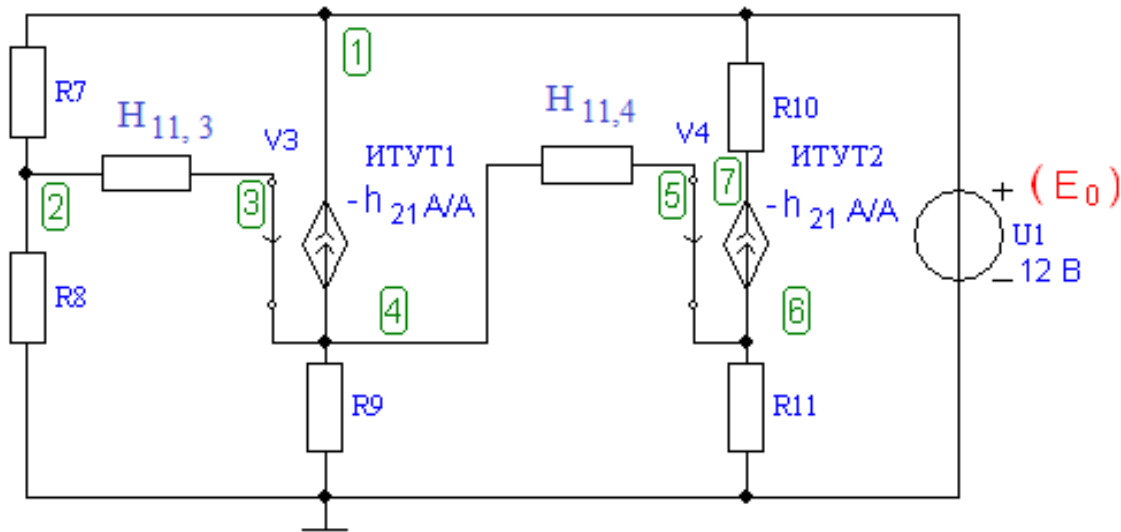


Рис. 8. Эквивалентная схема усилиельного каскада на V3,V4 по постоянному току

С помощью команды “Анализ по постоянному току“ в схеме рис. 8 вычислим токи в резисторах и напряжения в узлах. В таблицу 7 вносим все результаты без учета знака.

Табл. 7. результаты компьютерного анализа по постоянному току

	V3				V4		
Токи и напряжения	$U_{Б3}$	$U_{Э3}$	$I_{Д3}$	$I_{Э3}$	$U_{Э4}$	$U_{К4}$	$I_{К4}$
Единицы измерения	В	В	мА	мА	В	В	мА
Расчет предварительный							
Результат компьютерного анализа							

Если результаты совпадают с точностью $\leq 10\%$, то расчет всех элементов схемы по постоянному току сделан правильно.

3.1.5 Расчёт по постоянному току в схеме каскада на ОУ

Этот расчёт сводится к определению номинальных значений резисторов R12 и R13. С одной стороны они должны обеспечить “среднюю точку” напряжения питания $E_0/2$ на ОУ и потому $R12 = R13$, это обеспечивает прохождение обеих полуволн переменного сигнала при однополярном питании, когда сигнал может изменяться в пределах от потенциала общей шины до напряжения питания E_0 . С другой стороны параллельное соединение резисторов R12 и R13 на переменном токе не должно сильно шунтировать нагрузку транзистора V4. Вследствие этого рекомендуется выбирать $R12 = R13 \geq (10...20) \cdot R10$.

На этом расчет по постоянному току закончен. Все рассчитанные сопротивления необходимо выбрать ближайшими по номинальному ряду, соответствующему заданному технологическому допуску.

Обычно для резисторов в цепи эмиттера и истока принимают допуск $\pm 5\%$ как цепей термостабилизации каскадов, а для остальных $\pm 10\%$.

4. Расчет по сигналу

Этот расчет также проведем при помощи программы Fastmean. Чтобы определить свойства усилителя по сигналу, необходимо составить эквивалентную схему усилителя для переменного тока.

Учитывая, что сопротивление источника питания E_0 переменному току равно нулю, на эквивалентной схеме его выводы можно замкнуть накоротко, а сам источник удалить. После этой операции верхние выводы резисторов R2, R3, R5, R7, R10 (рис. 1) оказываются на переменном токе соединенными с общим проводом. Коллектор транзистора V3 также соединяется с общим проводом. Далее нужно элементы схемы V1, V2, V3, V4 и AD1 заменить их эквивалентными моделями на переменном токе.

Источником сигнала является фототок I_{m1} диода V1 при попадании на него оптического излучения. Сопротивление фотодиода на переменном токе определяется касательной к вольт-амперной характеристике в точке A. Вследствие того, что приращение напряжения измеряется в вольтах, а приращение тока в долях микроампера, сопротивление фотодиода переменному току $r_D = \Delta u / \Delta i$ оказывается значительно больше, чем сопротивление постоянному току R_D , и r_D достигает значений 80...100 МОм. Это дает право рассматривать источник сигнала как генератор тока. Чрезвычайно большое сопротивление r_D учитывать в эквивалентной схеме необходимости нет, остается учесть лишь ёмкость фотодиода C_D (рис. 9, а). На рис. 9, б изображена эквивалентная схема фотодиода по переменному току с учетом его цепей питания.

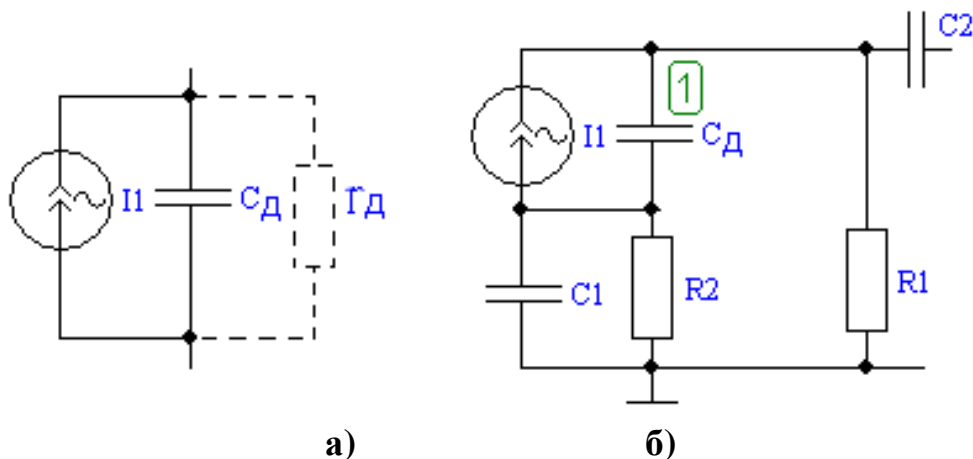


Рис. 9. Модель фотодиода на переменном токе (а) и (б) эквивалентная схема входной цепи

На эквивалентной схеме полевой транзистор заменяем активным четырехполюсником типа ИТУН – источник тока, управляемый напряжением (рис. 10, а). Это значит, что выходной ток (ток стока i_C) управляется входным напряжением (затвор-исток $u_{зи}$), т.е. $i_C = -S u_{зи}$. В данной модели $C_{зи}$ – емкость затвор-исток транзистора, пФ, $C_{зс}$ – проходная емкость, емкость перехода затвор-сток, пФ. Величина этих ёмкостей даётся в справочниках по транзисторам. S – крутизна в точке покоя, мА/В. Сопротивление перехода затвор-исток $r_{зи}$ очень велико (раздел 3.1.2).

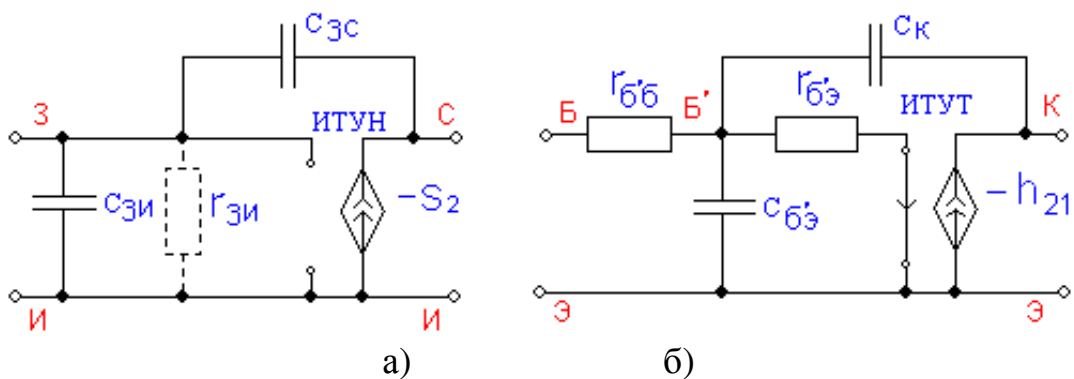


Рис. 10. Эквивалентная модель (а) полевого транзистора V2 (ИТУН) и (б) биполярного транзистора V3 и V4 (ИТУТ) по сигналу

Биполярные транзисторы V3 и V4 заменяем каждый активным четырехполюсником типа ИТУТ – источник тока, управляемый током (рис. 10, б). Здесь выходной ток i_K управляется током базы $i_б$, т.е. $i_K = -h_{21} \cdot i_б$.

В этой модели $r_{бб}$ – объёмное сопротивление базового слоя, Ом. Находим его из выражения $r_{бб} = \tau_K / C_K$. C_K – ёмкость коллекторного перехода, пФ, приводится в справочниках. $r_{бэ}$ – сопротивление перехода

база-эмиттер, Ом. Оно вычисляется $r_{б'э} = (1 + h_{21}) \frac{25(\text{мВ})}{I_K(\text{мА})}$, где h_{21} – коэффициент усиления по току транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). $C_{б'э}$ – емкость перехода база-эмиттер, пФ. Она вычисляется по выражению

$$C_{б'э} = \frac{h_{21}}{2\pi f_T r_{б'э}},$$

где f_T – частота единичного усиления из справочника.

Расчитаем параметры эквивалентной модели операционного усилителя. При анализе частотных характеристик и переходных процессов, протекающих в ОУ, используются линейные динамические макромодели.

Электрические макромодели ОУ строятся в виде эквивалентных схем. Достоинства электрических макромоделей состоят в том, что язык эквивалентных схем достаточно понятен, обладает хорошей наглядностью, с его помощью можно рационально учитывать протекающие физические процессы в ОУ. Для упрощения макромодели полная эквивалентная схема ОУ разбивается на каскады. Кроме того, в эквивалентной схеме оставляют только те элементы, которые определяют свойства моделируемого каскада. При построении макромодели ОУ часто используют принцип подобия, который заключается в замене компонента или фрагмента схемы совокупностью идеальных элементов, моделирующих основную характеристику. В результате получается макромодель, которая состоит из сравнительно небольшого числа элементов, имеющих характеристики, близкие к характеристикам моделируемого объекта. В процессе построения макромодели бывает удобно влияние нескольких факторов на характеристику заменить влиянием одного суммарного воздействия. Модель, удобная для моделирования проектируемой схемы, изображена на рис. 11. Она содержит два операционных усилителя ОУ1 и ОУ2. Первый обеспечивает дифференциальный вход устройства с бесконечно большим входным сопротивлением, второй – нулевое выходное сопротивление и служит буфером между моделью ОУ и внешними цепями (в первую очередь цепями ОС). Частотные свойства исследуемого ОУ учитываются двумя ИТУН с соответствующими RC-элементами. Следует отметить, что использование ИТУН дает более простую модель, чем использование ИТУТ, отображающего реально действующие в ОУ биполярные транзисторы. Здесь можно выделить четыре узла. Первый узел (ОУ1) задает собственный коэффициент усиления моделируемого ОУ. Чтобы его рассчитать, необходимо из таб. 4 взять значение, выраженное в децибелах, и перевести его в условные единицы, воспользовавшись выражением:

$$\mu = 10^{(K [\text{дБ}] / 20)},$$

где K [дБ] – собственный коэффициент усиления ОУ, выраженный в децибелах и приведенный в табл. 4.

Второй узел (ИТУН 2) отражает полюс функции передачи, создаваемый дифференциальным каскадом. Крутизна $S_2 = -1 \text{ мСм}$ и $R_{20} = 1 \text{ кОм}$ дают коэффициент усиления этого узла $K_2 = S_2 \cdot R_{20} = -1$, частоту полюса определяет постоянная времени $\tau_1 = R_{20} \cdot C_{16}$, из условия $f_{p1} = 1/2\pi\tau_1$. Полагая, что в этом узле формируется первый полюс АЧХ с частотной коррекцией, частоту первого полюса определим как $f_{p1} = f_1 / \mu$, где f_1 – частота единичного усиления ОУ, которая является справочной величиной для конкретной модели ОУ. Её значение приведено в табл. 4. Получим $C_{16} = 1/(2\pi R_{20} \cdot f_{p1})$ из условия $f_{p1} = (2\pi \cdot \tau_1)^{-1}$.

Узел третий (ИТУН 3) выполняет аналогичную функцию. В этом узле формируется полюс f_{p2} , так же при коэффициенте усиления $K_2 = S_3 \cdot R_{21} = -1$. Для частоты второго полюса примем $f_{p2} = f_1$, тогда получим емкость $C_{17} = 1/(2\pi R_{21} \cdot f_{p2})$. Знак минус перед крутизной в обоих случаях отражает поворот фазы во входном каскаде схемы ОУ и каскаде усиления напряжения (ОЭ) в структуре ОУ.

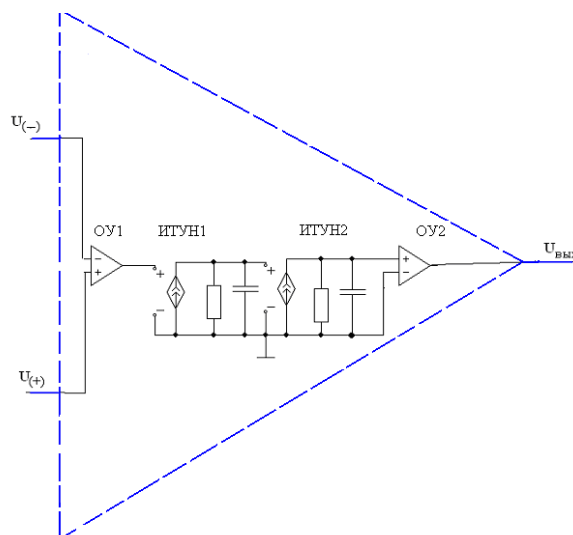


Рис. 11 Макромодель ОУ с двухполюсной частотной коррекцией

Четвертый узел (ОУ2) моделирует оконечный каскад, построенный по схеме с общим коллектором, он характеризуется коэффициентом усиления равным 1 и не поворачивает фазу сигнала, поэтому заземлен инвертирующий вход.

Влияние оконечного каскада на АЧХ ОУ в этой макромодели не показано, так как он обладает значительно более широкой полосой пропускания по сравнению с другими каскадами.

Соединив модели активных элементов согласно принципиальной схеме (рис. 1), получим эквивалентную схему усилителя по сигналу для всех диапазонов частот (рис. 12). Номера внешних резисторов $R1 - R15$ и конденсаторов $C1 - C8$ этой схеме соответствуют номерам резисторов и конденсаторов принципиальной схемы (рис. 1). На начальном этапе

моделирования схемы предпочтительнее установить значения ёмкостей разделительных конденсаторов C2, C4, C6, C8 и конденсаторов C1 и C7 величиной 1 мкФ, ёмкости блокировочных конденсаторов C3 и C5, равными 2.4 мкФ (по номинальному ряду), чтобы в случае необходимости была возможность изменения этих значений, чтобы спроектированная в ходе выполнения курсового проекта схема соответствовала техническому заданию варианта.

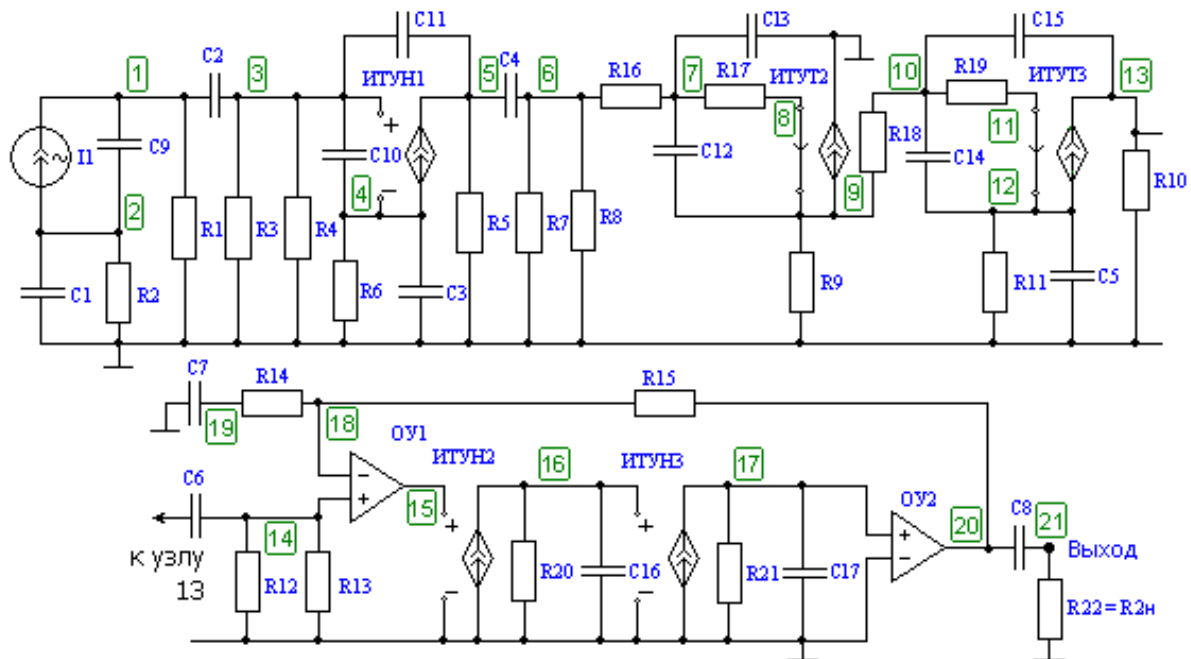


Рис.12. Полная эквивалентная схема усилителя

К этому моменту остаются неизвестными значения резисторов R14 и R15, поскольку неопределён коэффициент усиления каскада на ОУ $K_F = U_{21} / U_{13}$. Напряжение $U_{21} = U_{2Н}$, заданно в табл.3 задания. Напряжение U_{13} следует определить, активировав клавишу “переходный процесс” в диалоговом окне «Анализ» программы *FASTMEAN*, установив предварительно в источнике сигнала ток $I_{m1} = 1$ мкА и среднюю частоту заданного диапазона, например, $f = 100$ кГц. Следует помнить, что в этом случае компьютер покажет амплитуду сигнала U_{13m} .

Тогда искомый коэффициент усиления будет $K_F = 1.414 \cdot U_{2Н} / U_{13m}$. Для реализации этого усиления воспользуемся зависимостью коэффициента усиления в неинвертирующем включении ОУ $K_F = 1 + R15/R14$.

Рекомендуется предварительно выбирать $R15 = (R12 \parallel R13)$, и затем вычислить R14.

Теперь можно определить частотные свойства всего усилителя с помощью программы *Fastmean*. Придав элементам схемы рис.12

соответствующие курсовому проекту значения можно определить зависимость сопротивления передачи от частоты $R(f) = U_{\text{ВЫХ}} / I_1$. Для этого в диалоговом окне набираем $U(21)/I(1)$. При этом необходимо учитывать, что нумерация узлов в схеме может отличаться от принятой на рис. 12.

В связи с тем, что исследуемая функция не безразмерная, представлять её в децибелах, как коэффициент усиления, нельзя. Поэтому в меню «Частотные характеристики» в выражении по оси Y символ db, если он был выставлен изначально. Шкала по оси X должна быть логарифмической, поэтому в меню «Частотные характеристики» в пункте «Развертка по частоте» выбрать пункт из раскрывающегося списка «Логарифмическая».

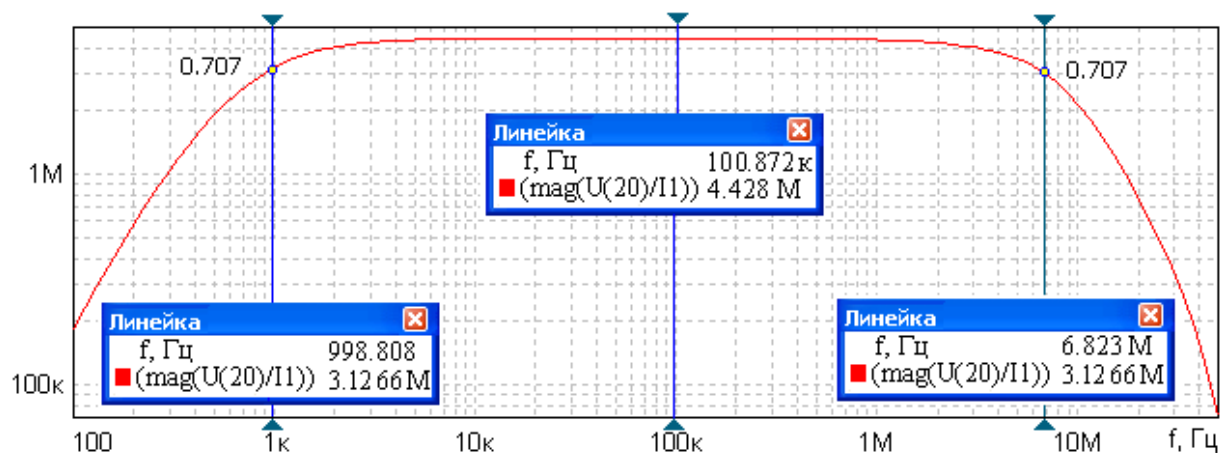


Рис. 13. Вид функции сопротивления передачи

Примерный вид функции сопротивления передачи показан на рис. 13. Вызвав линейку на экран, наводим ее поочередно в точки пересечения линейки с графиком в области нижних и высоких частот на уровне, при котором по определению коэффициент передачи становится равен $(0.7 \cdot R_0)$, где R_0 – сопротивление передачи на средней частоте. Таким образом, вычисляем частоты верхнего $f_{\text{в}\sqrt{2}}$ и нижнего среза $f_{\text{н}\sqrt{2}}$. Если определенное на графике значение частоты нижнего среза находится левее значения частоты, требуемого по техническому заданию, т.е. $f_{\text{н}\sqrt{2}} \leq f_{\text{н}\sqrt{2}\text{т.з.}}$, и значение частоты верхнего среза находится правее значения, требуемого по техническому заданию, т.е. $f_{\text{в}\sqrt{2}} \geq f_{\text{в}\sqrt{2}\text{т.з.}}$, то спроектированный усилитель будет удовлетворять требованиям технического задания. Здесь индекс т.з. обозначает “техническое задание”.

Если расчет показал, что $f_{\text{н}\sqrt{2}} > f_{\text{н}\sqrt{2}\text{т.з.}}$, то необходимо увеличить емкости блокировочных (прежде всего конденсатора С3, затем С5, если не удалось выполнить условие) и разделительных конденсаторов. Если $f_{\text{в}\sqrt{2}} < f_{\text{в}\sqrt{2}\text{т.з.}}$, необходимо уменьшить коэффициент усиления схемы спроектированного усилителя. Для этого настроить схему можно одним или несколькими шагами:

○ Наиболее простой путь – уменьшить усиление транзистора V2 путем уменьшения входного напряжения $U_{зи}$, которое, как и $f_{в\sqrt{2}}$, определяется сопротивлением резистора R4. Т.к. номинальное сопротивление выбирается из условия неравенства $R4 \leq 1/(2\pi f_{в\sqrt{2}} \cdot C)$, значит, возможно выбрать несколько меньшее номинальное значение, чем было выбрано изначально. Однако в этом случае отношение сигнал/шум уменьшится, т.к. входной сигнал мы уменьшили, а тепловой шум остался прежним.

○ Лучше уменьшить усиление транзистора V4 введением отрицательной обратной связи. Более эффективным является применение высокочастотной эмиттерной коррекции в случае, если не удастся выполнить условие по значению полосы пропускания в области высоких частот.

Чтобы провести такую высокочастотную эмиттерную коррекцию в схеме необходимо ввести в эмиттер транзистора V4 резистор R'11 по сигналу в цепи обратной связи, который выбирается как $R'11 \ll R''11$ ($\sim 0.1 \cdot R11$). Он определяет глубину ООС F на средних частотах, и, следовательно, коэффициент усиления с обратной связью. Резистор R''11 зашунтирован конденсатором C5 и на характеристики усилителя в области верхних частот влияния не оказывает. При таком методе изменения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) режим работы транзистора V4 на постоянном токе не должен изменяться. Общее сопротивление в эмиттерной цепи необходимо сохранять прежним, равным $R11 = R'11 + R''11$. Принципиальная схема каскада V4 примет вид рис. 14, а. На рис. 14, б красным цветом изображена АЧХ каскада усиления на транзисторе V4 (рис. 1) с верхней граничной частотой $f_{в\sqrt{2}}$ по уровню $0.707 \cdot R0$. Синим цветом изображена АЧХ каскада усиления по рис. 14, а, в котором ООС создается резистором R'11. Верхняя граничная частота в схеме с ООС $f_{в\sqrt{2}F} > f_{в\sqrt{2}}$. Дальнейшее увеличение $f_{в\sqrt{2}F}$ за счет увеличения глубины ООС приведет снова к уменьшению коэффициента усиления. Избежать этого можно применив в схеме рис. 14, а эмиттерную высокочастотную коррекцию. Она заключается в том, что параллельно резистору R'11 подключается конденсатор небольшой емкости $C_{кор}$, который шунтирует этот резистор на высоких частотах и тем самым устраняет ОС. Для исследуемой схемы $C_{кор}$ подбирается из диапазона от 1 пФ до 100 пФ. Влияние корректирующей ёмкости на АЧХ иллюстрирует рис. 14, б, где $f_{в\sqrt{2}C_{кор2}} > f_{в\sqrt{2}C_{кор1}}$, при этом $C_{кор2} > C_{кор1}$. Повторив расчет модуля при различных значениях R'11, необходимо добиться выполнения условия $f_{в\sqrt{2}} \geq f_{в\sqrt{2}T.3}$.

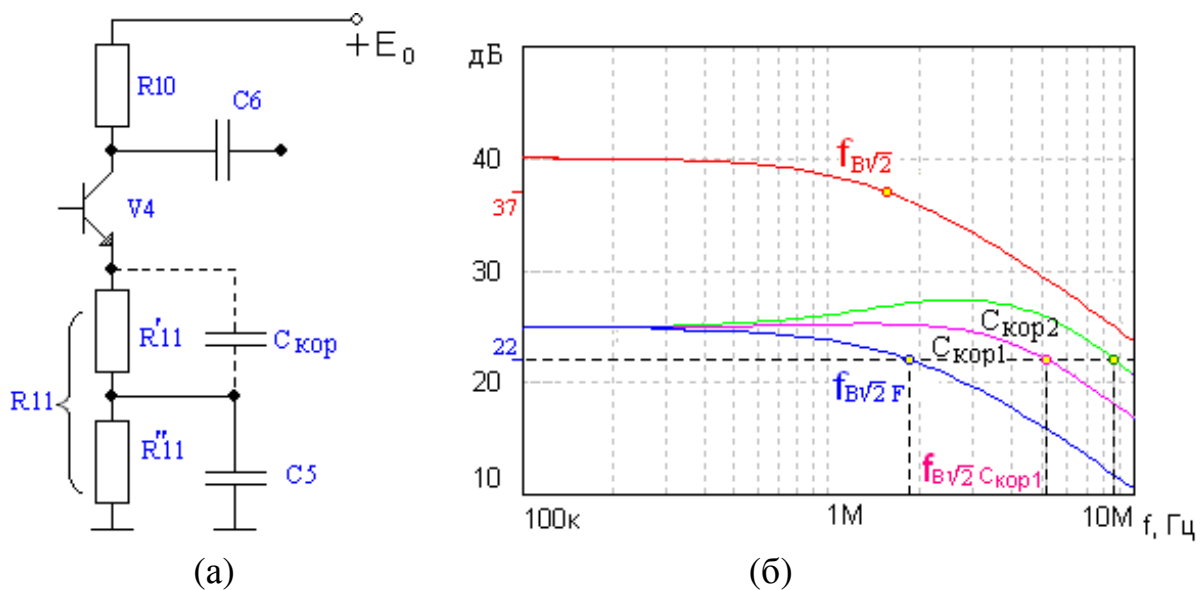


Рис. 14. Высокочастотная эмиттерная коррекция

После проведения коррекции и определения полосы пропускания спроектированного усилителя, определим величину выходного напряжения на средней частоте и сопоставим с значением технического задания величиной напряжения, которое необходимо передать в цепь нагрузки. Здесь можно определить напряжение по формуле:

$$U_{m_{\text{ВЫХ}0}} = I_{m1} \cdot R_0 \approx U_{2H} \pm 10 \%,$$

где R_0 – сопротивление передачи $R(f)$ на средней частоте (определяется по АЧХ); U_{2H} – выходное напряжение в соответствии с заданием варианта (см. табл. 3). Амплитуда тока $I_{m1} = I_1 - I_{\text{ТЕМН}} = 1 \text{ мкА} - 0.1 \text{ мкА} = 0.9 \text{ мкА}$.

Или определив действующее значение выходного сигнала с помощью построения переходного процесса для напряжения в узле 20 $U(20)$ в соответствии с нумерацией узлов, принятой в схеме на рис. 12.

Допустимое расхождение значений находится в пределах отклонения от номинальных значений элементов принципиальной схемы и составляет менее 10 %.

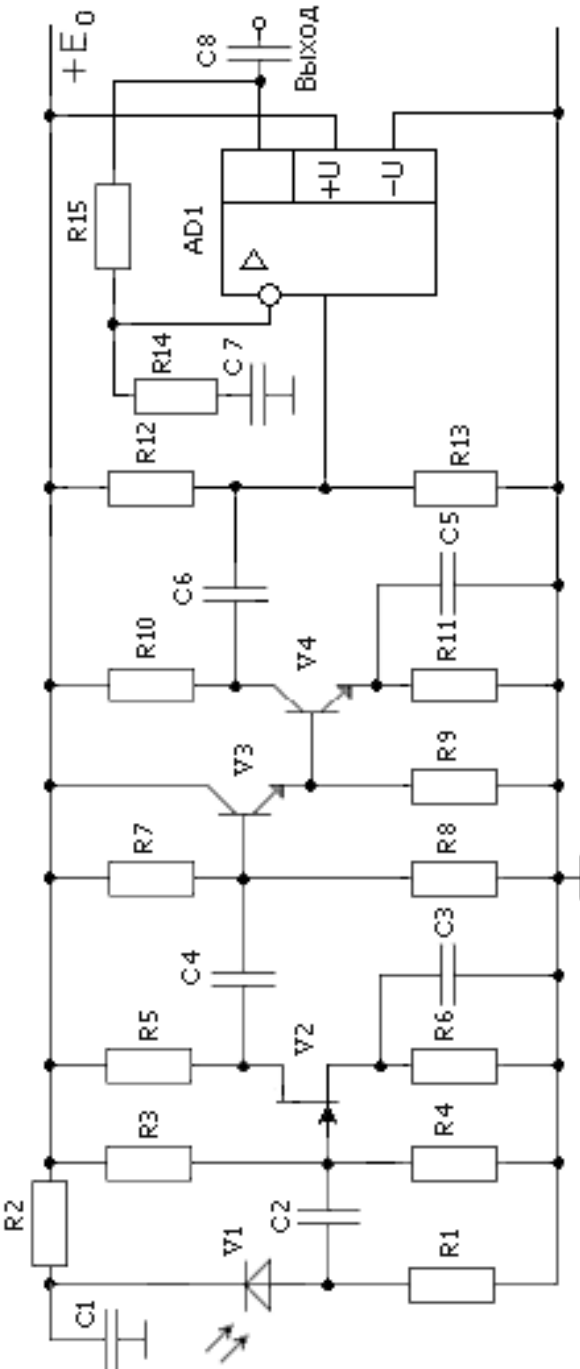
Далее вычерчивается принципиальная схема и составляется перечень элементов, примеры которых представлены в приложении пособия.

Приложение 1. Чертёж принципиальной схемы

Подп. и дата		Взам. инв.		Подп. и дата			
Инв. №		Инв. №		Инв. №			
Подп. и дата		Инв. №		Инв. №			
Лист		№ докум.		Подп.			
Разраб.		Дат		00.000 ПЭЗ			
Пров.							
Т. контр.							
Н. контр.							
Утв.							
Схема электрическая принципиальная		Лист		Лист			
		1		2			

Подп. и дата		Взам. инв.		Подп. и дата			
Инв. №		Инв. №		Инв. №			
Подп. и дата		Инв. №		Инв. №			
Лист		№ докум.		Подп.			
Разраб.		Дат		00.000 ПЭЗ			
Пров.							
Т. контр.							
Н. контр.							
Утв.							
Схема электрическая принципиальная		Лист		Лист			
		1		2			

Подп. и дата		Взам. инв.		Подп. и дата			
Инв. №		Инв. №		Инв. №			
Подп. и дата		Инв. №		Инв. №			
Лист		№ докум.		Подп.			
Разраб.		Дат		00.000 ПЭЗ			
Пров.							
Т. контр.							
Н. контр.							
Утв.							
Схема электрическая принципиальная		Лист		Лист			
		1		2			



Приложение 2. Спецификация – перечень элементов принципиальной схемы

Име. № подл.	Подп. и дата	Име. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
					C1, C2, C4, C6	Конденсатор 1 мкФ	4	
					C3	Конденсатор 1 мкФ	1	
					C5	Конденсатор 4,7 мкФ	1	
					R1	Резистор 1 МОм ±20%	1	
					R2	Резистор 3 МОм ±20%	1	
					R3	Резистор 43 кОм ±10%	1	
					R4	Резистор 5,6 кОм ±10%	1	
					R5	Резистор 510 Ом ±10%	1	
					R6	Резистор 330 Ом ±5%	1	
					R7	Резистор 20 кОм ±10%	1	
					R8	Резистор 6,2 кОм ±10%	1	
					R9	Резистор 390 Ом ±5%	1	
					R10	Резистор 820 Ом ±10%	1	
					R11	Резистор 200 Ом ±5%	1	
					V1	Диод ФДК-227	1	
					V2	Транзистор КП307Г	1	
					V3, V4	Транзистор КТ382А	2	
					AD1	Операционный усилитель μ741В	1	
Име. № подл.	Подп. и дата	Име. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата				
Перечень элементов								Лис
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат				2

Перечень используемых источников:

1. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. –2-е изд., исправ. – М.: Горячая линия – Телеком 2001.
2. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: учеб. пособие для студ. высш.учеб.заведений.– М.: Издательский центр “Академия“, 2008 .
3. Усилительные устройства: Учебное пособие для вузов/ В.А. Андреев и др.; под ред. О.В. Головина – М.: Радио и связь, 1993.
4. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства: Учебник для вузов. – 2е изд. – перераб. и доп. – М.: Радио и связь. 1983.
5. Электронный ресурс: www.fastmean.ru. Официальный сайт программы FASTMEAN
6. Алексеев А.Г., Климова П.В. Методические указания к курсовому проектированию предварительных каскадов RC-усилителей систем передачи информации. 2010.