

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

Кафедра электроники и схемотехники
Дисциплина «Схемотехника»

Курсовой проект на тему:
«Проектирование усилителя-фотоприемника ВОСПИ»

Выполнил: Левоев.И.В

Группа: ИКТЗ-54

Преподаватель: Юрова В. А.

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

1. Задание на проектирование	2
2. Описание схемы усилителя.....	4
3. Расчет основных параметров усилителя и элементов принципиальной схемы	6
3.1. Расчет элементов схемы по постоянному току	6
3.1.1. Предварительный расчет резисторов диода V1	7
3.1.2. Предварительный расчет по постоянному току каскада на полевом транзисторе V2	9
3.1.3. Расчет по постоянному току каскадов на биполярных транзисторах V3, V4 10	
3.1.4. Расчет по постоянному току в схеме на ОУ	11
3.1.5. Проверка расчета по постоянному току с помощью компьютера	12
4. Расчет по сигналу.....	17
5. Сравнение полученных результатов с требованиями технического задания 23	
6. Чертеж принципиальной схемы	25
7. Список используемой литературы	27

1. Задание на проектирование

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.

Задание на курсовой проект представляет собой технические условия, по которым надлежит спроектировать устройство, работающее в режиме *малого сигнала*. В задании 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 .

Последние три цифры зачетной книжки студента определяют технические требования к курсовому проекту. (045)

Первая цифра из них определяет классификационный индекс полевого транзистора КП 307 и его параметры, приведенные в табл. 1.

Табл. 1

№	Тип транзистора	Начальный ток стока $I_{\text{снач}}$, мА	Крутизна макс. S_{max} , мА/В	Напряжение отсечки $U_{\text{отс}}$, В
0	КП 307А	6	9	-1.5

Входная ёмкость $C_{\text{зи}}=5$ пФ, $C_{\text{зс}}=1,5$ пФ

Вторая цифра из трех последних определяет типы биполярных транзисторов.

Табл. 2

№	Тип Транзистора	$P_{\text{к}}$, мВт	$U_{\text{кэmax}}$, В	$I_{\text{к max}}$, мА	$h_{21\text{max}}$	$h_{21\text{min}}$	$f_{\text{т}}$, МГц	$C_{\text{к}}$, пФ	$\tau_{\text{к}}$, пс
4	КТ355А	225	15	30	300	80	1500	2	60

Третья цифра из трех последних определяет величину напряжения источника питания E_0 (рис. 1), величину действующего значения выходного напряжения $U_{2\text{н}}$ и полосу пропускания $f_{\text{Н}\sqrt{2}}$ и $f_{\text{В}\sqrt{2}}$.

Табл. 3

№	Источник питания E_0 , В	Выходное напряжение $U_{2\text{н}}$, В	Нижняя частота $f_{\text{Н}\sqrt{2}}$, кГц	Верхняя частота $f_{\text{В}\sqrt{2}}$, МГц
5	10	2,2	30	2

Тип микросхемы AD1 операционного усилителя (ОУ) определяется четным или нечетным значением третьей цифры из трех последних в зачетной книжке.

Табл. 4

Третья цифра в зачетной книжке	Тип ОУ	Частота единичного усиления f_1 , МГц	Коэффициент усиления ОУ, дБ
5- нечетная	ОРА655	400	55

Конденсаторы C_1 – C_8 выбираются равными 1...5 мкФ.

Ток источника сигнала $I_{m1} = 1$ мкА. Сопротивление внешней нагрузки $R_{2H} = 3$ кОм.

2. Описание схемы усилителя

Принципиальная схема усилителя представлена на рис. 1. Усилитель состоит из предварительных каскадов и основного усилителя.

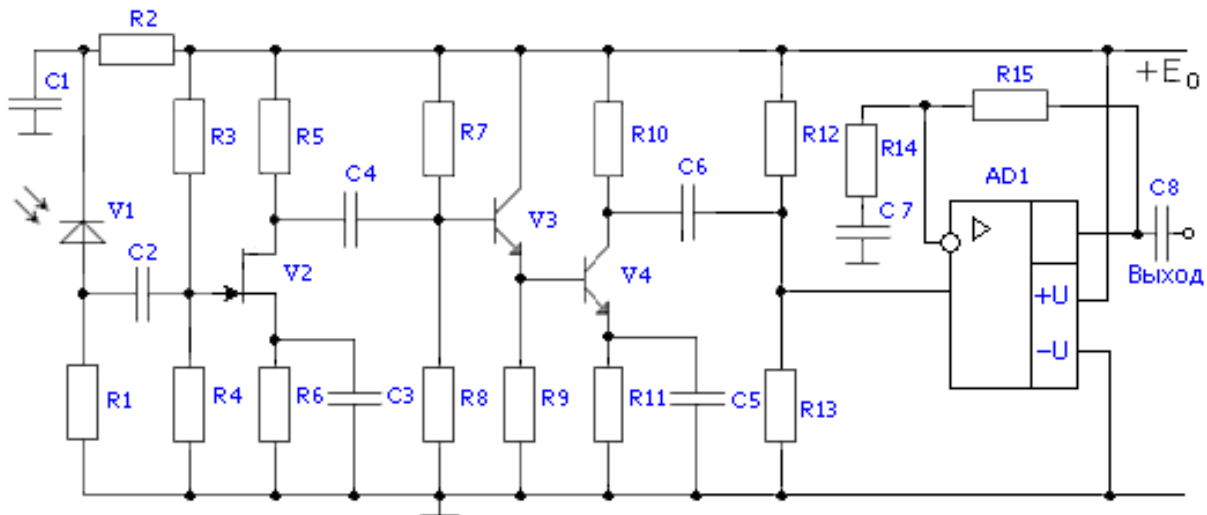


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя

Источником сигнала является ток фотодиода V1. Даже когда свет падает на фотодиод V1, его внутреннее сопротивление при фототоке $I_{m1} = 1$ мкА остается большим. Вследствие этого источник сигнала является генератором тока. Элементы C_1 , R_2 образуют развязывающий фильтр по цепям питания (E_0).

В качестве активного элемента первого каскада выбран полевой транзистор, так как он обладает меньшим уровнем собственных шумов. 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 $r_{зи}$ (входное сопротивление полевого транзистора V2) велико (1000 Мом), входное сопротивление каскада определяется делителем напряжения на его затворе (параллельным соединением резисторов R_3 и R_4). Данная входная цепь и будет определять частоту верхнего среза $f_{ВХ\sqrt{2}}$.

Биполярный транзистор V3, включенный по схеме с общим коллектором (ОК), служит буферным каскадом с большим входным и малым выходным сопротивлениями. Эта схема относится к классу схем с автоматическим смещением.

Транзистор V4 включен по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Его нагрузкой является делитель напряжения на резисторах R_{12} и R_{13} , обеспечивающий потенциал средней точки однополярного напряжения питания E_0 .

операционного усилителя AD1. По этой причине должно быть: $R_{12} = R_{13}$. Чтобы коэффициент усиления каскада на V4 не снижался из-за шунтирования его нагрузки R_{10} резисторами R_{12} и R_{13} , их следует выбирать равными $5 R_{10}$.

Для расширения полосы пропускания в области верхних частот в каскаде ОЭ может быть применена отрицательная обратная связь (ОС) и основанная на ней эмиттерная коррекция (R_{11} , C_5). В области нижних частот АЧХ определяется разделительными конденсаторами C_2 , C_4 , C_6 , C_7 , C_8 и блокировочными конденсаторами C_3 и C_5 , устраняющими местную обратную связь по сигналу.

Основное усиление сигнала по напряжению выполняет ОУ AD1. Операционный усилитель должен довести выходное напряжение на средней частоте до заданного (действующего значения) U_2 (табл.3). Сигнал подаётся на неинвертирующий вход. На этот же вход подаётся напряжение смещения с делителя R_{12} , R_{13} . Оно необходимо для получения симметричного питания ОУ в схеме с однополярным источником E_0 .

3. Расчет основных параметров усилителя и элементов принципиальной схемы

3.1 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, где показаны только те элементы схемы, по которым протекают постоянные токи.

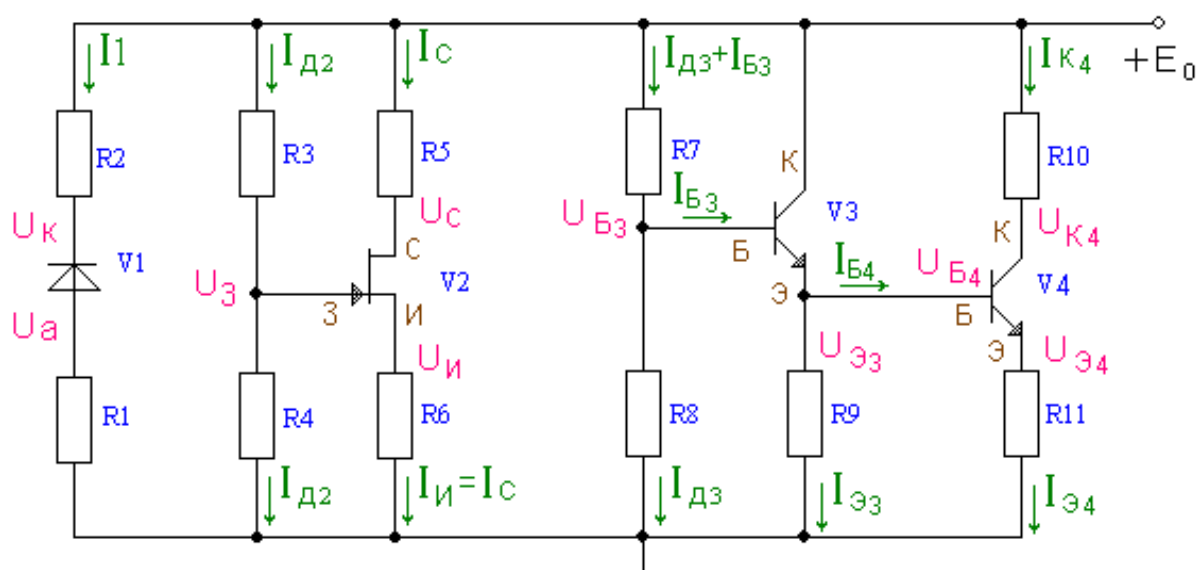


Рис. 2. Схема транзисторной части усилителя по постоянному току

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

3.1.1 Предварительный расчет резисторов диода V1

Параметры фотодиода V1-ФДК-227: рабочее напряжение $U_{\text{раб}} = 10 \text{ В}$, темновой ток $I_{\text{тем}} = 0,1 \text{ мкА}$, амплитуда фототока $I_{m1} = 1 \text{ мкА}$.

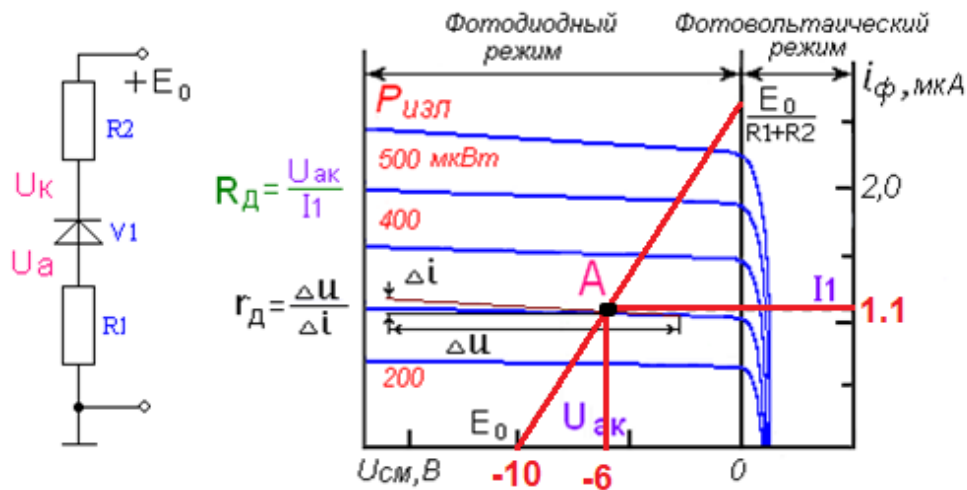


Рис.2. Принципиальная схема цепей питания фотодиода (слева) и его типовая вольт-амперная характеристика (справа).

Обратное смещение на фотодиод подается для вывода его в линейную область ВАХ. Одновременно с этим увеличение напряжения $U_{\text{ак}}$ уменьшает проходную емкость фотодиода.

Выберем напряжение $U_{\text{ак}}$, так, чтобы $|U_{\text{ак}}| < E_0$ и $|U_{\text{ак}}| < U_{\text{раб}}$. $U_{\text{ак}} = 6 \text{ В}$. Тогда на резисторах $(R_1 + R_2)$ должно быть падение напряжения равное $E_0 - U_{\text{ак}} = 10 - 6 = 4 \text{ В}$. Задав напряжение на аноде $U_a = 0.1 * E_0 = 0.1 * 10 = 1 \text{ В}$, определяем по закону Кирхгофа напряжение на катоде $U_k = U_a + U_{\text{ак}} = 1 + 6 = 7 \text{ В}$. Теперь, зная фототок I_1 , вычислим сопротивление резисторов R_1 и R_2 :

$$R_1 = \frac{U_a}{I_{m1}} = \frac{1}{1 * 10^{-6}} = 1 \text{ МОм} \text{ и } R_2 = \frac{E_0 - U_k}{I_{m1}} = \frac{10 - 7}{1 * 10^{-6}} = 3 \text{ МОм}.$$

Рассчитанные сопротивления резисторов R_1 и R_2 необходимо выбрать в соответствии с рядом номинальных значений (Рис.3.)

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	

Рис.3. Ряд номинальных значений

Получаем $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_2 = 3 \text{ МОм}$.

На рис.2. (справа) показана точка А с координатами (I_1, U_{ak}) , из чего следует, что сопротивление фотодиода постоянному току в этой точке

$$R_d = \frac{U_{ak}}{I_1} = \frac{6}{(1 + 0.1) \cdot 10^{-6}} = 5.45 \text{ МОм}.$$

3.1.2 Предварительный расчет по постоянному току каскада на полевом транзисторе V2

Каждый транзистор КП307 имеет свои справочные данные: ток стока начальный $I_{C\text{нач}}=6$ мА; максимальную крутизну $S_{\text{макс}}=9$ мА/В; напряжение отсечки $U_{\text{отс}}=-1.5$ В.

Другие показатели полагаем одинаковыми: емкость затвор–исток $C_{зи} = 5$ пФ, емкость проходная $C_{зс} = 1,5$ пФ; ток утечки затвора $I_{\text{ут.з}}=1$ нА; сопротивление затвор–исток $r_{зи} = U_{зи}/I_{\text{ут.з}} = 1000$ МОм.

Так как сопротивление затвор-исток очень велико для рассматриваемой схемы, то оно не будет учитываться в эквивалентной модели полевого транзистора по переменному сигналу.

Принципиальная схема каскада на полевом транзисторе V2 по постоянному току представлена на рис. 4. Для заданного типа полевого транзистора вычертим свою вольт-амперную характеристику, используя известные соотношения $I_C = I_{C\text{нач}} \cdot (1 - U_{зи} / U_{\text{отс}})^2$ (рис. 4).

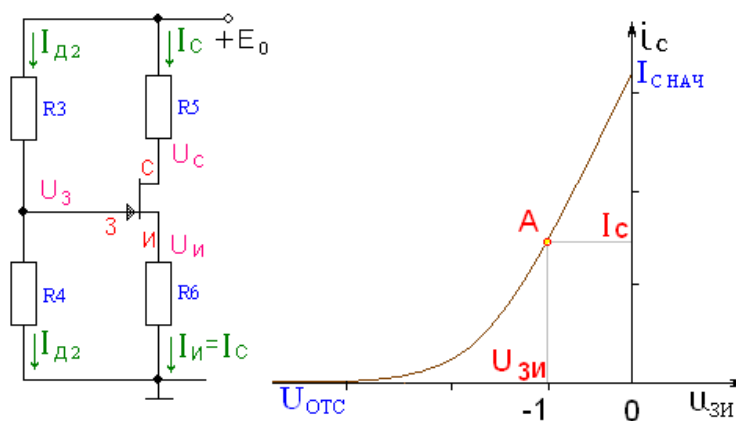


Рис. 4. Типовая вольт-амперная характеристика полевого транзистора с n-каналом

Для расчета резисторов $R_3 \dots R_6$ сначала необходимо рассчитать точку покоя полевого транзистора V2 исходя из его параметров: начального тока стока $I_{Cнач}$, максимальной крутизны S_{max} и напряжения отсечки $U_{отс}$.

Выбираем напряжение затвор–исток $U_{ЗИ} = -1$ В.

Затем определяем ток покоя стока

$$I_C = I_{Cнач} (1 - U_{ЗИ}/U_{отс})^2 = 6 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \frac{-1}{-1,5})^2 = 0,67 \text{ мА}$$

и крутизну

$$S = S_{max} (1 - U_{ЗИ}/U_{отс}) = 9 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \frac{-1}{-1,5}) = 3 \text{ мА/В.}$$

Как правило, выбирают напряжение на истоке: $U_{И} = 0.2E_0 = 2$ В

а напряжение сток-исток: $U_{СИ} = \frac{E_0}{2} = \frac{10}{2} = 5$ В

Тогда напряжение на стоке равно: $U_C = U_{И} + U_{СИ} = 2 + 5 = 7$ В

Отсюда сопротивления резисторов в цепи истока и стока

$$R_6 = \frac{U_{И}}{I_C} = \frac{2}{0,67 \cdot 10^{-3}} = 3 \text{ кОм}$$

$$R_5 = \frac{E_0 - U_C}{I_C} = \frac{10 - 7}{0,67 \cdot 10^{-3}} = 4,1 \text{ кОм}$$

В соответствии с номинальным рядом (± 5 % для R_6 и ± 10 % для R_5):

$$R_6 = 3 \text{ кОм} \quad R_5 = 3,9 \text{ кОм}$$

Напряжение на затворе $U_3 = U_{И} + U_{ЗИ} = 2 - 1 = 1$ В

Рассчитаем сопротивление резистора R_4 , исходя из заданной верхней частоты $f_{B\sqrt{2}}$:

$$C = C_d + C_{вх} + C_m = C_d + (C_{ЗИ} + (S \cdot R_5 + 1) \cdot C_{зс}) + C_m = 29,25 \text{ пФ},$$

Где:

C_d – проходная емкость диода ($C_{зс}$);

$C_{вх}$ – входная емкость транзистора V2;

$C_{вх} \approx C_{ЗИ} + (S \cdot R_5 + 1) \cdot C_{зс}$;

$C_m = 1$ пФ – емкость монтажа.

Необходимо выбрать R_4 из следующих условий (с разбросом ± 10 %):

$$R_4 \leq \frac{1}{2\pi f_{B\sqrt{2}} C} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 29,25 \cdot 10^{-12}} = 2,721 \text{ кОм} (2,7 \text{ кОм}) \Rightarrow$$

После этого определяем ток делителя

$$I_{Д2} = \frac{U_3}{R_4} = \frac{1}{2.7 \cdot 10^3} = 0.37 \text{ мА}$$

и сопротивление резистора

$$R_3 = \frac{E_0 - U_3}{I_{Д2}} = \frac{10 - 1}{0.37 \cdot 10^{-3}} = 24.32 \text{ кОм} (24 \text{ кОм})$$

3.1.3 Расчет по постоянному току каскадов на биполярных транзисторах V3, V4

Биполярный транзистор КТ325В имеет следующие параметры:

- транзистор биполярный кремниевый;
- $U_{БЭ}=0.7 \text{ В}$;
- коэффициент усиления по току минимальный $h_{21 \text{ min}} = 80$;
- коэффициент усиления по току максимальный $h_{21 \text{ max}} = 300$;
- частота единичного усиления $f_t = 1500 \text{ МГц}$;
- максимальный постоянный ток коллектора $I_{k \text{ max}} = 30 \text{ мА}$;
- максимальное напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ \text{ max}} = 15 \text{ В}$;
- постоянная времени цепи обратной связи $\tau_k = 60 \text{ пс}$;
- ёмкость коллекторного перехода $C_k = 2 \text{ пФ}$;
- допустимая мощность рассеиваемая на коллекторе $P_{к \text{ доп}} = 225 \text{ мВт}$.

Для расчета сопротивлений резисторов $R_7 \dots R_{11}$ необходимо выбрать режимы работы транзисторов V3 и V4 (рис. 5).

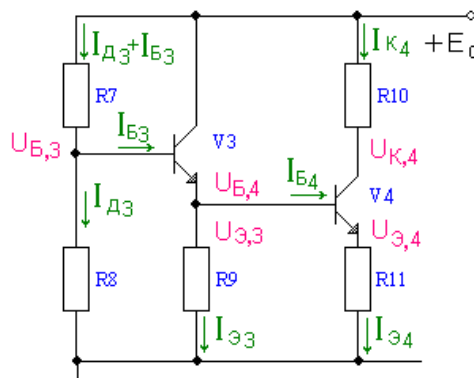


Рис. 5. Принципиальная схема каскадов на биполярных транзисторах по постоянному току

Выбираем ток покоя транзистора V4:

$$I_{K4} \leq 6 \text{ мА} \Rightarrow I_{K4} = 6 \text{ мА}$$

Учитывая, что переменный коллекторный ток транзистора V3 меньше, чем переменный ток коллектора V4, можно выбрать постоянный коллекторный ток

$$I_{K3} \leq I_{K4} \Rightarrow I_{K3} = 5 \text{ мА}$$

Установив напряжение коллектор-эмиттер V4: $U_{KЭ,4} = \frac{E_0}{2} = 5 \text{ В}$

и напряжение на эмиттере V4: $U_{Э4} = 0.1 \cdot E_0 = 1 \text{ В}$

можно определить напряжение: $U_{Б4} = U_{Э3} = U_{Э4} + U_{БЭ} = 1 + 0.7 = 1.7 \text{ В}$

Напряжение на базе V3: $U_{Б3} = U_{Э3} + U_{БЭ} = 1.7 + 0.7 = 2,4 \text{ В}$

Напряжение на коллекторе V4: $U_{K4} = U_{Э4} + U_{KЭ,4} = 1 + 5 = 6 \text{ В}$

Теперь можно вычислить сопротивления резисторов $R_9 \dots R_{11}$:

$$h_{21} = \sqrt{h_{21min} \cdot h_{21max}} = \sqrt{80 \cdot 300} = 154.9$$

$$I_{Б3} = \frac{I_{K3}}{h_{21}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{154.9} = 32.3 \text{ мкА} \quad I_{Б4} = \frac{I_{K4}}{h_{21}} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{154.9} = 38.7 \text{ мкА}$$

$$I_{Э3} = I_{K3} \left(1 + \frac{1}{h_{21}}\right) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{1}{154.9}\right) = 5.032 \text{ мА}$$

$$I_{Э4} = I_{K4} \left(1 + \frac{1}{h_{21}}\right) = 6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{1}{154.9}\right) = 6.038 \text{ мА}$$

$$I_{Э3} \approx I_{K3} = 5 \text{ мА} \quad I_{Э4} \approx I_{K4} = 6 \text{ мА}$$

$$R_9 = \frac{U_{Э3}}{I_{Э3}} = \frac{1.7}{5.032 \cdot 10^{-3}} = 337,8 \text{ Ом}(330 \text{ Ом})$$

$$R_{10} = \frac{E_0 - U_{K4}}{I_{K4}} = \frac{10 - 6}{6 \cdot 10^{-3}} = 666.6 \text{ Ом}(680 \text{ Ом})$$

$$R_{11} = \frac{U_{Э4}}{I_{Э4}} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-3}} = 166,6 \text{ Ом}(160 \text{ Ом})$$

Для вычисления сопротивлений резисторов R_7 и R_8 нужно знать ток делителя $I_{Д3}$. Обычно его выбирают:

$$I_{Д3} \geq 10 \cdot I_{Б3} = 323 \text{ мкА} \Rightarrow I_{Д3} = 323 \text{ мкА}$$

Сопротивления резисторов

$$R_7 = \frac{E_0 - U_{БЗ}}{I_{ДЗ} + I_{БЗ}} = \frac{10 - 2,4}{323 \cdot 10^{-6} + 32,3 \cdot 10^{-6}} = 21.39 \text{ кОм} (22 \text{ кОм});$$

$$R_8 = \frac{U_{БЗ}}{I_{ДЗ}} = \frac{2.4}{323 \cdot 10^{-6}} = 7.43 \text{ кОм} (7,5 \text{ кОм})$$

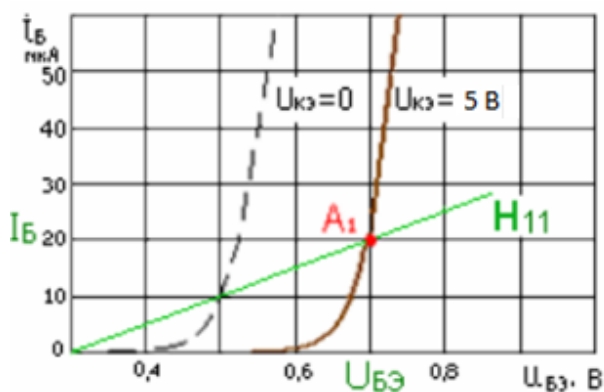
3.1.4 Расчет по постоянному току в схеме на ОУ

Этот расчет сводится к определению номинальных значений резисторов R_{12} и R_{13} . С одной стороны, они должны обеспечить «среднюю точку» напряжения питания $E_0/2$ на ОУ, и потому $R_{12} = R_{13}$, с другой стороны, их параллельное соединение на переменном токе не должно сильно шунтировать нагрузку транзистора V4. Вследствие этого рекомендуется выбирать $R_{12} = R_{13} = 5 R_{10}$. Обычно для резисторов в цепи эмиттера и истока принимают допуск $\pm 5\%$, а для остальных $\pm 10\%$. В соответствии с номинальным рядом:

$$R_{12} = R_{13} = 3.6 \text{ кОм}$$

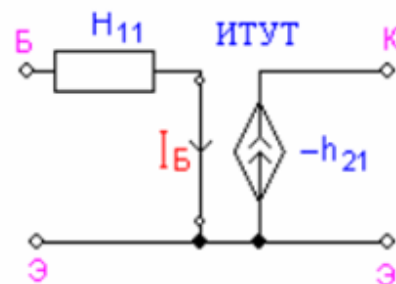
3.1.5 Проверка расчета по постоянному току с помощью компьютера

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



а)

$$H_{11} = \frac{U_{БЗ}}{I_{Б}}$$



б)

Рис. 6. Определение входного сопротивления (а)

и эквивалентная схема биполярного транзистора (б) по постоянному току

Вследствие несовпадения направления постоянного коллекторного тока в реальном транзисторе и в компьютерной модели (рис. 6, б) коэффициенту передачи тока h_{21} необходимо присвоить знак «минус» (например, $h_{21} = -100$).

Составим эквивалентную схему усилителя на биполярных транзисторах (рис. 7) 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, выбранные по номинальному ряду. Сопротивления R_6 и R_{12} не являются резисторами, они отражают эквиваленты входных сопротивлений переходов база–эмиттер транзисторов V3 и V4 ($H_{11,3}$ и $H_{11,4}$) по постоянному току (рис. 6, а). Их величины:

$$R_6 = H_{11,3} = U_{БЭ}/I_{Б3},$$

$$R_{12} = H_{11,4} = U_{БЭ}/I_{Б4},$$

$$\text{Где } U_{БЭ} = 0,7 \text{ В.}$$

$$H_{11,3} = \frac{U_{БЭ}}{I_{Б3}} = \frac{0.7}{32.3 \cdot 10^{-6}} = 21.67 \text{ кОм,}$$

$$H_{11,4} = \frac{U_{БЭ}}{I_{Б4}} = \frac{0.7}{38.7 \cdot 10^{-6}} = 18.09 \text{ кОм}$$

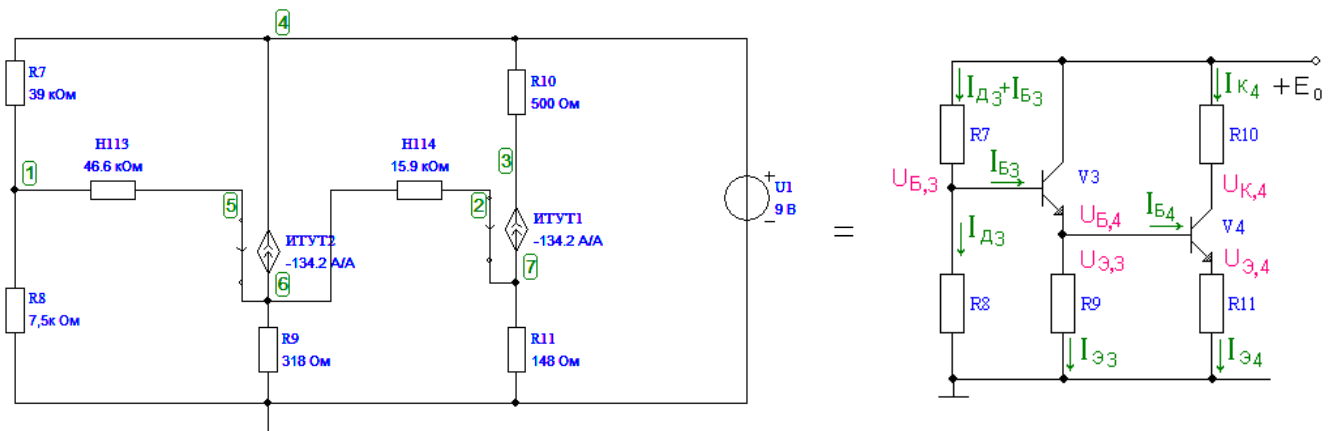


Рис. 7, а) Эквивалентная схема усилительного каскада на V3,V4 по постоянному току

С помощью команды «Анализ по постоянному току» в схеме рис. 7 вычислим токи в резисторах и напряжения в узлах. В табл. 6 вносим все результаты без учета знака.

Результаты анализа по постоянному току		
Переменная	Напряжение / ток	
*** УЗЛОВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ***		
U(Узел 1)	2.43 В	
U(Узел 2)	0.987 В	
U(Узел 3)	5.83 В	
U(Узел 4)	10 В	
U(Узел 5)	1.7 В	
U(Узел 6)	1.7 В	
U(Узел 7)	0.987 В	
*** ТОКИ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОРЫ ***		
I(H114)	39.6 мкА	
I(H113)	-33.3 мкА	
I(R7)	0.344 мА	
I(R8)	0.311 мА	
I(R10)	6.13 мА	
I(R9)	5.16 мА	
I(R11)	6.17 мА	

Рис. 7, б) Расчёт по постоянному току в fastmean

Табл. 6

Параметр	V3				V4		
Токи и напряжения	$U_{Б3}$, В	$U_{Э3}$, В	$I_{Д3}$, мА	$I_{Э3}$, мА	$U_{Э4}$, В	$U_{К4}$, В	$I_{К4}$, мА
Расчет предварительный	2.4	1.7	0.323	5.032	1	6	6
Компьютерный	2.43	1.7	0.311	5.16	0,987	5.83	6.17

Результаты совпадают с точностью $\leq 10\%$ - расчет всех элементов схемы по постоянному току сделан правильно.

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

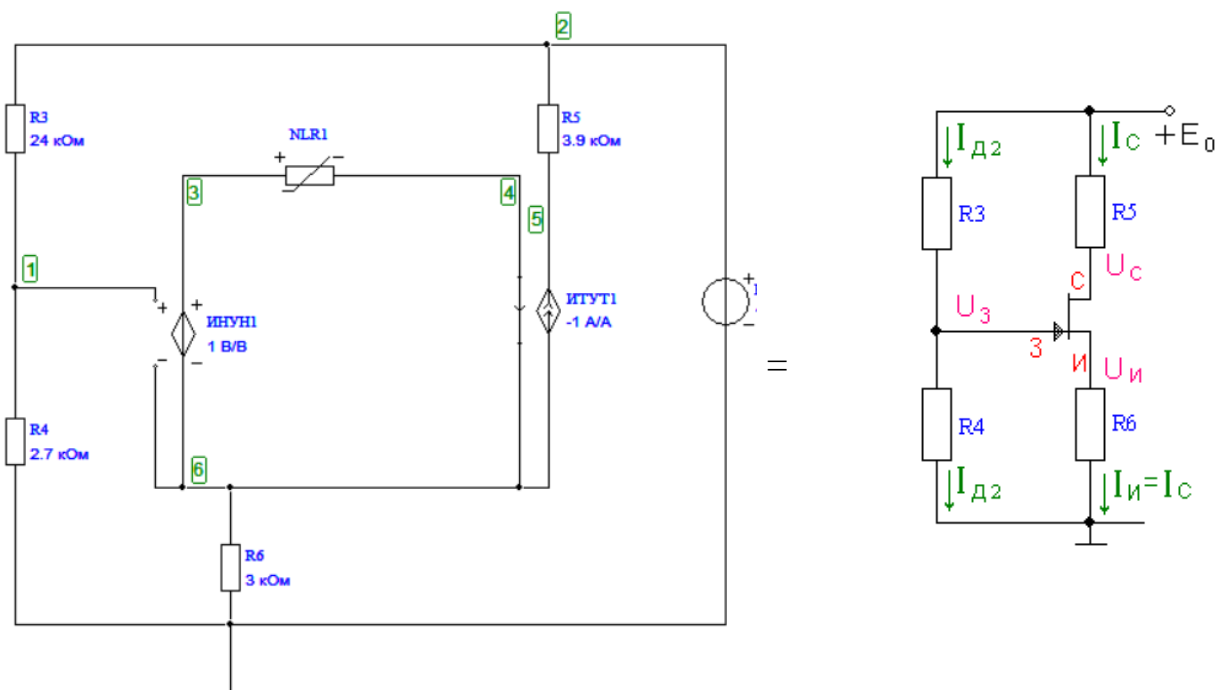


Рис. 8, а) Эквивалентная схема усилительного каскада на V2 по постоянному току.

Режим покоя полевого транзистора определяют резисторы R5 и R6. Построим вольтамперную характеристику (ВАХ), отметим точку покоя при $U_{зи} = -1$ ($I_c = 0.67$ мА)

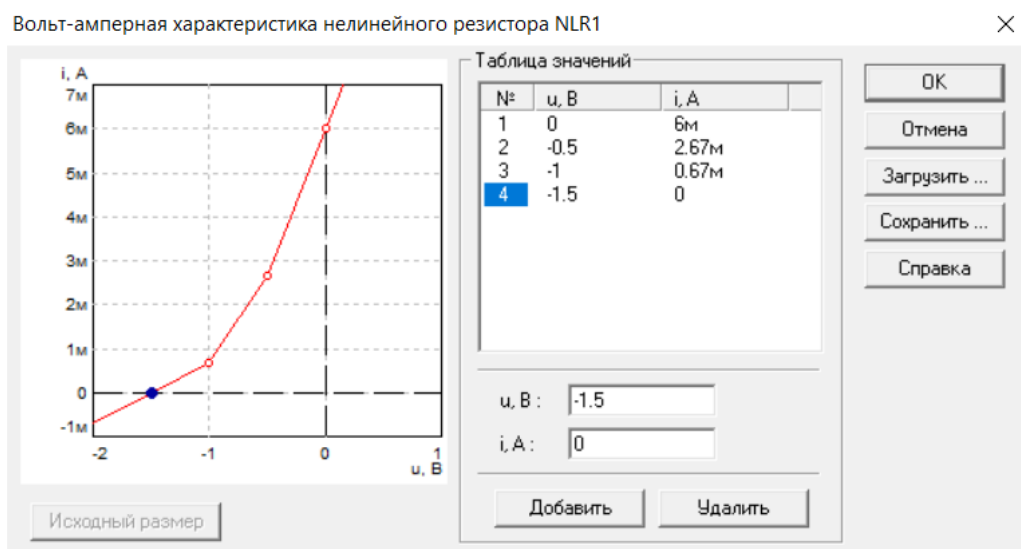


Рис. 8, б) ВАХ нелинейного элемента.

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

Результаты анализа по постоянному току

Переменная	Напряжение / ток
*** УЗЛОВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ***	
U(Узел 1)	1.01 В
U(Узел 2)	10 В
U(Узел 3)	1.01 В
U(Узел 4)	2.84 В
U(Узел 5)	6.31 В
U(Узел 6)	2.84 В
*** ТОКИ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОРЫ ***	
I(R3)	0.375 мА
I(R4)	0.375 мА
I(R6)	0.947 мА
I(R5)	-0.947 мА
I(NLR1)	21.7 мА

Рис. 8, в) Расчёт по постоянному току в fastmean

Табл. 7

Параметр	V2			
Токи и напряжения	U _c , В	U ₃ , В	I _{д2} , мкА	I _c , мА
Расчет предварительный	7	1	370	0.67
Расчет компьютерный	6.31	1.01	375	-0.947

Результаты совпадают с точностью $\leq 10\%$ - расчет всех элементов схемы по постоянному току сделан правильно.

4. Расчет по сигналу

Расчет по сигналу 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 R_2 , R_3 , R_5 , R_7 , R_{10} (рис. 1) оказываются на переменном токе соединенными с общим проводом. Коллектор транзистора V3 также соединяется с общим проводом. Далее нужно элементы схемы V1...V4 и AD1 заменить их эквивалентными моделями на переменном токе. Источником сигнала является фототок I_{m1} диода V1. Сопротивление фотодиода на переменном токе определяется касательной к вольтамперной 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 80...100 МОм. Это дает право рассматривать источник сигнала как генератор тока. Чрезвычайно большое сопротивление r_d нет необходимости учитывать в эквивалентной схеме, остается учесть лишь емкость фотодиода $C_d = 1$ пФ (рис. 9, а). На рис. 9, б изображена эквивалентная схема фотодиода по переменному току с учетом его цепей питания.

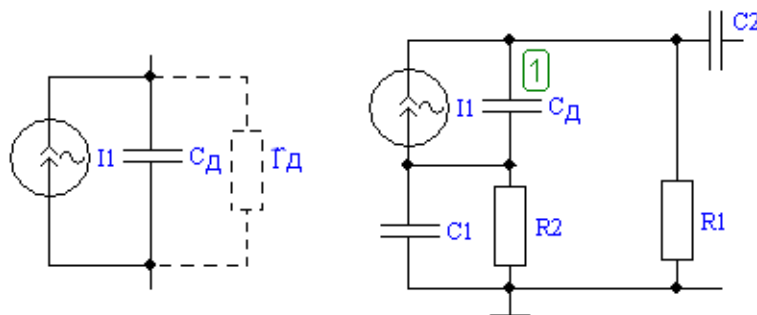


Рис. 9. Модель фотодиода на переменном токе (а)
и эквивалентная схема входной цепи (б)

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. $i_C = -S \cdot u_{ЗИ}$.

В данной модели $C_{ЗИ}$ – емкость затвор–исток транзистора, пФ, $C_{ЗС}$ – проходная емкость, емкость перехода затвор–сток, пФ, (величины этих емкостей даются в справочниках по транзисторам), S – крутизна в точке покоя, мА/В. Сопротивление перехода затвор–исток $r_{ЗИ}$ очень велико.

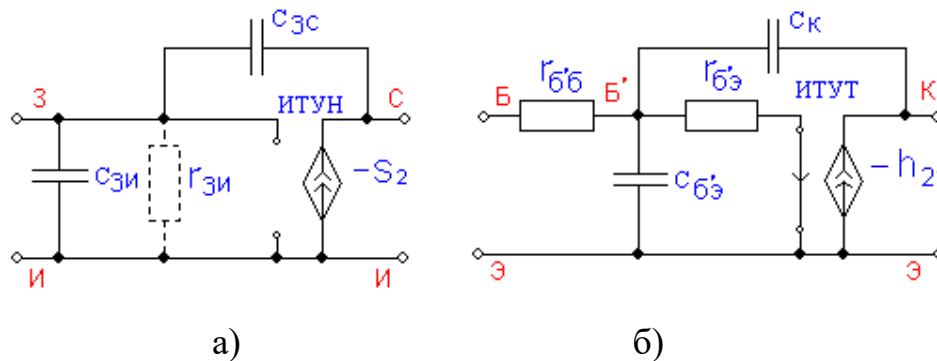


Рис.10. Эквивалентная модель транзисторов по сигналу: а) полевого – V2 (ИТУН); б) биполярного – V3 и V4 (ИТУТ)

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. $i_K = -h_{21}i_б$.

В этой модели $r_{б'б}$ – объемное сопротивление базового слоя, Ом. Находим его из выражения

$$r_{б'б,3} = r_{б'б,4} = \frac{\tau_K}{C_K} = \frac{60 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-12}} = R16 = R18 = 30 \text{ Ом},$$

где C_K – емкость коллекторного перехода, пФ, приводится в справочниках. Сопротивление перехода база–эмиттер $r_{б'э}$, Ом, вычисляется так:

$$r_{б'э,3} = R17 = (1 + h_{21}) \frac{25 \text{ (мВ)}}{I_{к3} \text{ (мА)}} = (1 + 154.9) \cdot \frac{25 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 774.5(820) \text{ Ом}$$

$$r_{б'э,4} = R19 = (1 + h_{21}) \frac{25 \text{ (мВ)}}{I_{к4} \text{ (мА)}} = (1 + 154.9) \cdot \frac{25 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 645.41(680) \text{ Ом}$$

где h_{21} – коэффициент усиления по току транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Емкость перехода база–эмиттер $C_{б'э}$, пФ, вычисляется по выражению

$$C_{6'3,3} = C_{12} = \frac{h_{21}}{2\pi f_T r_{6'33}} = \frac{154.9}{2\pi \cdot 1500 \cdot 10^6 \cdot 820} = 20 \text{ пФ}$$

$$C_{6'3,4} = C_{14} = \frac{h_{21}}{2\pi f_T r_{6'34}} = \frac{154.9}{2\pi \cdot 1500 \cdot 10^6 \cdot 680} = 24.2 \text{ пФ}$$

где f_T – частота единичного усиления из справочника.

Модель, удобная для учебного процесса, показана 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 РС – элементами. Следует отметить, что использование ИТУН дает более простую модель, чем использование ИТУТ, отображающего реально действующие в ОУ биполярные транзисторы.

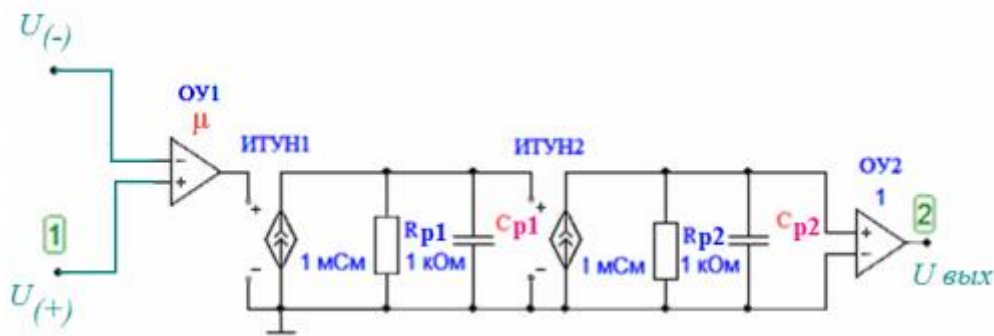


Рис. 11. Макромодель ОУ.

Соединив модели активных элементов согласно принципиальной схеме (рис. 1), получим эквивалентную схему усилителя по сигналу для всех диапазонов частот (рис. 13). Номера внешних резисторов $R_1 \dots R_{15}$ и конденсаторов $C_1 \dots C_8$ этой схеме соответствуют номерам резисторов и конденсаторов принципиальной схемы (рис. 1).

К этому моменту остаются неизвестными значения резисторов R_{14} и R_{15} , поскольку не определен коэффициент усиления каскада на ОУ $K_F = U_{21}/U_{13}$. Напряжение $U_{21} = U_{2H}$ задано в табл. 3. Напряжение U_{13} следует определить, активировав клавишу «переходный процесс», установив предварительно в источнике сигнала ток $I_{m1} = 1 \text{ мкА}$ 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

$$K_F = 1,42 \cdot U_{2H} / U_{13m}. \text{ Для реализации этого усиления воспользуемся зависимостью коэффициента усиления в неинвертирующем включении ОУ: } K_F = 1 + \frac{R_{15}}{R_{14}}.$$

Расчет средней частоты f_0 переменного сигнала, подаваемого на вход проектируемой схемы:

$$f_0 = \sqrt{f_{H\sqrt{2}} * f_{B\sqrt{2}}} = \sqrt{30 * 10^3 * 2 * 10^6} = 244,95 \text{ кГц}$$

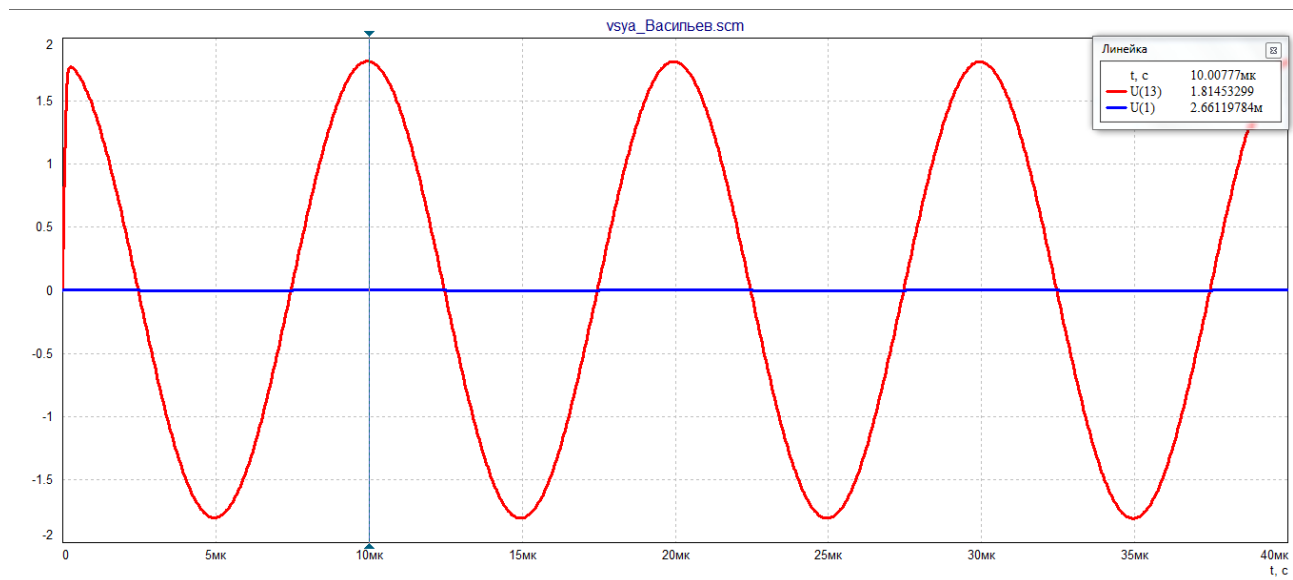


Рис. 12. Определение амплитуды сигнала U_{13m} .

Т.к. $U_{13m} = 1,81$ В, то:

$$K_F = \frac{1.41 \cdot U_{2H}}{U_{13m}} = \frac{1.41 \cdot 2.2 \text{ (а было 2.4 хз хз откуда мы это взяли)}}{1,81} = 1.72$$

Выбрав $R_{15} = (R_{12} \parallel R_{13})$, вычислим R_{14} .

$$R_{15} = \frac{R_{12} R_{13}}{R_{12} + R_{13}} = 1.8 \text{ кОм}$$

$$R_{14} = \frac{R_{15}}{K_F - 1} = 2,5 \text{ кОм (2,7 кОм)}$$

Зададим полюса ОУ:

$$K_{\text{усил.}} = 55 \text{ дБ} = 10^{\frac{50}{20}} = 316,23$$

$$f_{p1} = \frac{f_1}{K_{\text{усил.}}} = \frac{400 \cdot 10^6}{316,23} = 1265 \text{ кГц}$$

$$f_{p2} = f_1 = 400 \text{ МГц}$$

Рассчитаем C_{16} и C_{17} , положив $R_{20} = R_{21} = 1 \text{ кОм}$:

$$C_{16} = \frac{1}{2\pi R_{20} f_{p1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 1265 \cdot 10^3} = 0,13 \text{ нФ};$$

$$C_{17} = \frac{1}{2\pi R_{21} f_{p2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 400 \cdot 10^6} = 0,39 \text{ пФ}$$

Положим $C_1 = C_2 = C_4 = C_6 = C_7 = C_8 = 1 \text{ мкФ}$, C_3 и $C_5 = 2,5 \text{ мкФ}$.

Построим полную эквивалентную схему усилителя:

5. Сравнение полученных результатов с требованиями технического задания

Теперь можно определить частотные свойства всего усилителя с помощью Fastmean. Придав элементам схемы рис. 13 соответствующие значения, можно определить зависимость сопротивления передачи от частоты: $R(f) = U_{\text{ВЫХ}}/I_1$. Для этого в диалоговом окне набираем $U(21)/I_1$. В связи с тем что исследуемая функция не безразмерная, представлять ее в децибелах, как коэффициент усиления, нельзя. Шкалы по X и Y должны быть обе логарифмическими.

Вид функции сопротивления передачи показан на рис. 14. Вызвав линейку на экран, вычисляем частоты верхнего $f_{\text{В}\sqrt{2}}$ и нижнего среза $f_{\text{Н}\sqrt{2}}$, при которых по определению коэффициент передачи становится равен $0,7R_0$, где R_0 – сопротивление передачи на средней частоте.

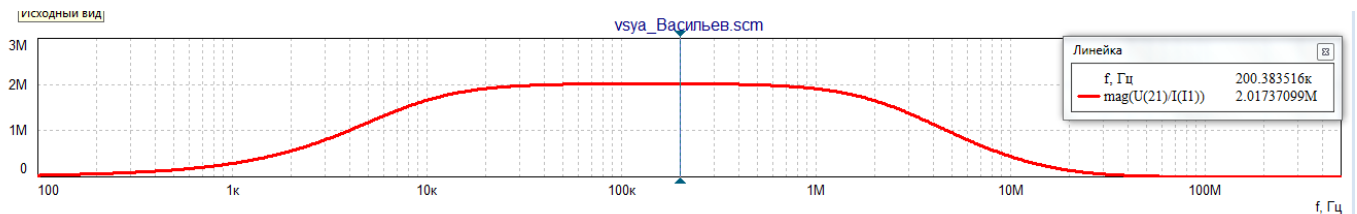


Рис. 14. Вид функции сопротивления передачи

$$R_0 = 2.017 \text{ МОм} \quad f_{\text{Н}\sqrt{2}} = 3.91 \text{ кГц} \quad f_{\text{В}\sqrt{2}} = 5.12 \text{ МГц}$$

Теперь сравним полученные частоты с частотами, указанными в техническом задании (Таблица 3):

$$f_{\text{Н}\sqrt{2}} (\text{т. з.}) = 30 \text{ кГц},$$

$$f_{\text{В}\sqrt{2}} (\text{т. з.}) = 2 \text{ МГц}$$

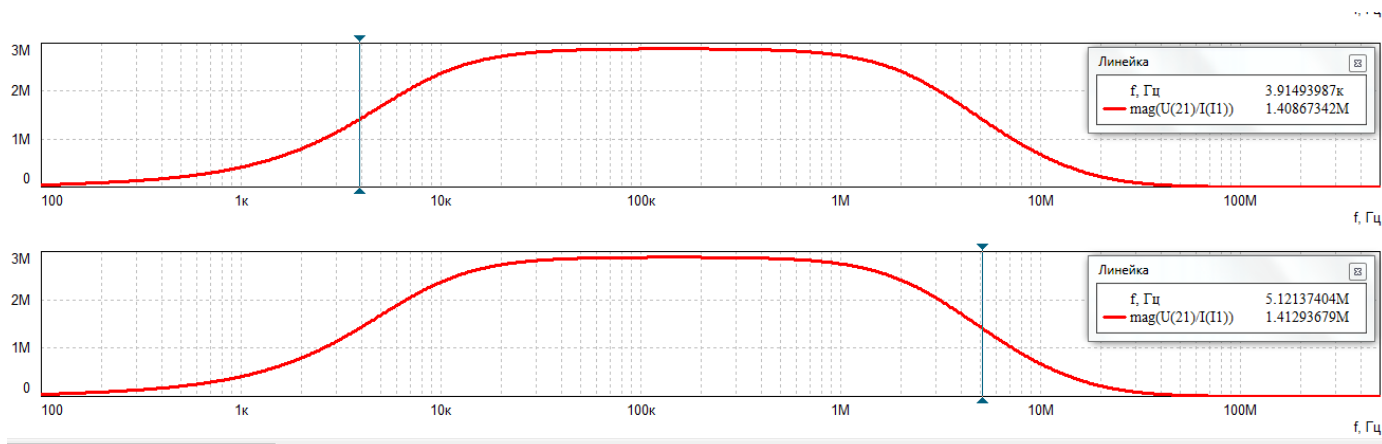


Рис. 14. Вид функции сопротивления передачи

Для того, чтобы спроектированный фильтр удовлетворял требованиям технического задания, должно выполняться условие:

$$f_{H\sqrt{2}} \leq f_{H\sqrt{2} \text{ Т.З.}}, \text{ а } f_{B\sqrt{2}} \geq f_{B\sqrt{2} \text{ Т.З.}}$$

Так как $3.91 \text{ кГц} < 30 \text{ кГц}$, а $5.12 \text{ МГц} > 2 \text{ МГц}$ можно сделать вывод о том, что мы успешно спроектировали фильтр в соответствии с требованиями к проекту.

После проведения коррекции и определения полосы пропускания спроектированного усилителя, определим величину выходного напряжения на средней частоте: $U_{\text{вых } 0} = I_{m1} \cdot R_0 \approx U_{2H} \pm 10 \%$, где R_0 - сопротивление передачи $R(f)$ на средней частоте (определяется по АЧХ);

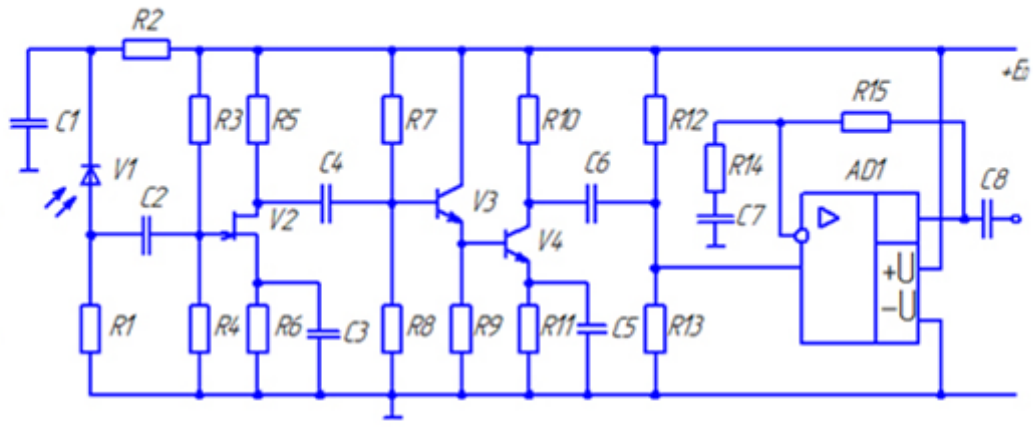
U_{2H} – выходное напряжение в соответствии с ТЗ (см. таблицу 3).

Амплитуда тока: $I_{m1} = I_1 - I_{\text{ТЭМН}} = 1,1 \text{ мкА} - 0,1 \text{ мкА} = 1 \text{ мкА}$.

$$U_{\text{вых } 0} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 2.017 \cdot 10^6 \approx 2.017 \text{ В}$$

Так как значение $U_{\text{вых } 0} (2.017 \text{ В}) \approx U_{2H} (2.2 \text{ В}) \pm 10 \%$, можно сделать вывод о том, что проверка полученного результата произведена успешно.

6. Чертеж принципиальной схемы

Пред. примен. Спроб. №	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <i>EE 000'00'00</i> </div> 									
Подп. и дата Взам. инв. № Инв. № дубл. Подп. и дата	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <i>00.00.000 33</i> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p><i>Схема электрическая принципиальная</i></p> </div> <div style="width: 35%; text-align: right;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Лит.</td> <td style="width: 15%;">Масса</td> <td style="width: 15%;">Масштаб</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Лист</td> <td>Листов</td> <td>1</td> </tr> </table> </div> </div>	Лит.	Масса	Масштаб				Лист	Листов	1
Лит.	Масса	Масштаб								
Лист	Листов	1								
Инв. № подл. Н.контр. Утв.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <i>00.00.000 33</i> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p><i>Схема электрическая принципиальная</i></p> </div> <div style="width: 35%; text-align: right;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Лит.</td> <td style="width: 15%;">Масса</td> <td style="width: 15%;">Масштаб</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Лист</td> <td>Листов</td> <td>1</td> </tr> </table> </div> </div>	Лит.	Масса	Масштаб				Лист	Листов	1
Лит.	Масса	Масштаб								
Лист	Листов	1								

Копирован
Формат A4

Име. № подл	Подп. и дата	Име. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
					AD1	Операционный усилитель ОРА655	1	
					C1...C8	Конденсатор Э- 1мкФ	8	
					R1	Резистор А- 1МОм ±10%	1	
					R2	Резистор А- 3МОм ±5%	1	
					R3	Резистор А- 24кОм ±5%	1	
					R4	Резистор А- 2,7кОм ±5%	1	
					R5	Резистор А- 3.9кОм ±5%	1	
					R6	Резистор А- 3кОм ±5%	1	
					R7	Резистор А- 22кОм ±10%	1	
					R8	Резистор А- 7,5кОм ±5%	1	
					R9	Резистор А- 0,330кОм ±5%	1	
					R10	Резистор А- 0,680кОм ±10%	1	
					R11	Резистор А- 0,160кОм ±5%	1	
					R12,R13	Резистор А- 3.6кОм ±5%	2	
					R14	Резистор А- 2,7кОм ±10%	1	
					R15	Резистор А- 1.8кОм ±5%	1	
					V1	Фотодиод ФДК-227	1	
					V2	Транзистор КП 307А	1	
					V3,V4	Транзистор КТ355А	2	

7. Список используемой литературы

- К расчету резисторных каскадов. Методические указания / А. Г. Алексеев, П. В. Климова. – 2012. – <http://cathseugut.narod.ru>
- www.fastmean.ru. Официальный сайт программы FASTMEAN.
- Методические указания к курсовому проектированию усилителя-фотоприемника ВОСПИ / А. Г. Алексеев, П. В. Климова. – СПб., 2012.
- Материалы практических занятий
- Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учеб. пособие