

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

---

Факультет фундаментальной подготовки

Кафедра  
«Электроники и схемотехники»

## ***КУРСОВАЯ РАБОТА***

учебная дисциплина «Схемотехника»

Тема: «Проектирование усилителя-фотоприемника ВОСПИ»

Выполнила студентка III курса  
группы ИКТЗ-53  
Катина Т. В.,  
номер зачётной книжки 1504101;  
номер выполняемого варианта 101;

Проверил руководитель  
доц. каф. ЭиС,  
канд. техн. наук  
Никитин Ю. А.

Оценка \_\_\_\_\_ (подпись)

Санкт-Петербург

2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 ЗАДАНИЕ .....	4
2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	5
3 ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ .....	7
4 РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ .....	9
4.1 Предварительный расчёт резисторов по постоянному току .....	9
4.1.1 Предварительный расчёт резисторов диода $V_1$ .....	9
4.1.2 Предварительный расчёт по постоянному току каскада .....	11
на полевом транзисторе $V_2$ .....	11
4.1.3 Расчёт по постоянному току каскадов на биполярных транзисторах $V_3, V_4$ .....	15
4.1.4 Расчёт по постоянному току в схеме на ОУ .....	19
4.2 Проверка расчёта по постоянному току с помощью компьютера .....	19
5 РАСЧЁТ ПО СИГНАЛУ .....	22
5.1 Расчёт по сигналу полевого транзистора $V_2$ и биполярных транзисторов $V_3$ и $V_4$ .....	22
5.2 Расчёт по сигналу ОУ .....	25
5.3 Расчёт резисторов $R_{14}, R_{15}$ .....	27
5.4 Определение частотных свойств всего усилителя с помощью <i>Fastmean</i> ..	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	34

## **ВВЕДЕНИЕ**

Курсовая работа посвящена проектированию широкополосного RC-усилителя, источником сигнала которого является генератор тока.

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.

Цель данной работы – приобретение практических навыков в расчете широкополосных усилителей.

Задачи, поставленные в курсовой работе:

1. изучить и проанализировать принцип работы схемы усилителя;
2. рассчитать основные параметры усилителя и элементов принципиальной схемы;
3. сравнить полученные результаты с требованиями технического задания;
4. сделать вывод о результатах проведенного расчёта.

## 1 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  $U_2$ .

Вариант технического задания определяет технические требования к курсовому проекту.

## 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные для варианта 101:

1. Исходные данные для полевого транзистора.

- напряжение затвор–исток  $U_{ЗИ} = -1$  В;
- тип транзистора КП 307Б;
- начальный ток стока  $I_{с\text{ нач}} = 10$  мА;
- крутизна макс.  $S_{\text{max}} = 15$  мА/В;
- напряжение отсечки  $U_{\text{отс}} = -2,5$  В;
- входная ёмкость  $C_{ЗИ} = 5$  пФ;
- проходная ёмкость  $C_{ЗС} = 1,5$  пФ;
- ток утечки затвора  $I_{\text{ут.з}} = 1$  нА.

2. Исходные данные для биполярного транзистора малой мощности

типа  $n-p-n$ .

- тип транзистора КТ339А;
- $P_{\text{к}} = 250$  мВт;
- $U_{\text{кэ max}} = 25$  В;
- $I_{\text{к max}} = 25$  мА;
- $h_{21\text{max}} = 100$ ;
- $h_{21\text{min}} = 25$ ;
- $f_{\text{т}} = 300$  МГц;
- $C_{\text{к}} = 2$  пФ;
- $\tau_{\text{к}} = 25$  пс;

3. Величина напряжения источника питания, величина действующего значения выходного напряжения, полоса пропускания.

- $E_0 = 10$  В;
- $U_{2\text{н}} = 2,2$  В;
- $f_{\text{н}} \sqrt{2} = 20$  к Гц;

-  $f_{\text{в}\sqrt{2}} = 2 \text{ МГц}$ .

4. Исходные данные для операционного усилителя.

- тип ОУ ОРА655;

- частота единичного усиления  $f_1 = 250 \text{ МГц}$ ;

- коэффициент усиления ОУ 80 дБ;

5. Конденсаторы  $C_1$ – $C_8$  выбираются равными  $1 \dots 5 \text{ мкФ}$ .

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

### 3 ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Принципиальная схема усилителя представлена на рис. 1.

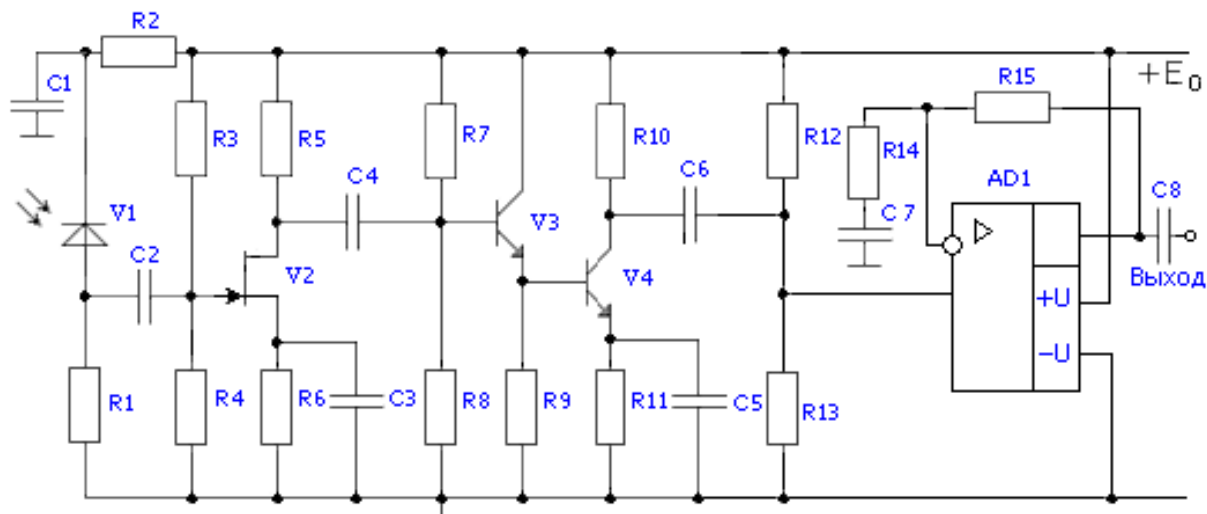


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя

Усилитель состоит из предварительных каскадов и основного усилителя.

Источником сигнала является ток фотодиода  $V_1$ . Даже когда свет падает на фотодиод  $V_1$ , 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  $V_2$  и суммарной ёмкостью  $C$ , состоящей из проходной емкости  $C_d$  фотодиода  $V_1$ , входной ёмкости  $C_{вх}$  транзистора  $V_2$  и ёмкости монтажа  $C_m$ . Хотя  $r_{зи}$  (входное сопротивление полевого транзистора  $V_2$ ) велико, 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  $f_{в\sqrt{2}}$ .

Биполярный транзистор  $V_3$ , включённый по схеме с общим коллектором, служит буферным каскадом с большим входным и малым выходным сопротивлениями.

Транзистор  $V_4$  включен по схеме с общим эмиттером. Его нагрузкой является делитель напряжения на резисторах  $R_{12}$  и  $R_{13}$ , обеспечивающий потенциал средней точки однополярного напряжения питания  $E_0$  операционного усилителя  $AD_1$ . По этой причине должно быть:  $R_{12} = R_{13}$ . Чтобы коэффициент усиления каскада на  $V_4$  не снижался из-за шунтирования его нагрузки  $R_{10}$  резисторами  $R_{12}$  и  $R_{13}$ , их следует выбирать равными  $5 \cdot R_{10}$ .

Для расширения полосы пропускания в области верхних частот в каскаде ОЭ может быть применена отрицательная обратная связь 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  $AD_1$ . Операционный усилитель должен довести выходное напряжение на средней частоте до заданного (действующего значения)  $U_2$ . Сигнал подается на неинвертирующий вход. На этот же вход подается напряжение смещения с делителя  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ . Оно необходимо для получения симметричного питания ОУ в схеме с однополярным источником  $E_0$ .



## 4 РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Расчёт 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.

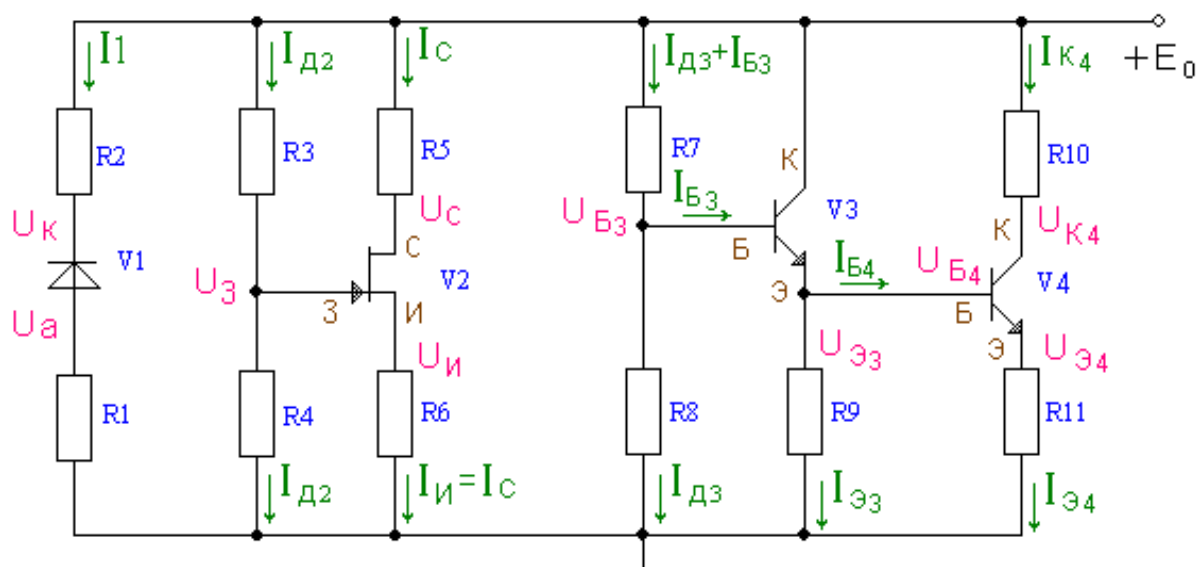


Рис. 2. Схема транзисторной части усилителя по постоянному току

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.

### 4.1 Предварительный расчёт резисторов по постоянному току

#### 4.1.1 Предварительный расчёт резисторов диода $V_1$

Параметры фотодиода  $V_1$ -ФДК-227: рабочее напряжение  $U_{раб} = 10$  В, темновой ток  $I_{тем} = 0,1$  мкА, амплитуда фототока  $I_{m1} = 1$  мкА.

Принципиальная схема цепей питания фотодиода  $V_1$  и его типовая вольт-амперная характеристика приведены на рис. 3.

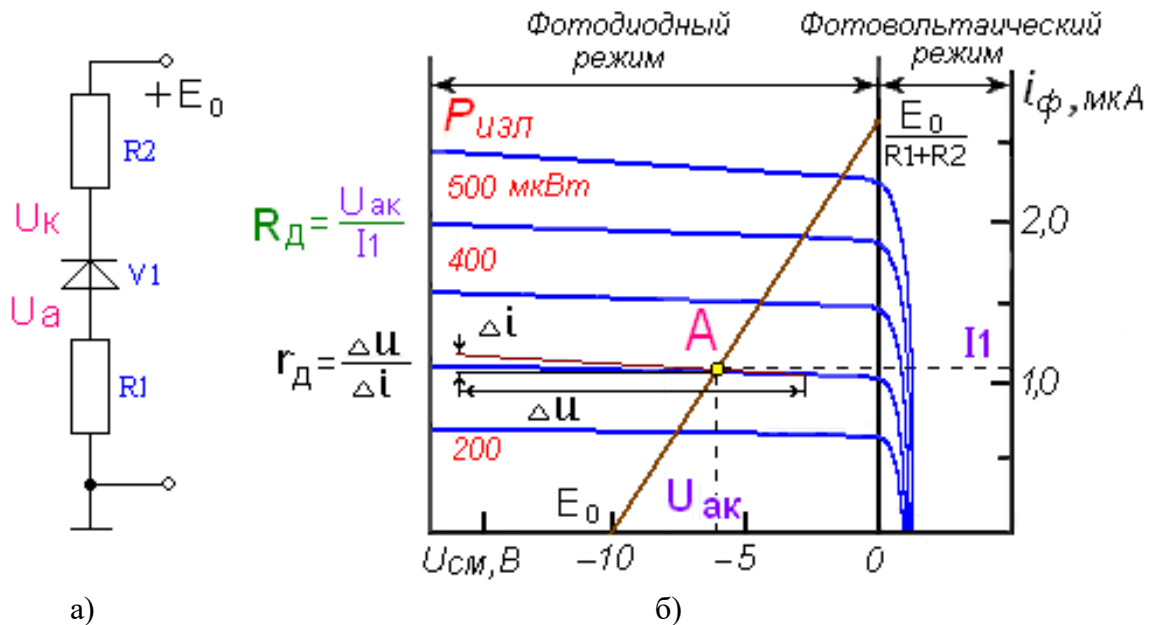


Рис. 3. Принципиальная схема цепей питания фотодиода (а) и его типовая вольт-амперная характеристика (б)

Обратное 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 создает падения напряжения на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ . Вследствие этого к фотодиоду прикладывается все напряжение питания  $E_0$ . При заданном уровне фототока исходная рабочая точка перемещается по нагрузочной линии в точку А. Сопротивление фотодиода постоянному току в этой точке с координатами  $(I_1, U_{ак})$   $R_D = U_{ак}/I_1$  составляет несколько мегаом.

Выберем напряжение анод-катод фотодиода  $U_{ак}$  так, чтобы  $|U_{ак}| < E_0$ . Тогда на резисторах  $(R_1 + R_2)$  должно быть падение напряжения, равное  $E_0 - U_{ак}$ . Задав напряжение на аноде  $U_a = 0,1E_0$ , определяем по закону Кирхгофа напряжение на катоде  $U_k = U_a + U_{ак}$ . Теперь, зная фототок, вычисляем сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R_D = \frac{U_{ак}}{I_1}; \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{U_a}{I_{m1}}; \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{(E_0 - U_K)}{I_{m1}}. \quad (3)$$

$$U_{ак} = 6 \text{ В}; U_K = 7 \text{ В};$$

$$R_1 = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{ Ом} = 1 \text{ МОм};$$

$$R_2 = \frac{(10 - 7)}{10^{-6}} = 3 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 3 \text{ МОм}.$$

Рассчитанные сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  необходимо выбрать в соответствии с номинальным рядом (табл. 1).

В табл. 1 приведены ряды значащих цифр для всех единиц измерений: Ом, кОм, МОм. Выбирается значение, ближайшее к расчётному из ряда заданной точности.

Таблица 1

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	68	75	82	91
10	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82	

Результат с учётом нормировки:

$$R_1 = 1 \text{ МОм} \pm 5\%;$$

$$R_2 = 3 \text{ МОм} \pm 5\%.$$

#### 4.1.2 Предварительный расчёт по постоянному току каскада на полевом транзисторе $V_2$

Каждый транзистор КП307 имеет свои справочные данные: ток стока начальный  $I_{с \text{ нач}}$ , мА; максимальную крутизну  $S_{\text{макс}}$ , мА/В; напряжение отсечки  $U_{отс}$ , В.

Другие показатели полагаем одинаковыми: 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  $r_{зи} = U_{зи} / I_{ут.з} = 1000 \text{ МОм}$ .

Принципиальная схема каскада на полевом транзисторе  $V_2$  по постоянному току представлена на рис. 4.

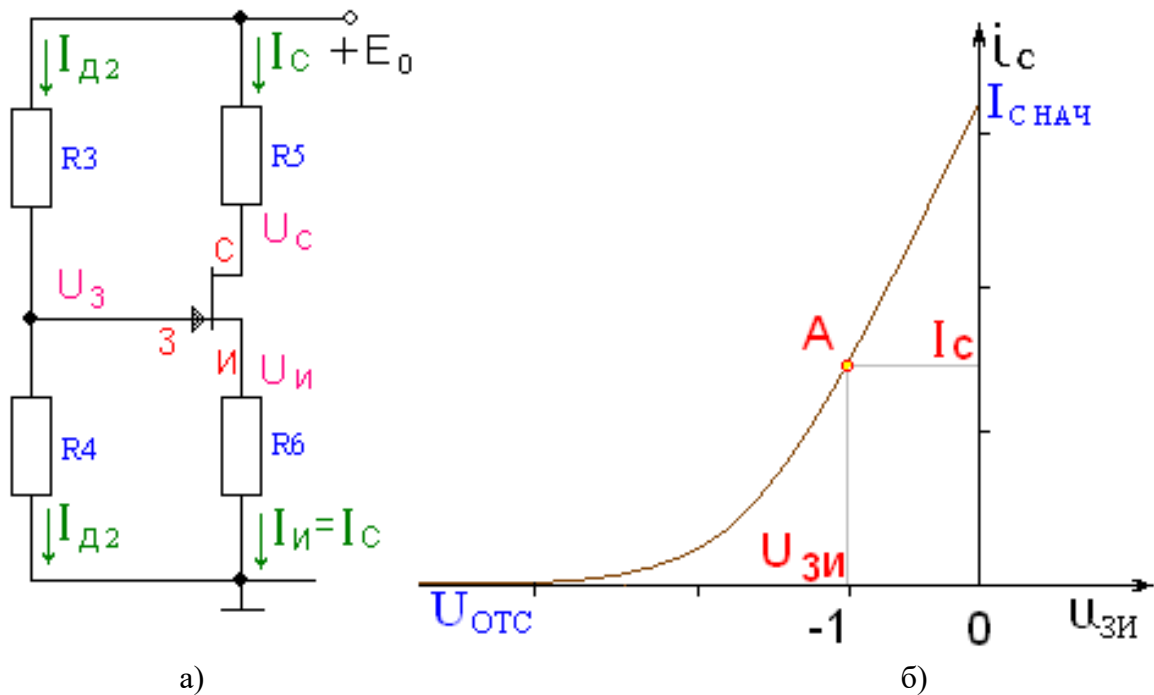


Рис. 4. Принципиальная схема по постоянному току каскада  $V_2$  (а) и типовая вольт-амперная характеристика полевого транзистора с  $n$ -каналом (б)

Необходимо для заданного типа полевого транзистора вычертить свою вольт-амперную характеристику, используя известные соотношения:

$$I_c = I_{c \text{ нач}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}}\right)^2; \quad (4)$$

Для расчёта резисторов  $R_3 \dots R_6$  сначала необходимо рассчитать точку покоя полевого транзистора  $V_2$  исходя из его параметров: начального тока стока  $I_{c \text{ нач}}$ , максимальной крутизны  $S_{\text{max}}$  и напряжения отсечки  $U_{отс}$ .

Выбираем напряжение затвор–исток  $U_{зи} = -1$  В. Затем определяем ток покоя стока  $I_c$  и крутизну  $S$ :

$$S = S_{\text{max}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}}\right). \quad (5)$$

Как правило, выбирают напряжение на истоке

$$U_{и} = 0,2 \cdot E_0, \quad (6)$$

а напряжение сток-исток

$$U_{си} = \frac{E_0}{2}. \quad (7)$$

Тогда напряжение на стоке равно

$$U_C = U_{\text{И}} + U_{\text{СИ}}. \quad (8)$$

Отсюда сопротивления резисторов в цепи истока и стока

$$R_5 = \frac{E_0 - U_C}{I_C}, \quad (9)$$

$$R_6 = \frac{U_{\text{И}}}{I_C}. \quad (10)$$

Напряжение на затворе

$$U_3 = U_{\text{И}} + U_{\text{ЗИ}}. \quad (11)$$

Рассчитаем сопротивление резистора  $R_4$ , 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  $R_4$  и суммарной ёмкостью

$$C = C_{\text{д}} + C_{\text{ВХ}} + C_{\text{м}}. \quad (12)$$

где

$$C_{\text{ВХ}} \approx C_{\text{ЗИ}} + C_{\text{ЗС}} \cdot (S \cdot R_5 + 1), \quad (13)$$

$C_{\text{д}}$  – проходная ёмкость диода;

$C_{\text{ВХ}}$  – входная ёмкость транзистора  $V_2$ ;

$C_{\text{м}} = 1$  пФ – ёмкость монтажа,

можно заключить, что необходимо выбрать

$$R_4 \leq \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_{\text{В}} \sqrt{2}}. \quad (14)$$

После этого определяем ток делителя

$$I_{\text{Д2}} = \frac{U_3}{R_4} \quad (15)$$

и сопротивление резистора

$$R_3 = \frac{E_0 - U_3}{I_{\text{Д2}}}. \quad (16)$$

$$I_C = 10^{-2} \cdot \left(1 - \frac{(-1)}{(-2,5)}\right)^2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 3,6 \text{ мА}.$$

$$S = 15 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{(-1)}{(-2,5)}\right) = 9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{А}}{\text{В}} = 9 \frac{\text{мА}}{\text{В}};$$

$$U_{\text{И}} = 0,2 \cdot 10 = 2 \text{ В};$$

$$U_{\text{СИ}} = \frac{10}{2} = 5 \text{ В};$$

$$U_C = 2 + 5 = 7 \text{ В};$$

$$R_5 = \frac{10^{-7}}{3,6 \cdot 10^{-3}} = 833 \text{ Ом};$$

$$R_6 = \frac{2}{3,6 \cdot 10^{-3}} = 556 \text{ Ом};$$

$$U_3 = 2 + (-1) = 1 \text{ В};$$

$$C_{\text{BX}} \approx 5 \cdot 10^{-12} + 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot (9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,556 \cdot 10^3 + 1) = 17,75 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 17,75 \text{ пФ};$$

$$C = 10^{-12} + 17,75 \cdot 10^{-12} + 10^{-12} = 14,83 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 19,75 \text{ пФ};$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 19,75 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^6} = 4,029 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 4,029 \text{ кОм};$$

$$I_{\text{Д2}} = \frac{1}{4,029 \cdot 10^3} = 2,482 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 24,82 \text{ мА};$$

$$R_3 = \frac{10^{-1}}{2,482 \cdot 10^{-4}} = 3,626 \cdot 10^4 = 36,26 \text{ кОм}.$$

Результат с учётом нормировки:

$$R_3 = 36 \text{ кОм} \pm 5\%,$$

$$R_4 = 3,9 \text{ кОм} \pm 5\%,$$

$$R_5 = 820 \text{ Ом} \pm 5\%,$$

$$R_6 = 560 \text{ Ом} \pm 5\%.$$

График вольт-амперной характеристики для заданного полевого транзистора представлен на рис. 5.

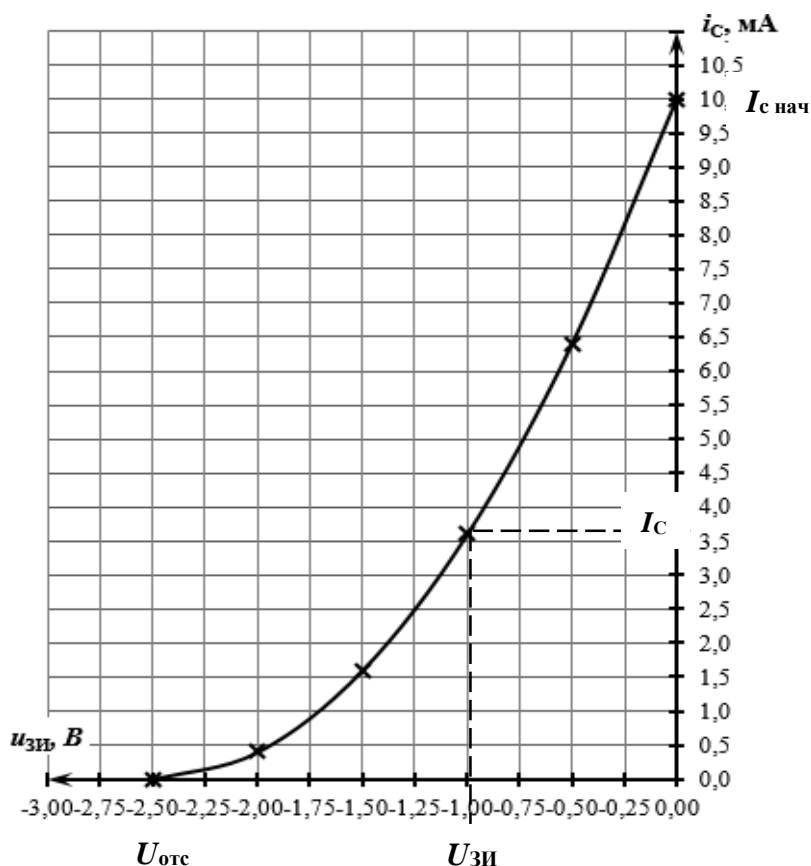


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика полевого транзистора

#### 4.1.3 Расчёт по постоянному току каскадов на биполярных транзисторах $V_3$ , $V_4$

Характеристики транзистора КТ339А:

- транзистор биполярный кремниевый;
- $U_{бэ} = 0,7$  В;
- коэффициент усиления по току минимальный  $h_{21\min} = 25$ ;
- коэффициент усиления по току максимальный  $h_{21\max} = 100$ ;
- частота единичного усиления  $f_T = 300$  МГц;
- максимальный постоянный ток коллектора  $I_{K\max} = 25$  мА;
- максимальное напряжение коллектор-эмиттер  $u_{КЭ\max} = 25$  В;
- постоянная времени цепи обратной связи  $\tau_K = 25$  пс;

- ёмкость коллекторного перехода  $C_K = 2$  пФ;

- допустимая мощность рассеиваемая на коллекторе  $P_K \text{ доп} = 260$  мВт.

Для расчета сопротивлений резисторов  $R_7...R_{11}$  необходимо выбрать режимы работы транзисторов  $V_3$  и  $V_4$  (рис. 6).

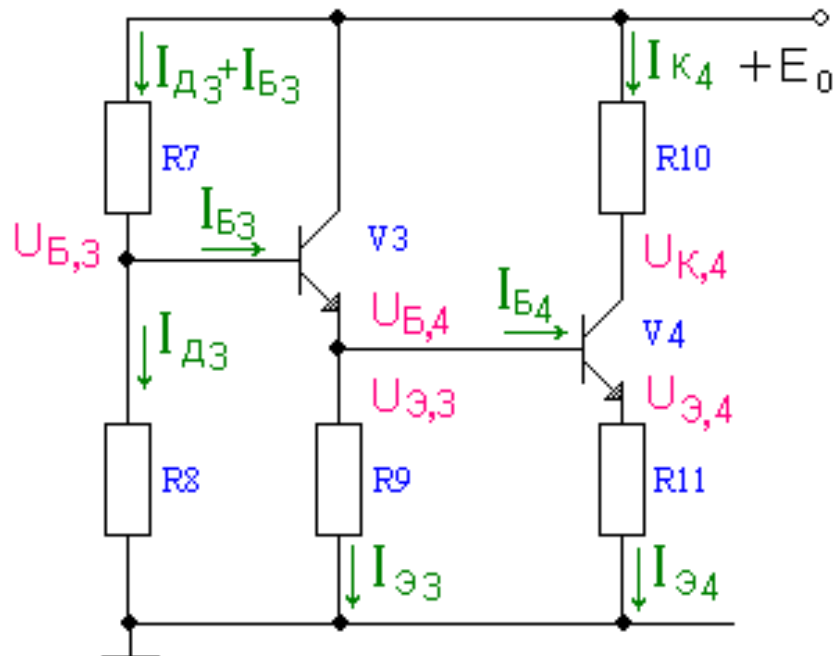


Рис. 6. Принципиальная схема каскадов на биполярных транзисторах по постоянному току

Выбираем ток покоя транзистора  $V_4$ :  $I_{K,4} \leq 8$  мА. Учитывая, что переменный коллекторный ток транзистора  $V_3$  меньше, чем переменный ток коллектора  $V_4$ , можно выбрать постоянный коллекторный ток  $I_{K,3} \leq I_{K,4}$ . Установив напряжение коллектор-эмиттер  $V_4$

$$U_{KЭ,4} = \frac{E_0}{2} \quad (17)$$

и напряжение на эмиттере  $V_4$

$$U_{Э,4} = 0,1 \cdot E_0, \quad (18)$$

можно определить напряжение

$$U_{Б,4} = U_{Э,3} = U_{Э,4} + U_{БЭ}, \quad (19)$$

где  $U_{БЭ} = 0,7$  В для кремниевых транзисторов.

Напряжение на базе  $V_3$ :

$$U_{Б,3} = U_{Э,3} + U_{БЭ}. \quad (20)$$



Напряжение на коллекторе  $V_4$ :

$$U_{K,4} = U_{Э,4} + U_{КЭ,4}. \quad (21)$$

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

$$R_9 = \frac{U_{Э,3}}{I_{Э,3}}, \quad (22)$$

$$R_{10} = \frac{E_0 - U_{K,4}}{I_{K,4}}, \quad (23)$$

$$R_{11} = \frac{U_{Э,4}}{I_{Э,4}}, \quad (24)$$

где

$$I_{Э,3} = I_{K,3} + I_{Б,3}, \quad (25)$$

$$I_{Э,4} = I_{K,4} + I_{Б,4}. \quad (26)$$

Для вычисления токов базы  $I_{Б3}$  и  $I_{Б4}$  и дальнейших расчётов коэффициенты передачи по току  $h_{21,3}$  и  $h_{21,4}$  определим с учётом их крайних значений.

$$h_{21} = \sqrt{h_{21 \min} \cdot h_{21 \max}}. \quad (27)$$

Тогда

$$I_{Б,3} = \frac{I_{K,3}}{h_{21}}, \quad (28)$$

$$I_{Б,4} = \frac{I_{K,4}}{h_{21}}, \quad (29)$$

$$I_{Э,3} = I_{K,3} \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21}}\right), \quad (30)$$

$$I_{Э,4} = I_{K,4} \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21}}\right). \quad (31)$$

В ряде случаев при больших  $h_{21}$  принимают:

$$I_{Э,3} \approx I_{K,3}, \quad (32)$$

$$I_{Э,4} \approx I_{K,4}. \quad (33)$$

Для вычисления сопротивлений резисторов  $R_7$  и  $R_8$  нужно знать ток делителя  $I_{Д,3}$ .

Обычно его выбирают  $I_{Д,3} \geq 10I_{Б,3}$ .

Сопротивления резисторов

$$R_7 = \frac{E_0 - U_{B,3}}{I_{D,3} + I_{B,3}}, \quad (34)$$

$$R_8 = \frac{U_{B,3}}{I_{D,3}}. \quad (35)$$

$$I_{K,4} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 8 \text{ mA};$$

$$I_{K,3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6 \text{ mA};$$

$$I_{\exists,3} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{1}{50}\right) = 6,12 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6,12 \text{ mA};$$

$$I_{\exists,4} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{1}{50}\right) = 8,16 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 8,16 \text{ mA};$$

$$U_{K\exists,4} = \frac{10}{2} = 5 \text{ В};$$

$$U_{\exists,4} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ В};$$

$$U_{B,4} = U_{\exists,3} = 1 + 0,7 = 1,7 \text{ В};$$

$$U_{B,3} = 1,7 + 0,7 = 2,4 \text{ В};$$

$$U_{K,4} = 1 + 5 = 6 \text{ В};$$

$$R_9 = \frac{1,7}{6,12 \cdot 10^{-3}} = 277,778 \text{ Ом};$$

$$R_{10} = \frac{10-6}{8 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом};$$

$$R_{11} = \frac{1}{8,16 \cdot 10^{-3}} = 122,549 \text{ Ом};$$

$$h_{21} = \sqrt{25 \cdot 100} = 50;$$

$$I_{B,3} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{50} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 0,12 \text{ mA};$$

$$I_{B,4} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{50} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 0,16 \text{ mA};$$

$$I_{D,3} = 10 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1,2 \text{ mA};$$

$$R_7 = \frac{10-2,4}{1,2 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-4}} = 5,758 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 5,758 \text{ кОм};$$

$$R_8 = \frac{1,7}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 2 \text{ кОм}.$$

Результат с учётом нормировки:

$$R_7 = 5,6 \text{ кОм} \pm 5\%;$$

$$R_8 = 2,0 \text{ кОм} \pm 5\%;$$

$$R_9 = 270 \text{ Ом} \pm 5\%;$$

$$R_{10} = 510 \text{ Ом} \pm 5\%;$$

$$R_{11} = 120 \text{ Ом} \pm 5\%.$$

#### 4.1.4 Расчёт по постоянному току в схеме на ОУ

Этот расчёт 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  $V_4$ . Вследствие этого рекомендуется выбирать  $R_{12} = R_{13} = 5 \cdot R_{10}$ .

$$R_{12} = R_{13} = 5 \cdot 500 = 2500 \text{ Ом} = 2,5 \text{ кОм}.$$

Результат учётом нормировки:  $R_{12} = R_{13} = 2,4 \text{ кОм} \pm 5\%$ .

#### 4.2 Проверка расчёта по постоянному току с помощью компьютера

Правильность расчётов сопротивлений после их выбора по номинальному ряду удобно проверить с помощью компьютера. Для этого принципиальную схему каскадов на транзисторах  $V_3$  и  $V_4$  (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.

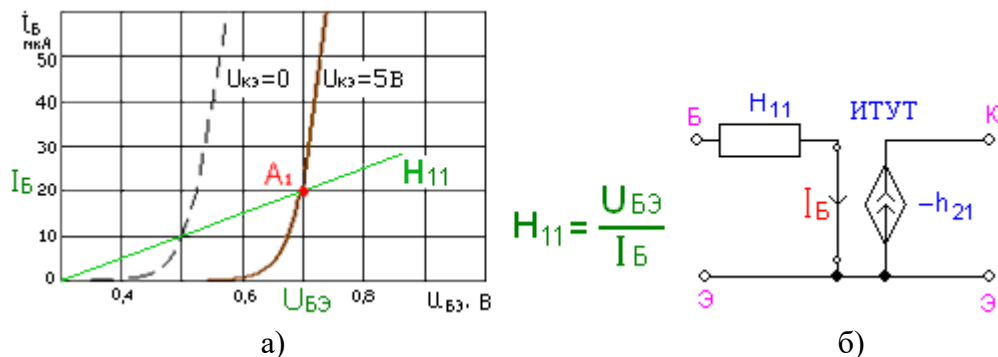


Рис. 7. Определение входного сопротивления (а) и эквивалентная схема биполярного транзистора (б) по постоянному току

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

Составим эквивалентную схему усилителя на биполярных транзисторах (рис. 8) и с помощью программы *Fastmean* произведём расчёт.

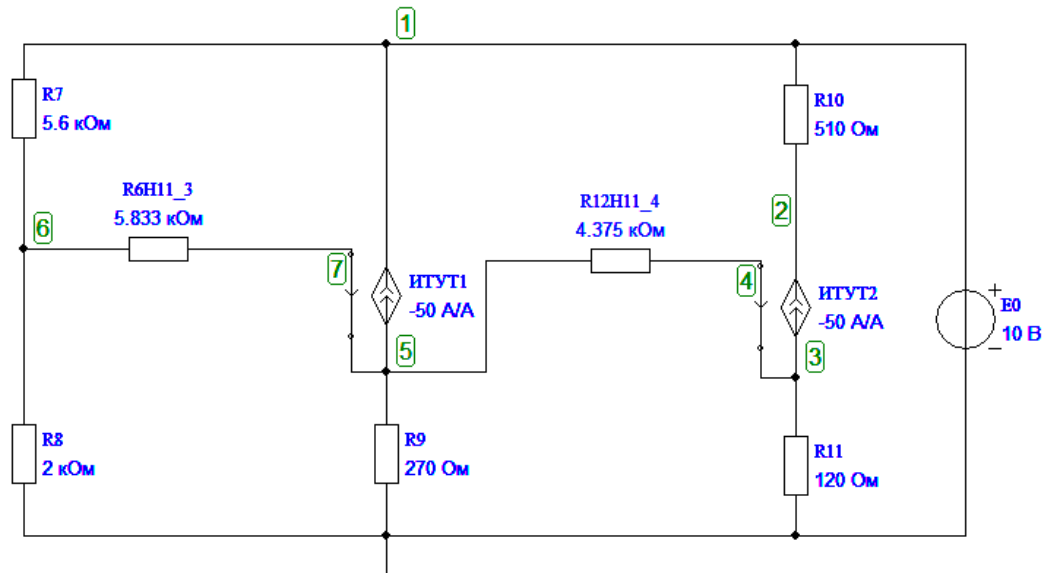


Рис. 8. Эквивалентная схема усилительного каскада на  $V_3$ ,  $V_4$  по постоянному току

При расчёте 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  $V_3$  и  $V_4$  ( $H_{11,3}$  и  $H_{11,4}$ ) по постоянному току (рис. 7, а). Их величины:

$$R_6 = H_{11,3} = \frac{U_{БЭ}}{I_{Б,3}}, \quad (36)$$

$$R_{12} = H_{11,4} = \frac{U_{БЭ}}{I_{Б,4}}, \quad (37)$$

где  $U_{БЭ} = 0,7$  В.

$$R_6 = \frac{0,7}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 5,833 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 5,833 \text{ кОм},$$

$$R_{12} = \frac{0,7}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 4,375 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 4,375 \text{ кОм}.$$

С помощью команды «Анализ по постоянному току» в схеме рис. 8 вычислим токи в резисторах и напряжения в узлах. В табл. 2 вносим все результаты без учёта знака.

Таблица 2

Параметр	$V_3$				$V_4$		
Токи и напряжения	$U_{B3}$ , В	$U_{Э3}$ , В	$I_{Д3}$ , мА	$I_{Э3}$ , мА	$U_{Э4}$ , В	$U_{К4}$ , В	$I_{К4}$ , мА
Расчет предварительный	2,400	1,700	1,200	6,120	1,000	6,000	8,000
Компьютерный	2,445	1,704	1,222	6,311	0,994	5,860	8,119
Погрешность, %	2,25	0,02	1,83	3,12	0,60	2,33	1,49

Результаты совпадают с точностью  $\leq 10\%$ , значит расчёт всех элементов схемы по постоянному току сделан правильно.

## 5 РАСЧЁТ ПО СИГНАЛУ

### 5.1 Расчёт по сигналу полевого транзистора $V_2$ и биполярных транзисторов $V_3$ и $V_4$

Расчёт по сигналу также проведём 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 соединёнными с общим проводом. Коллектор транзистора  $V_3$  также соединяется с общим проводом. Далее нужно элементы схемы  $V_1...V_4$  и  $AD_1$  заменить их эквивалентными моделями на переменном токе.

Источником сигнала является фототок  $I_{m1}$  диода  $V_1$ . Сопротивление фотодиода на переменном токе определяется касательной к вольт-амперной характеристике в точке А. Вследствие того что приращение напряжения измеряется в вольтах, а приращение тока — в долях микроампера, сопротивление фотодиода переменному току

$$r_d = \frac{\Delta u}{\Delta I} \quad (38)$$

оказывается значительно больше, чем сопротивление постоянному току  $R_d$ , и  $r_d$  достигает 80...100 МОм. Это даёт право рассматривать источник сигнала как генератор тока. Чрезвычайно большое сопротивление  $r_d$  нет необходимости учитывать в эквивалентной схеме, остаётся учесть лишь ёмкость фотодиода  $C_d = 1$  пФ (рис. 9, а). В полной схеме  $C_d$  обозначена как  $C_9 = 1$  пФ. На рис. 9, б изображена эквивалентная схема фотодиода по переменному току с учётом его цепей питания.

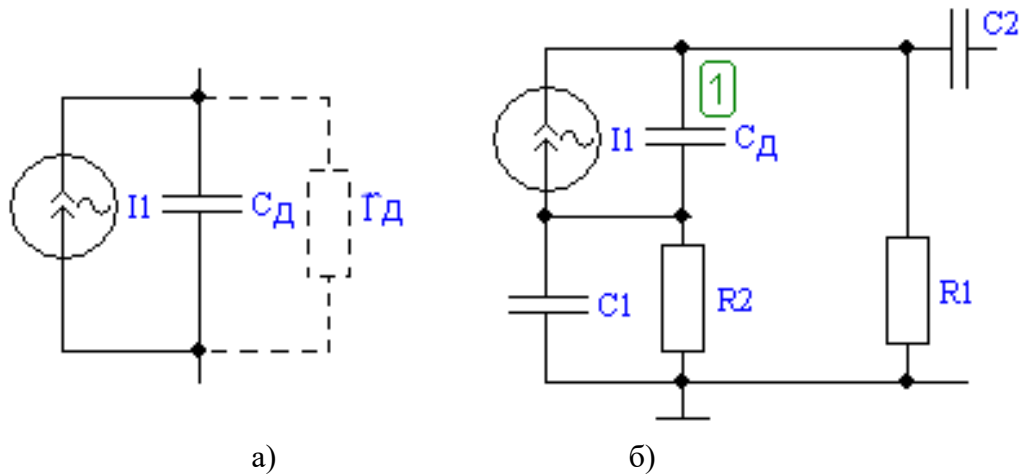


Рис. 9. Модель фотодиода на переменном токе (а) и эквивалентная схема входной цепи (б)

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.

$$i_c = -S u_{зи}. \quad (39)$$

В данной модели  $C_{зи}$  – ёмкость затвор–исток транзистора, пФ,  
 $C_{зс}$  – проходная ёмкость, ёмкость перехода затвор–сток, пФ,  
 $S$  – крутизна в точке покоя, мА/В.

Сопротивление перехода затвор–исток  $r_{зи}$  очень велико.

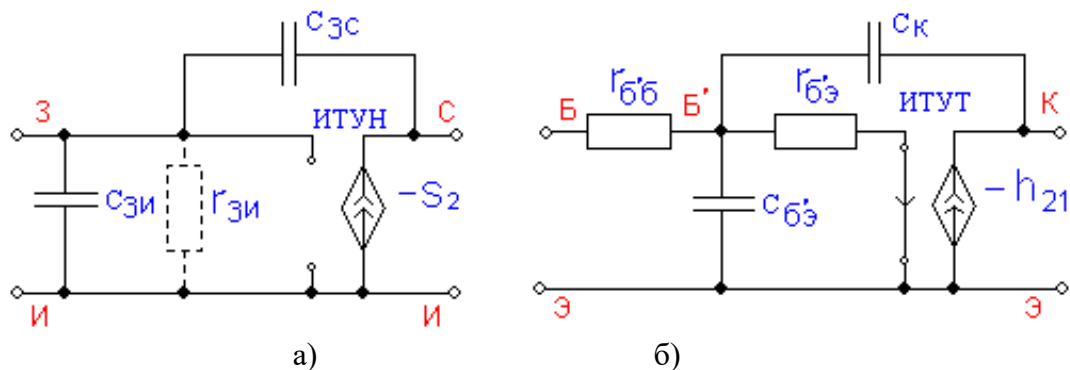


Рис. 10. Эквивалентная модель транзисторов по сигналу: а) полевого –  $V_2$  (ИТУН);  
 б) биполярного –  $V_3$  и  $V_4$  (ИТУТ)

Биполярные транзисторы  $V_3$  и  $V_4$  заменяем каждый активным четырехполюсником типа ИТУТ. Здесь выходной ток  $i_k$  управляется током базы  $i_k$ , т. е.

$$i_k = -h_{21} i_b. \quad (40)$$

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

$$r_{б'б} = \frac{\tau_k}{C_k}, \quad (41)$$

где  $C_k$  – ёмкость коллекторного перехода, пФ, приводится в справочниках.

Сопротивление перехода база–эмиттер  $r_{б'э}$ , Ом, вычисляется так:

$$r_{б'э} = (1 + h_{21}) \frac{25 \text{ мВ}}{I_k}, \quad (42)$$

где  $h_{21}$  – коэффициент усиления по току транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

Ёмкость перехода база–эмиттер  $C_{б'э}$ , пФ, вычисляется по выражению

$$C_{б'э} = \frac{h_{21}}{2\pi f_T r_{б'э}}, \quad (43)$$

где  $f_T$  – частота единичного усиления из справочника.

Согласно эквивалентной модели биполярного транзистора (рис. 10, б) для расчёта резисторов  $R_{16}$ ,  $R_{18}$  (полная эквивалентная схема рис. 13) следует использовать формулу (41), для  $R_{17}$ ,  $R_{19}$  выражение (42), а для ёмкостей  $C_{12}$  и  $C_{14}$  необходимо подставить соответствующие значения в (43).

$$R_{16} = R_{18} = r_{б'б} = \frac{25 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-12}} = 12,5 \text{ Ом};$$

$$R_{17} = r_{б'э_3} = (1 + 50) \frac{25 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 212,5 \text{ Ом};$$

$$R_{19} = r_{б'э_4} = (1 + 50) \frac{25 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3}} = 159,375 \text{ Ом};$$

$$C_{12} = C_{б'э_3} = \frac{50}{2\pi \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot 212,5} = 149,8 \cdot 10^{-12} = 149,8 \text{ пФ};$$

$$C_{14} = C_{б'э_4} = \frac{50}{2\pi \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot 159,375} = 199,7 \cdot 10^{-12} = 199,7 \text{ пФ};$$

Результат с учётом нормировки:

$$R_{16} = R_{18} = 12 \text{ Ом} \pm 5\%;$$

$$R_{17} = 220 \text{ Ом} \pm 5\%;$$

$$R_{19} = 160 \text{ Ом} \pm 5\%.$$



## 5.2 Расчёт по сигналу ОУ

Модель, удобная для учебного процесса, показана на рис. 11. Она содержит два операционных усилителя ОУ<sub>1</sub> и ОУ<sub>2</sub>. 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 даёт более простую модель, чем использование ИТУТ, отображающего реально действующие в ОУ биполярные транзисторы.

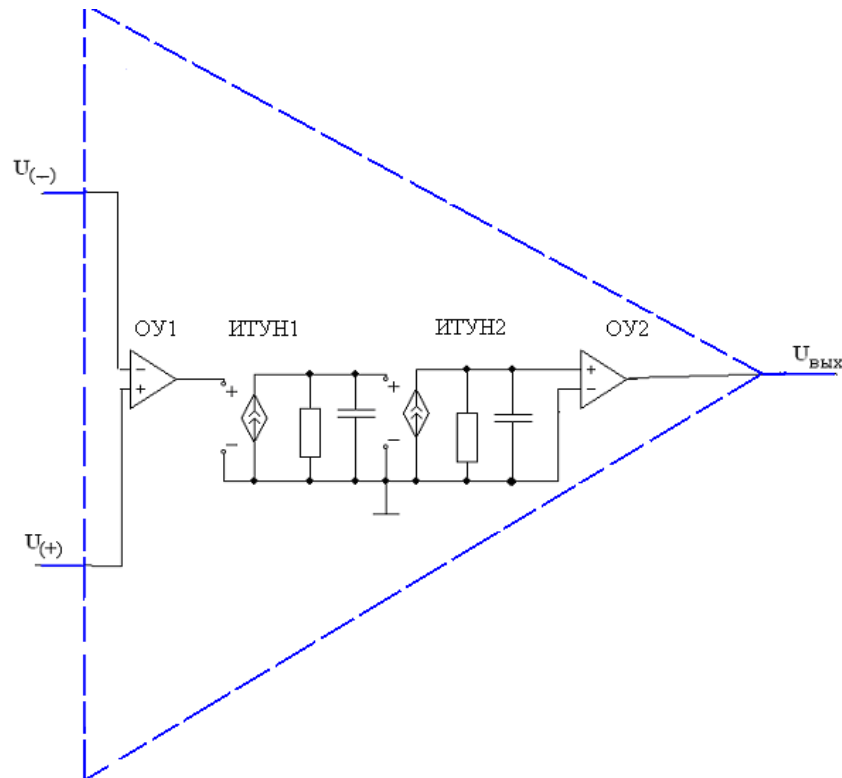


Рис. 1. Макромодель ОУ с двухполосной частотной коррекцией

Здесь можно выделить четыре узла.

Первый узел (ОУ1) задаёт собственный коэффициент усиления, моделируемого ОУ ( $K_1 = 80$  дБ)

$$k = 10^{\frac{K_1}{20}}; \quad (44)$$

где  $k$  – коэффициент усиления в размах.

Второй узел (ИТУН1) отражает полюс функции передачи, создаваемый дифференциальным каскадом. Крутизна  $S_1 = -1\text{мСм}$  и  $R_{20} = 1\text{ кОм}$  (данные обозначения будут использоваться в полной схеме усилителя (рис. 13) дают коэффициент усиления этого узла

$$K_2 = S_1 R_{20} = -1, \quad (45)$$

частоту полюса определяет постоянная времени

$$\tau_1 = R_{20} C_{16}, \quad (46)$$

из условия

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\tau_1}. \quad (47)$$

Полагая, что в этом узле формируется первый полюс АЧХ с частотной коррекцией

$$f_{p1} = \frac{f_1}{k}, \quad (48)$$

$f_1$  – частота единичного усиления. Тогда получим

$$C_{16} = \frac{1}{2\pi R_{20} f_{p1}}. \quad (49)$$

Узел третий (ИТУН2) выполняет аналогичную функцию ( $S_2 = -1\text{ мСм}$ ,  $R_{21} = 1\text{ кОм}$ ). В этом узле формируется полюс  $f_{p2}$ . Для частоты второго полюса  $f_{p2} = f_1$  получаем ёмкость

$$C_{17} = \frac{1}{2\pi R_{21} f_{p2}}. \quad (50)$$

Знак минус перед крутизной в обоих случаях отражает поворот фазы в ДК и каскаде усиления напряжения (ОЭ).

Четвёртый узел (ОУ<sub>2</sub>) моделирует оконечный каскад, построенный по схеме с общим коллектором, он характеризуется коэффициентом усиления  $K = 1$  и не поворачивает фазу сигнала, поэтому инвертирующий вход заземлён.

Резистор  $R$  принимаем равным  $R_{2н}$  (сопротивление внешней нагрузки),  $R_{22} = 3\text{ кОм}$ .

$$k = 10^{\frac{80}{20}} = 10^4;$$

$$f_{p1} = \frac{250 \cdot 10^6}{10^4} = 25 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 25 \text{ кГц};$$

$$C_{16} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^3} = 6,366 \cdot 10^{-9} = 6,366 \text{ нФ};$$

$$\tau_1 = 10^3 \cdot 6,366 \cdot 10^{-9} = 6,366 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 6,366 \text{ мкс};$$

$$f_{p2} = 250 \cdot 10^6 \text{ Гц};$$

$$C_{16} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 250 \cdot 10^6} = 6,366 \cdot 10^{-13} = 636,6 \text{ фФ}.$$

Результат с учётом нормировки:

$$R_{20} = R_{21} = 1 \text{ кОм} \pm 5\%;$$

$$R_{22} = 3,3 \text{ кОм} \pm 5\%.$$

### 5.3 Расчёт резисторов $R_{14}$ , $R_{15}$

К этому моменту остаются неизвестными значения резисторов  $R_{14}$  и  $R_{15}$ , поскольку не определён коэффициент усиления каскада на ОУ  $K_F = U_{21}/U_{13}$ . Напряжение  $U_{21} = U_{2н}$ . 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,  $f$

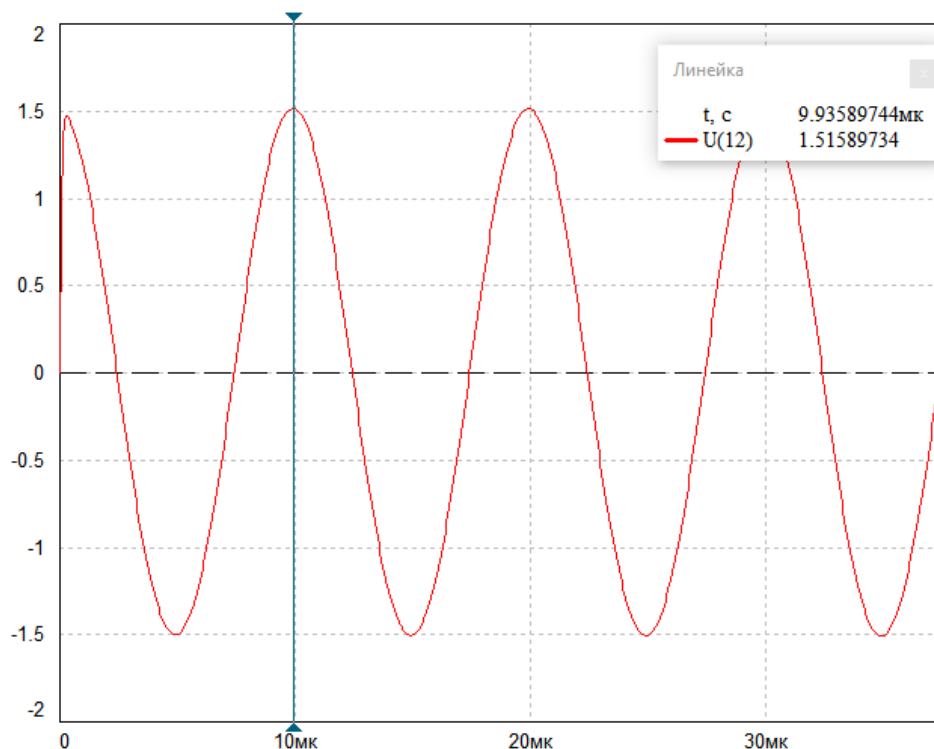


Рис. 12. Определение амплитуды сигнала  $U_{13m}$

=150 кГц. Следует помнить, что в этом случае компьютер покажет амплитуду сигнала  $U_{13m}$  (рис. 12).

По графику определяем амплитуду  $U_{13m} = 1,516$  В.

Тогда искомый коэффициент усиления будет

$$K_F = 1,41 \frac{U_{2н}}{U_{13m}}. \quad (51)$$

Для реализации этого усиления воспользуемся зависимостью коэффициента усиления в не инвертирующем включении ОУ:

$$K_F = 1 + \frac{R_{15}}{R_{14}}. \quad (52)$$

Рекомендуется предварительно выбирать

$$R_{15} = (R_{12} || R_{13}) = \frac{R_{12}R_{13}}{R_{12}+R_{13}}. \quad (53)$$

В таком случае по формуле (49) можно вычислить  $R_{14}$ :

$$R_{14} = \frac{R_{15}}{K_F - 1}. \quad (54)$$

$$K_F = 1,41 \cdot \frac{2,2}{1,516} = 2,046;$$

$$R_{15} = \frac{2,5 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 10^3 + 2,5 \cdot 10^3} = 1,25 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 1,25 \text{ кОм};$$

$$R_{14} = \frac{1,25 \cdot 10^3}{2,046 - 1} = 1,195 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 1,195 \text{ кОм}.$$

Результат с учётом нормировки:

$$R_{14} = 1,2 \text{ кОм} \pm 5\%;$$

$$R_{15} = 1,2 \text{ кОм} \pm 5\%.$$

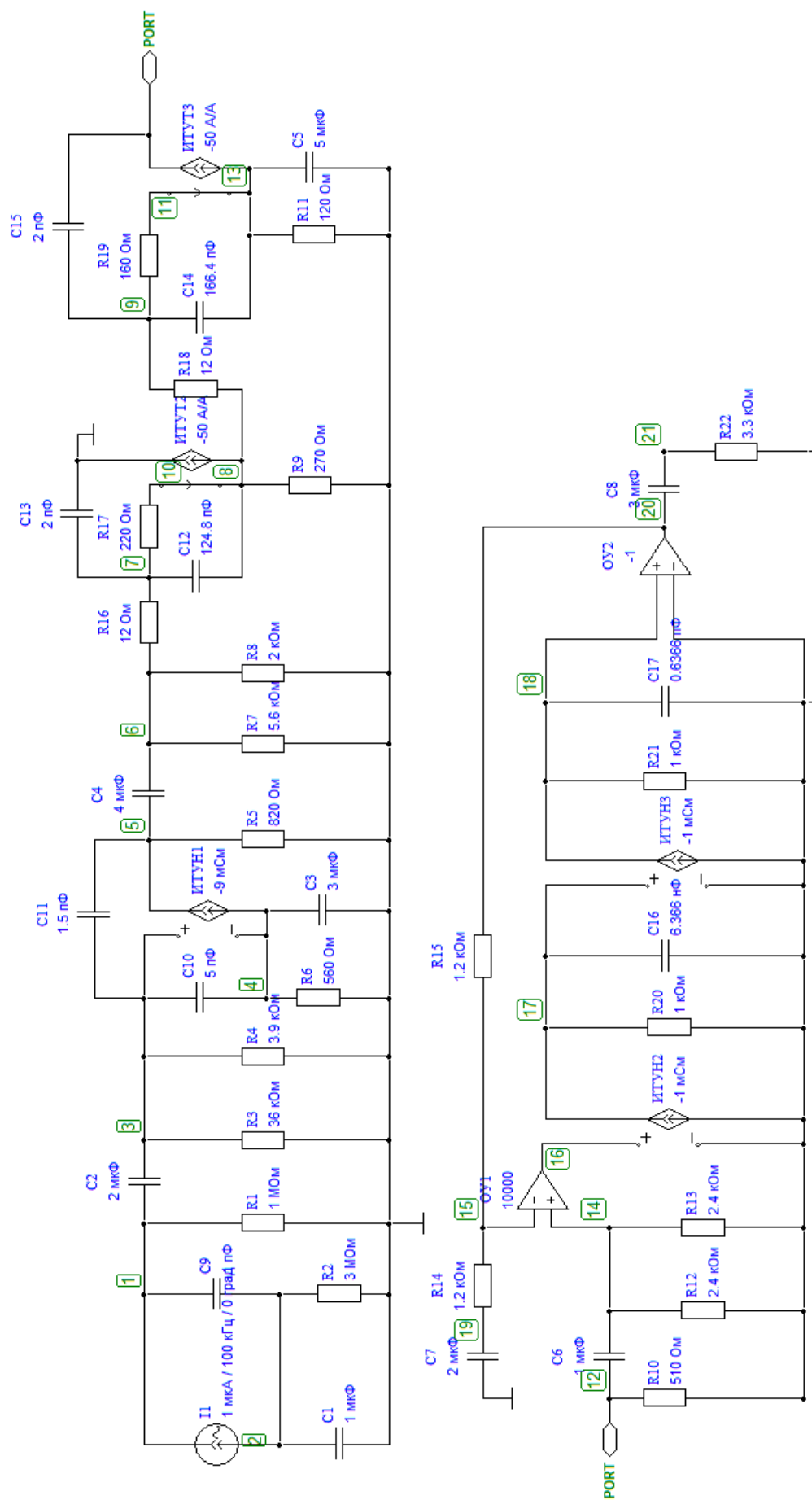


Рис. 2. Полная эквивалентная схема усилителя

## 5.4 Определение частотных свойств всего усилителя с помощью *Fastmean*

Теперь можно определить частотные свойства всего усилителя с помощью *Fastmean*. Придав элементам схемы Рис. 2 соответствующие значения, можно определить зависимость сопротивления передачи от частоты:

$$R(f) = \frac{U_{\text{вых}}}{I_1} \quad (55)$$

Для этого в диалоговом окне набираем  $U(21)/I(I_1)$ . 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.

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  $0,7R_0 = 0,7 * 4,368$  Ом, где  $R_0 = 4,368$  Ом – сопротивление передачи на средней частоте (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Условия с оответствия усилителя требованиям технического задания:

$$\begin{aligned} f_{\text{н}\sqrt{2}} &\leq f_{\text{н}\sqrt{2}\text{т.з.}} \\ f_{\text{в}\sqrt{2}} &\geq f_{\text{н}\sqrt{2}\text{т.з.}} \end{aligned} \quad (56)$$

Здесь индекс «т.з» обозначает «техническое задание».

По построенной в программе частотной характеристике определим  $f_{\text{н}\sqrt{2}}$  и  $f_{\text{в}\sqrt{2}}$  (рис. 14):

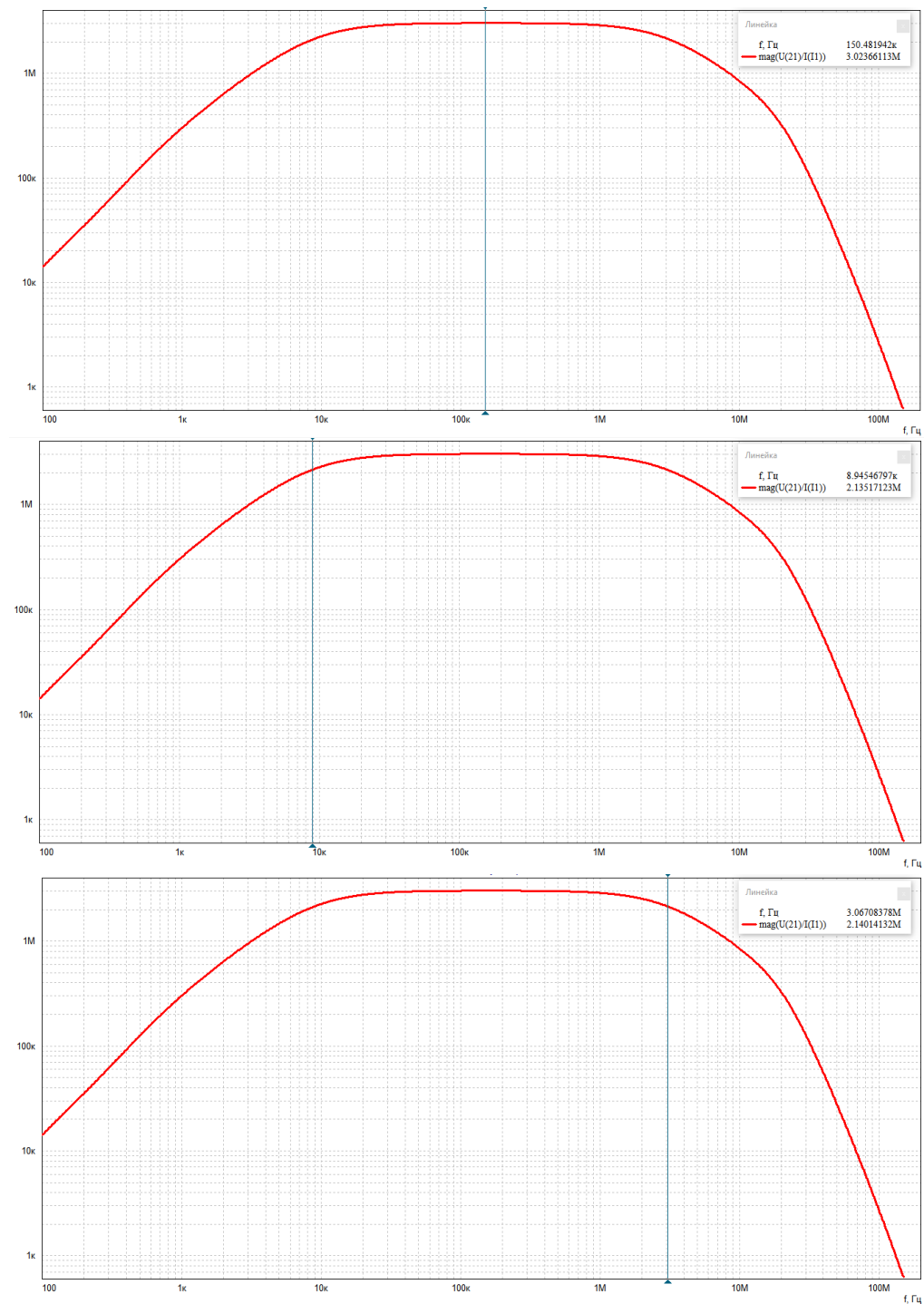


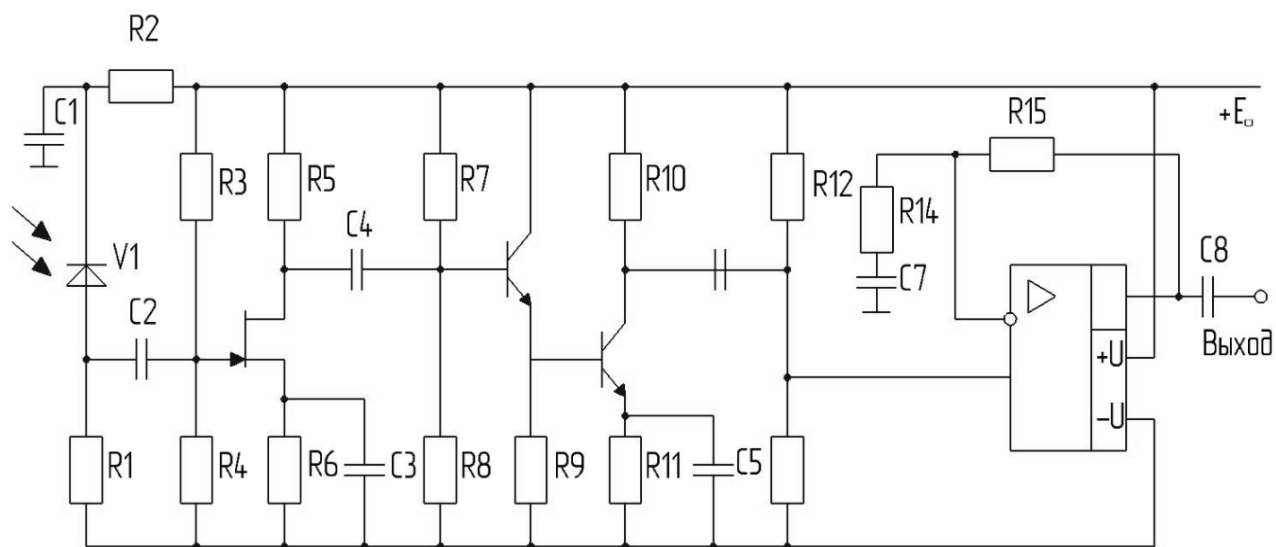
Рис. 14. Процесс определения граничных частот усилителя

$$f_{H\sqrt{2}} = 8946 \text{ Гц} < f_{H\sqrt{2}\text{Т.З.}} = 20\,000 \text{ Гц},$$

$$f_{B\sqrt{2}} = 3,067 \cdot 10^6 \text{ Гц} > f_{B\sqrt{2}\text{Т.З.}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Условия соответствия усилителя требованиям технического задания выполняются.

Можно сделать вывод, что расчёт усилителя произведен верно.



Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата											



Обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
C1, C6	Конденсатор 1 мкФ	2	
C2, C7	Конденсатор 2 мкФ	2	
C3, C8	Конденсатор 3 мкФ	2	
C4	Конденсатор 4 мкФ	1	
C5	Конденсатор 5 мкФ	1	
V1	Фотодиод	1	
V2	Транзистор КП307Б	1	
V3, V4	Транзистор КТ339А	2	
AD1	Операционный усилитель ОРА655	1	
R1	Резистор 1,0 МОм	1	
R2	Резистор 3,0 МОм	1	
R3	Резистор 36,0 кОм	1	
R4	Резистор 3,9 кОм	1	
R5	Резистор 820 Ом	1	
R6	Резистор 560 Ом	1	
R7	Резистор 5,6 кОм	1	
R8	Резистор 2,0 кОм	1	
R9	Резистор 270 Ом	1	
R10	Резистор 510 Ом	1	
R11	Резистор 120 Ом	1	
R12, R13	Резистор 2,4 кОм	2	
R14	Резистор 1,2 кОм	1	
R15	Резистор 1,2 кОм	1	
R16, R18	Резистор 12 Ом	2	
R17	Резистор 220 Ом	1	
R19	Резистор 160 Ом	1	
R20, R21	Резистор 1 кОм	2	
R22	Резистор 3,3 кОм	1	

					<p style="text-align: center;"><i>Перечень элементов</i></p>	Лист
						1
<i>Ли</i>	<i>Изм.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, А. Г. Схемотехника аналоговых электронных устройств: методические указания к курсовому проектированию / А. Г. Алексеев, П. В. Климова. – СПб.: Издательство СПбГУТ, 2012. – 20 с.
2. Алексеев, А. Г. К расчету резисторных каскадов. Методические указания по курсу «Основы схемотехники» / А. Г. Алексеев, П. В. Климова. – 2009. – 68 с.