

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

РАСЧЁТ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

Методические указания
к выполнению расчетно-графических работ

Омск
Издательство ОмГТУ
2012

Составитель *И. В. Хоменко*, канд. техн. наук, ст. преподаватель

Методические указания содержат варианты заданий расчётно-графических работ в виде электрических схем усилителей мощности низких частот и требуемых технических параметров. Приведён пример расчёта усилителя мощности.

Предназначены для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальностям 090104 «Комплексная защита объектов информатизации», 210402 «Средства связи с подвижными объектами», по направлению 210300.62 «Радиотехника», а также студентов очного и заочного обучения радиотехнических специальностей и направлений, изучающих дисциплины: «Основы схемотехники», «Аналоговые электронные устройства», «Усилительные устройства».

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение расчётно-графической работы студентом способствует закреплению теоретических знаний, получаемых по дисциплине «Основы схемотехники». Объектом исследования в расчётно-графических работах (РГР) выбраны полупроводниковые усилители низкой частоты, охватывающие звуковой диапазон частот. Усиление сигналов является одной из важнейших функций устройств, применяемых в радиотехнике, связи, автоматике и других областях техники.

Студенту необходимо научиться разбираться в базовых схемных конфигурациях, применяемых в усилительных устройствах, определять в схемах элементы и цепи обратной связи, анализировать их действие на характеристики и основные параметры усилителей, знать способы установки режимов работы транзисторов по постоянному току. Студент должен уметь проводить расчёт номиналов элементов в схеме, пользоваться стандартизованными рядами значений радиоэлементов, знать и применять формулы для расчёта коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений каскадов и усилителя в целом.

Для выполнения РГР в срок требуется ответственное отношение студента к самостоятельной работе с учебной и научно-технической литературой, специальными периодическими изданиями, к посещению консультаций и других видов занятий с преподавателем.

Задания даны в виде таблицы с вариантами технических параметров и рисунков электрических принципиальных схем усилителей.

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ, ОФОРМЛЕНИЮ И СРОКАМ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполнение РГР должно начинаться с анализа заданных технических параметров и схемы электрической принципиальной усилителя. Выделяются основные узлы, усилительные каскады устройства, описываются свойства, достоинства схемы. Начинать расчёт необходимо с выходного каскада. Далее на основе полученных данных выполняется расчёт промежуточных каскадов и входного каскада. Структура пояснительной записки (ПЗ) разделяется соответственно выделенным узлам и каскадам устройства. В последнем разделе рассчитываются параметры цепи общей отрицательной обратной связи, коэффициент усиления всего усилителя с разомкнутой обратной связью, входное сопротивление, сквозной коэффициент усиления, оценивается коэффициент гармоник. В ПЗ обязательно описываются действия, производимые при расчёте элементов схемы. Применяемые формулы записываются сначала в символьном виде, затем с подставленными числовыми значениями. Необходимо рассчитать и привести к стандартизованному ряду значения всех сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов электрической схемы устройства.

ПЗ должна быть написана деловым языком, мысли изложены точно и кратко, не следует выписывать из учебников и книг общеизвестные положения, определения, переписывать стандарты, заводские нормы, необходимо использовать ссылки на источники информации, на уравнения, приложения. Вновь вводимые символы должны иметь пояснения. Для всех вычисленных величин должны быть приведены размерности в системе СИ. Требования к оформлению и построению ПЗ как к текстовому документу изложены в ГОСТ 2.105–95 ЕСКД. При оформлении можно руководствоваться указаниями, данными в пособии [4]. Там же изложены основные теоретические сведения о построении усилителей низкой частоты.

Студент должен приступить к выполнению РГР не позднее второй недели от начала семестра, работать в течение семестра и сдать готовую работу не позднее чем за две недели до начала сессии.

Для облегчения самостоятельной работы студента ниже приводится краткий пример расчёта усилителя мощности звуковой частоты с необходимыми пояснениями.

1. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

Исходные данные:

Сопротивление источника сигнала	$R_r = 47 \text{ кОм};$
Напряжение источника сигнала	$U_r = 0,707 \text{ В};$
Выходная мощность	$P_{\text{ВЫХ}} = 25 \text{ Вт};$
Сопротивление нагрузки	$R_H = 4 \text{ Ом};$
Диапазон усиливаемых частот	$\Delta f = 30 \dots 80 \text{ 000 Гц};$
Диапазон рабочих температур	$\Delta T = +10 \dots +50 \text{ }^\circ\text{C};$
Напряжение питания	$U_{\text{П}} = \pm 18 \text{ В}.$

Схема электрическая принципиальная усилителя мощности звуковых частот приведена на рисунке 1.1.

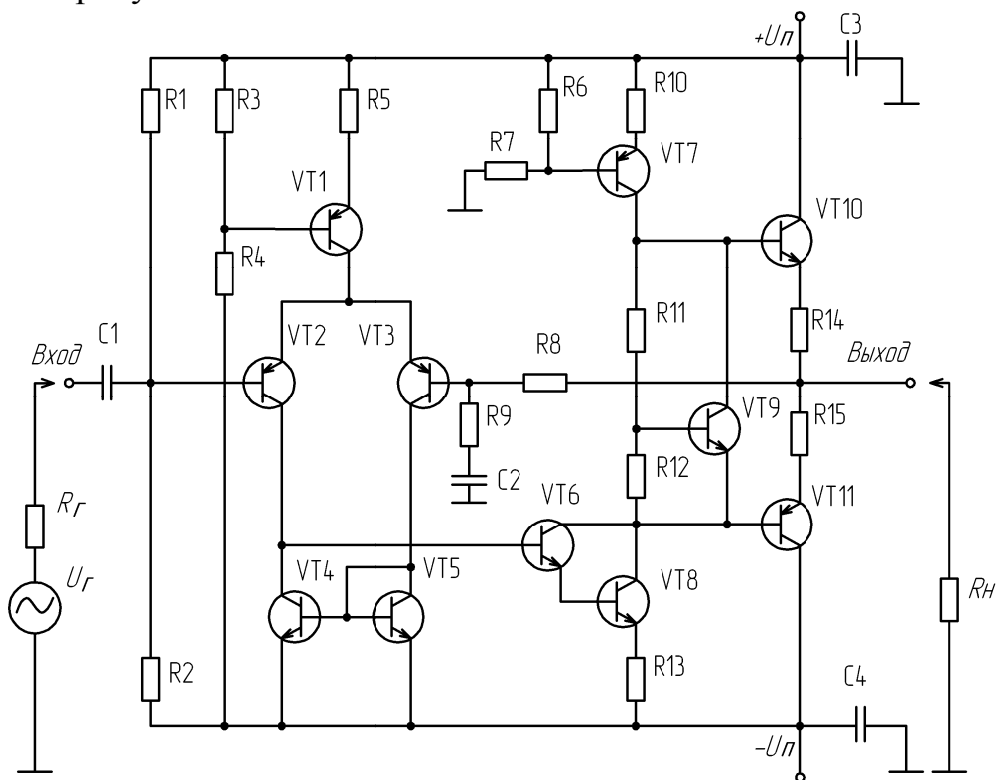


Рис. 1.1. Усилитель мощности звуковых частот.

Схема электрическая принципиальная

Усилитель состоит из трёх усилительных каскадов:

- входной дифференциальный усилительный каскад на транзисторах VT2, VT3 с динамической нагрузкой в виде токового зеркала на транзисторах VT4, VT5 и задающим эмиттерным источником тока на элементах VT1, R3, R4, R5;
- промежуточный каскад усиления на составном транзисторе VT6, VT8 по схеме с общим эмиттером с элементом местной обратной связи по току R13 и источником тока в коллекторной цепи VT7, R6, R7, R10;
- выходной двухтактный каскад на транзисторах разной проводимости VT10, VT11, включённых по схеме комплементарного эмиттерного повторите-

ля, с источником смещения на элементах VT9, R11, R12, позволяющим настроить режим работы выходного каскада с отсечкой в классе усиления АВ.

По описанию трёхкаскадной структуры и заданным техническим параметрам усилитель можно отнести к устройствам, применяемым в бытовой радиоэлектронной аппаратуре.

В состав усилителя входят также:

– входной резисторный делитель R1, R2, при помощи которого на выходе усилителя настраивается напряжение по постоянному току, составляющее половину питания (для двухполюсного симметричного питания постоянный потенциал на выходе усилителя должен быть равным или близким нулю вольт);

– входной конденсатор C1, разделяющий вход усилителя от источника сигнала по постоянному току;

– элементы цепи общей отрицательной обратной связи R8, R9, C2, параллельной по выходу, последовательной по входу;

– резисторы R14, R15, реализующие местную обратную связь по току для стабилизации тока покоя транзисторов выходного каскада при повышении их температуры;

– конденсаторы C3, C4, замыкающие путь протекания переменного тока через источники питания и сглаживающие пульсации напряжения, возникающие после выпрямления переменного тока в блоке питания.

Применение отрицательной обратной связи, параллельной по выходу, последовательной по входу, позволяет легко согласовать усилитель с высокоомным источником сигнала и низкоомной нагрузкой.

Расчёт начинают с определения параметров и значений элементов выходного каскада, выбора полупроводниковых приборов.

Определим напряжение и ток в нагрузке.

Эффективное значение напряжения в нагрузке

$$U_H = \sqrt{R_H \cdot P_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{4 \cdot 25} = 10 \text{ В.}$$

Амплитудное значение напряжения в нагрузке

$$U_{H_{\text{max}}} = U_H \cdot \sqrt{2} = 14,14 \text{ В.}$$

Эффективное значение тока в нагрузке

$$I_H = \frac{U_H}{R_H} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ А.}$$

Амплитудное значение тока в нагрузке

$$I_{H_{\text{max}}} = I_H \cdot \sqrt{2} = 3,54 \text{ А.}$$

Для определения значений элементов R14, R15, C3, C4 рассмотрим следующие выражения для минимально требуемого напряжения питания $U_{\text{Пmin}}$:

$$U_{\text{Пmin}} \geq U_{\text{Hmax}} + I_{\text{Hmax}} \cdot R14 + U_{\text{КЭнасVT10}} + U_{\text{Пульс}}, \quad (1.1)$$

$$U_{\text{Пmin}} \geq U_{\text{Hmax}} + I_{\text{Hmax}} \cdot R14 + U_{\text{БЭVT10}} + U_{\text{ИVT7}} + U_{\text{Пульс}}, \quad (1.2)$$

где $U_{\text{КЭнасVT10}}$ – напряжение насыщения транзистора VT10 при токе I_{Hmax} ;

$U_{\text{Пульс}}$ – амплитуда напряжения пульсаций в цепи питания;

$U_{\text{БЭ VT10}}$ – падение напряжения на базоэмиттерном переходе транзистора VT10;

$U_{\text{ИVT7}}$ – падение напряжения на источнике тока промежуточного каскада:

$$U_{\text{ИVT7min}} \approx 2 \cdot U_{\text{КЭнасVT7}} + I_{\text{ИVT7}} \cdot R10; \quad (1.3)$$

$U_{\text{КЭнас VT7}}$ – напряжение насыщения транзистора VT7 при токе $I_{\text{ИVT7}}$;

$I_{\text{ИVT7}}$ – ток источника тока промежуточного каскада, значение которого должно превышать значение максимального тока базы транзисторов выходного каскада:

$$I_{\text{ИVT7}} \approx (1,0 \dots 1,5) I_{\text{БVT10max}} = (1,0 \dots 1,5) \frac{I_{\text{Hmax}}}{h_{21ЭVT10} + 1}. \quad (1.4)$$

Выражение (1.2) более критично для данной схемы усилителя, чем выражение (1.1). Предельные значения напряжения, тока и мощности выбираемого транзистора должны превышать с некоторым запасом значения данных параметров, возникающих в схеме. Желательно, чтобы транзисторы разной проводимости в комплементарной схеме были близкими по предельным значениям указанных параметров и по коэффициенту передачи тока $h_{21Э}$. Электронная промышленность выпускает специальные серии комплементарных транзисторов, такие как КТ819, КТ818; КТ817, КТ816; КТ815, КТ814; КТ827, КТ825; КТ850, КТ851 и др. Для транзистора КТ819 напряжение насыщения составляет $U_{\text{КЭнас}} = 0,4$ В, коэффициент передачи по току $h_{21Э} = 34$, напряжение $U_{\text{БЭ}} = 1,1$ В при токе коллектора $I_{\text{Hmax}} = 3,54$ А [10]. Резистор R14 включён последовательно с нагрузкой и снижает отдаваемую ей мощность [9]. Рекомендуется выбирать такое значение сопротивлений, чтобы мощность, рассеиваемая на эмиттерных резисторах, в цепи выходного комплементарного эмиттерного повторителя не превышала 10 % от мощности, выделяемой в нагрузке. Этому условию соответствует значение сопротивления $R14 = R15 = 0,22$ Ом, при котором рассеиваемая мощность составляет $(I_{\text{H}})^2 \cdot R = 2,5^2 \cdot 0,22 = 1,375$ Вт. Такая мощность выделяется в двухтактном режиме с классом усиления А. Для классов В и АВ рассеиваемая мощность будет меньше (в два раза для класса В). Применим 2-ваттные резисторы, что даст запас по мощности. При выполнении РГР необходимо оцени-

вать рассеиваемую мощность всех резисторов самостоятельно. Ниже, в кратком примере расчёта, такая оценка отсутствует.

Максимальное напряжение, прикладываемое к транзистору в схеме выходного комплементарного повторителя, равно сумме амплитуды напряжения сигнала на нагрузке $U_{H\max}$ и напряжения питания U_{Π} :

$$U_{KЭm} = U_{\Pi} + U_{H\max} = 18 + 14,14 = 32,4 \text{ В}.$$

Транзисторы КТ819Б и КТ818Б имеют предельное максимальное значение напряжения между коллектором и эмиттером, равное $40 \text{ В} > 32,4 \text{ В}$; максимальный ток коллектора равен $10 \text{ А} > 3,54 \text{ А}$ для транзисторов в корпусе ТО-220 [10].

Мощность, потребляемая выходным каскадом от источника питания, при максимальном токе нагрузки равна:

$$P_{\text{ПОТР}} = 2 \cdot U_{\Pi} I_{H\text{cp}} = 2 \cdot U_{\Pi} \frac{I_{H\max}}{\pi} = 2 \cdot 18 \cdot \frac{3,54}{3,14} \approx 40,6 \text{ Вт},$$

где $I_{H\text{cp}}$ – средний ток коллектора.

Мощность, рассеиваемая на транзисторах, при гармоническом сигнале на входе и активной нагрузке равна:

$$P_{\text{РАСС}} = P_{\text{ПОТР}} - P_{\text{ВЫХ}} = 40,6 - 25 = 15,6 \text{ Вт}.$$

Мощность, рассеиваемая на одном транзисторе двухтактного комплементарного эмиттерного повторителя, в два раза меньше и составляет 7,8 Вт. Но максимальная мощность рассеивается на транзисторах не при полной амплитуде выходного сигнала [9, 12]. Максимальная мощность, рассеиваемая на каждом транзисторе [12]:

$$P_{\text{РАСС}} = \frac{U_{\Pi}^2}{\pi^2 R_H} + I_0 \left(0,3 U_{\Pi} + \frac{I_0 R_H}{\pi} \right),$$

где I_0 – ток покоя, протекающий через транзисторы VT10, VT11 при отсутствии входного сигнала. Для класса усиления АВ в бытовых усилителях звуковой частоты ток покоя задают обычно в интервале [1]:

$$I_0 \approx (0,01 \dots 0,15) \cdot I_{H\max} = (0,035 \dots 0,53) \text{ А}.$$

Примем ток покоя через выходные транзисторы VT10, VT11 равным 100 мА. Тогда максимальная мощность, рассеиваемая на транзисторе:

$$P_{\text{РАСС}} = \frac{18^2}{\pi^2 \cdot 4} + 0,1 \left(0,3 \cdot 18 + \frac{0,1 \cdot 4}{\pi} \right) = 8,76 \text{ Вт}.$$

Выбранные транзисторы КТ819Б и КТ818Б в корпусе ТО-220 имеют предельную рассеиваемую мощность $60 \text{ Вт} > 8,76 \text{ Вт}$.

Максимальный ток, протекающий через базу VT10, можно найти через выражение

$$I_{BVT10\max} = \frac{I_{H\max}}{h_{21ЭVT10} + 1},$$

тогда ток источника тока промежуточного каскада (1.4):

$$I_{IVT7} = 1,1 \cdot \frac{I_{H\max}}{h_{21ЭVT10} + 1} = 1,1 \cdot \frac{3,54}{34 + 1} \approx 0,111 \text{ А.}$$

В промежуточном каскаде будем использовать комплементарные транзисторы VT7 – КТ814Б, VT8 – КТ815Б, которые могут обеспечить указанный ток. Максимальное напряжение в схеме между коллектором и эмиттером данных транзисторов равно:

$$U_{KЭм} = U_{\Pi} + U_{H\max} + U_{БЭVT10} = 18 + 14,14 + 1,1 = 33,24 \text{ В.}$$

Данное напряжение меньше предельно допустимого для КТ814Б, КТ815Б, которое равно 40 В [10]. Максимальная мощность, выделяемая в схеме на этих транзисторах, работающих в классе усиления А, равна:

$$I_{IVT7} \cdot U_{KЭм} = 0,111 \cdot 33,24 \approx 3,7 \text{ Вт,}$$

что не превышает предельно допустимой мощности данных транзисторов, равной 10 Вт, при использовании теплоотвода. Транзисторы КТ814Б, КТ815Б имеют низкое напряжение насыщения $U_{KЭнас}$, которое при токе 0,111 А не превышает 0,1 В [10]. Ограничим на источнике тока VT7, R6, R7, R10 минимальное падение напряжения (1.3) значением 1 В.

Далее формируем требования к напряжению пульсаций источника питания и рассчитываем значение емкостей конденсаторов С3, С4.

$$U_{\text{Пульс}} = U_{\Pi} - (U_{H\max} + I_{H\max} \cdot R14 + U_{БЭVT10} + U_{IVT7}),$$

$$U_{\text{Пульс}} = 18 - (14,14 + 3,54 \cdot 0,22 + 1,1 + 1,0) = 0,982 \text{ В.}$$

Ёмкость сглаживающих конденсаторов С связана с амплитудой напряжения пульсаций $U_{\text{Пульс}}$ и током потребления усилителя $I_{\text{Потр}}$ уравнением [11]

$$2 \cdot U_{\text{Пульс}} = \frac{T \cdot I_{\text{Потр}}}{C},$$

где Т – период пульсаций, равный 0,01 секунды при двухполупериодном выпрямлении и частоте сети 50 Гц.

Ток потребления усилителя можно приблизительно считать равным сумме токов потребления оконечного и промежуточного каскадов:

$$I_{\text{Потр}} = I_{\text{ИВТ7}} + \frac{I_{\text{Нmax}}}{\pi}.$$

Тогда

$$C = \frac{T}{2 \cdot U_{\text{Пульс}}} \left(I_{\text{ИВТ7}} + \frac{I_{\text{Нmax}}}{\pi} \right) = \frac{0,01}{2 \cdot 0,982} \left(0,111 + \frac{3,54}{\pi} \right) = 0,0063 \text{ Ф}.$$

Выбираем значение емкостей сглаживающих конденсаторов с запасом:

$$C3 = C4 = 10\,000 \text{ мкФ}.$$

В качестве VT9 выбираем такой же транзистор, как VT8 – КТ815Б, который можно установить на общий с транзисторами VT10, VT11 радиатор для повышения температурной стабильности выходного каскада. Напряжение $U_{\text{КЭВТ9}}$ между коллектором и эмиттером транзистора VT9 является напряжением смещения $U_{\text{СМ}}$ для транзисторов выходного каскада. При токе покоя выходного каскада I_0 , равном 100 мА, напряжение между базой и эмиттером выходных транзисторов приблизительно равно 0,58 В. Напряжение смещения равно:

$$U_{\text{СМ}} = U_{\text{КЭВТ9}} = U_{\text{БЭВТ10}} + I_0 \cdot (R14 + R15) + U_{\text{БЭВТ11}};$$

$$U_{\text{КЭВТ9}} = 0,58 + 0,1 \cdot (0,22 + 0,22) + 0,58 \approx 1,2 \text{ В}.$$

Зададим ток делителя через R11 равным шести токам базы $I_{\text{БВТ9}}$. Значения элементов источника напряжения смещения (VT9, R11, R12) подчиняются следующим соотношениям:

$$\frac{R_{11}}{R_{12}} = \frac{U_{\text{КЭВТ9}} - U_{\text{БЭВТ9}}}{U_{\text{БЭВТ9}}}; \quad (1.5)$$

$$6 \cdot I_{\text{БВТ9}} \cdot R_{11} + 5 \cdot I_{\text{БВТ9}} \cdot R_{12} = U_{\text{КЭВТ9}}. \quad (1.6)$$

В покое, когда входной сигнал равен нулю, ток коллектора $I_{\text{КВТ9}}$ близок по значению току $I_{\text{ИВТ7}} = 111 \text{ мА}$, вытекающему из источника тока промежуточного каскада. Разница равна току базы покоя выходного транзистора VT10:

$$I_{\text{БВТ10}} = I_0 / h_{21Э0} = 100 / 34 \approx 3 \text{ мА}.$$

Тогда $I_{\text{КВТ9}} \approx 0,108 \text{ А}$. Коэффициент передачи по току $h_{21ЭВТ9} \approx 70$ и напряжение $U_{\text{БЭВТ9}} \approx 0,7 \text{ В}$ при токе коллектора 108 мА.

$$I_{\text{БВТ9}} = \frac{I_{\text{КВТ9}}}{h_{21ЭВТ9}} = \frac{108}{70} \approx 1,54 \text{ мА}.$$

Из уравнений (1.5) и (1.6):

$$R_{12} = \frac{U_{КЭVT9}}{I_{БVT9}} \cdot \frac{U_{БЭVT9}}{6 \cdot U_{КЭVT9} - U_{БЭVT9}} = \frac{1,2}{1,54 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,7}{6 \cdot 1,2 - 0,7} = 83,9.$$

Значения сопротивлений резисторов приводим к стандартизованному ряду.

$$R_{12} \approx 82 \text{ Ом};$$

$$R_{11} = R_{12} \cdot \left(\frac{U_{КЭVT9}}{U_{БЭVT9}} - 1 \right) = 82 \cdot \left(\frac{1,2}{0,7} - 1 \right) = 58,6 \approx 59 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем источник VT7, R6, R7, R10 (см. рис. 1.1). Из уравнения (1.3):

$$R_{10} \leq \frac{U_{ИVT7} - 2 \cdot U_{КЭVT7}}{I_{ИVT7}};$$

$$R_{10} = \frac{1 - 2 \cdot 0,1}{0,111} = 7,2 \approx 6,8 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения на резисторе R6, в соответствии с законом напряжений Кирхгофа, равно сумме падений напряжений на резисторе R10 и базо-эмиттерном переходе $U_{БЭVT7} \approx 0,7$ В. Ток базы VT7 связан с током источника через коэффициент передачи по току $h_{21ЭVT7}$, который для тока 111 мА приблизительно равен 90 [10]. Пусть через R6 ток делителя составляет девять токов базы, тогда:

$$R_6 \approx \frac{I_{ИVT7} \cdot R_{10} + U_{БЭVT7}}{(9 \cdot I_{ИVT7} / h_{21ЭVT7})} = \frac{0,111 \cdot 6,8 + 0,7}{(9 \cdot 0,111 / 90)} = 131 \approx 130 \text{ Ом};$$

$$R_7 \approx \frac{U_{\Pi} - (I_{ИVT7} \cdot R_{10} + U_{БЭVT7})}{(10 \cdot I_{ИVT7} / h_{21ЭVT7})} = \frac{18 - (0,111 \cdot 6,8 + 0,7)}{(10 \cdot 0,111 / 90)} \approx 1300 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора R13 в цепи эмиттера составного транзистора VT6, VT8 промежуточного каскада усиления может быть равным или меньшим сопротивлению резистора R10 = 6,8 Ом. Иначе не будет выполняться требование по уровню сигнала на выходе усилителя. Отрицательная полуволна гармонического сигнала в усилителе будет ограничиваться при меньшем значении амплитуды, чем положительная полуволна. Ток эмиттера транзистора VT6 в схеме (см. рис. 1.1) равен току базы транзистора VT8.

$$I_{ЭVT6} = I_{БVT8} = I_{ИVT7} / h_{21ЭVT8} = 111 / 70 = 1,59 \text{ мА}$$

Мощность, рассеиваемая на транзисторе VT6, не превысит

$$P_{\text{расс}} = I_{ЭVT6} \cdot 2 \cdot U_{\Pi} = 1,59 \cdot 2 \cdot 18 = 57,3 \text{ мВт}.$$

В качестве транзистора VT6 можно применить маломощный транзистор с меньшим предельным напряжением $U_{КЭ}$, чем у транзистора VT8. Применим транзистор КТ3102А с предельным напряжением 50 В, предельным постоянным током

100 мА, предельной рассеиваемой мощностью 250 мВт и среднегеометрическим коэффициентом передачи тока $h_{21Э} = 158$ [7]. Рабочее напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT4 токового зеркала в покое будет равно сумме падений напряжений $U_{КЭVT4} = U_{БЭVT6} + U_{БЭVT8} + I_{ИVT7} \cdot R_{13} \approx 1,6$ В. Ток базы $I_{БVT6}$ транзистора VT6 получается равным $1,59 \text{ мА} / 158 \approx 10 \text{ мкА}$. Использование транзисторов VT2, VT3 с током коллектора $10 \cdot I_{БVT6} = 0,1 \text{ мА}$ не целесообразно. Это даст низкое значение крутизны и, как следствие, низкий коэффициент усиления по напряжению. Рабочие токи входного дифференциального каскада можно выбрать исходя из условий минимума коэффициента шума, или максимального коэффициента передачи по току транзистора, или из компромисса между этими условиями. Выбираем КТ3107Ж в качестве VT2, VT3 с минимальным нормированным коэффициентом шума при токе коллектора 0,2 мА [7]. Для токового зеркала VT4, VT5 выбираем соответствующие комплементарные транзисторы КТ3102Д. В источник тока на VT1 выбираем транзистор КТ3107А. Выходной ток источника VT1, R3, R4, R5 в соответствии с вышеизложенным зададим $I_{ИVT1} = 0,4 \text{ мА}$, тогда рабочие коллекторные токи VT2, VT3, VT4, VT5 будут равны 0,2 мА. Токи базы VT2, VT3 в схеме (рис. 1.1) являются вытекающими. Чтобы на выходе усилителя при отсутствии входного сигнала потенциал по постоянному току был равен или близок к нулю вольт, потенциал на базах транзисторов VT2, VT3 должен быть выше и равен падению напряжения на резисторе R8. Обычно это напряжение задают в пределах (0,05...0,5...2,0) вольта. Так как получаемые токи малы, то выберем 0,05 В. Ток базы КТ3107Ж будет равным [7]:

$$I_{БVT2} = I_{БVT3} = I_{КVT2} / h_{21ЭVT2} = 0,0002 / 50 = 4 \text{ мкА}.$$

Значение сопротивления R8:

$$R8 = U_{R8} / I_{БVT3} = 0,05 / 4 \cdot 10^{-6} = 12500 \approx 12 \text{ кОм}.$$

На резисторе R1 необходимо создать падение напряжения, равное разности напряжения питания и падению напряжения на резисторе R8. Найдём значение сопротивлений R1 и R2:

$$R1 = \frac{U_{\Pi} - U_{R8}}{9 \cdot I_{БVT2}} = \frac{18 - 0,05}{9 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 498611 \approx 510 \text{ кОм};$$

$$R2 = \frac{U_{\Pi} + U_{R8}}{10 \cdot I_{БVT2}} = \frac{18 + 0,05}{10 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 451250 \approx 470 \text{ кОм}.$$

Рассчитаем значения сопротивлений источника тока дифференциального каскада. Амплитуда входного напряжения равна 1 В, поэтому сумма падений напряжений на транзисторе VT1 и резисторе R5 будет близка к напряжению питания U_{Π} . Падение напряжения на эмиттерном резисторе источника тока

входного дифференциального каскада выбирают в интервале 20...30 % от U_{Π} . Тогда значение $R5$ можно найти из уравнения

$$R5 = \frac{0,3 \cdot U_{\Pi}}{I_{ИВТ1}} = \frac{0,3 \cdot 18}{0,0004} = 13500 \approx 13 \text{ кОм.}$$

Сопротивления резисторов $R3$ и $R4$ делителя в цепи базы (рис. 1.1) источника тока:

$$R3 = \frac{R5 \cdot I_{ИВТ1} + U_{БЭВТ1}}{9 \cdot (I_{ИВТ1} / h_{21ЭВТ1})} = \frac{13000 \cdot 0,0004 + 0,6}{9 \cdot (0,0004 / 100)} = 161111 \approx 160 \text{ кОм;}$$

$$R4 = \frac{2 \cdot U_{\Pi} - (R5 \cdot I_{ИВТ1} + U_{БЭВТ1})}{10 \cdot (I_{ИВТ1} / h_{21ЭВТ1})};$$

$$R4 = \frac{2 \cdot 18 - (13000 \cdot 0,0004 + 0,6)}{10 \cdot (0,0004 / 100)} = 755000 \approx 750 \text{ кОм.}$$

Для того чтобы найти значения элементов $C1$, $C2$, $R9$, необходимо определить входное сопротивление усилителя в целом, потери на входе из-за конечного сопротивления источника сигнала, рассчитать коэффициент усиления. В усилителе применена параллельная по выходу и последовательная по входу общая отрицательная обратная связь. Её действие приводит к увеличению входного сопротивления по току базы транзистора $VT2$ пропорционально глубине обратной связи [2], величина которой в многокаскадном усилителе достигает больших значений. Поэтому входное сопротивление усилителя определяется в основном значениями сопротивлений входных резисторов $R1$ и $R2$.

$$R_{ВХ} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{510 \cdot 470}{510 + 470} = 244,6 \text{ кОм.}$$

Коэффициент входных потерь составит:

$$K_{ВХПОТЕРЬ} = \frac{R_{ВХ}}{R_{Г} + R_{ВХ}} = \frac{244,6}{47 + 244,6} = 0,839.$$

В усилителе (рис. 1.1) сигнал по напряжению усиливается во входном дифференциальном каскаде и промежуточном каскаде. Выходной каскад по схеме комплементарного эмиттерного повторителя усиливает сигнал только по току и согласует выход усилителя с низкоомной мощной нагрузкой.

Коэффициент усиления напряжения промежуточного каскада рассчитывается по формуле [9]

$$K_{УПР} \approx - \frac{R_{НЭПР}}{R13 + \frac{1}{S_{Д}}}, \quad (1.7)$$

где $S_{Д}$ – крутизна преобразования для составного транзистора по схеме Дарлингтона [9]:

$$S_d = \frac{I_{кд}}{2 \cdot U_T}; \quad (1.8)$$

U_T – тепловой потенциал, равный kT/q [9], k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона; $U_T = 0,026$ В при $T = 300$ К;

$R_{нсп}$ – общее сопротивление нагрузки в цепи коллектора, состоящее из параллельного соединения сопротивлений:

$$R_{нсп} = \frac{r_{кэд} \cdot R_{кпп} \cdot R_{вхок}}{r_{кэд} \cdot R_{кпп} + r_{кэд} \cdot R_{вхок} + R_{кпп} \cdot R_{вхок}}; \quad (1.9)$$

$r_{кэд}$ – активное сопротивление между коллектором и эмиттером составного транзистора по схеме Дарлингтона,

$$r_{кэд} \approx \frac{2 \cdot r_{кэвт8}}{3}; \quad (1.10)$$

$r_{кэвт8}$ – сопротивление утечки между коллектором и эмиттером гибридной эквивалентной малосигнальной схемы транзистора с общим эмиттером [2, 8]:

$$r_{кэвт8} \approx \frac{|U_Y| + |U_{кэвт8}|}{I_{кд}}; \quad (1.11)$$

$I_{кд}$ – рабочий ток промежуточного каскада, равный выходному току $I_{ивт7}$ источника тока VT7, R6, R7, R10;

U_Y – напряжение Эрли [9], среднегеометрическое значение которого для n-p-n транзистора равно 126 В и для p-n-p транзистора – 77,5 В;

$U_{кэвт8}$ – рабочее напряжение между коллектором и эмиттером VT8 в покое:

$$U_{кэвт8} = U_{п} - R_{13} \cdot I_{ивт7} - 0,5 \cdot U_{кэвт9} = 18 - 6,8 \cdot 0,111 - 0,5 \cdot 1,2 = 16,6 \text{ В};$$

$R_{кпп}$ – общее сопротивление источника тока и источника смещения на выходе промежуточного каскада. Так как сопротивление переменному току источника смещения VT9, R11, R12 ($\approx r_{эвт9}$) намного меньше сопротивления источника тока VT7, R6, R7, R10, то приравняем $R_{кпп}$ к динамическому сопротивлению источника тока, которое согласно [9] равно:

$$R_{кпп} \approx r_{ивт7} = r_{кэвт7} \cdot \left(1 + \frac{h_{21эвт7} \cdot R_{10}}{r_{б'эвт7} + (R_6 \cdot R_7) / (R_6 + R_7) + R_{10}} \right); \quad (1.12)$$

$$r_{кэвт7} \approx \frac{|U_Y| + |U_{кэвт7}|}{I_{ивт7}}; \quad (1.13)$$

$$r_{б'эвт7} = (1 + h_{21эвт7}) \cdot \frac{U_T}{I_{ивт7}}. \quad (1.14)$$

Входное сопротивление оконечного каскада

$$R_{\text{ВХОК}} \approx (1 + h_{21Э\text{VT}11}) \cdot \left(\frac{U_T}{I_{H\text{max}}} + R_{15} + R_H \right). \quad (1.15)$$

Проведём расчёт выражений (1.7)–(1.15), используя параметры гибридной эквивалентной схемы транзистора (схема Джиаколетто) [2, 8, 5]:

$$r_{\text{КЭVT}8} \approx \frac{126 + 16,6}{0,111} \approx 1284 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{КЭД}} \approx \frac{2 \cdot 1284}{3} \approx 856 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{КЭVT}7} \approx \frac{77,5 + 16,4}{0,111} = 846 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{БЭVT}7} = (1 + 90) \cdot \frac{0,026}{0,111} = 21,3 \text{ Ом};$$

$$S_D = \frac{0,111}{2 \cdot 0,026} = 2,13 \text{ См};$$

$$R_{\text{ВХОК}} \approx (1 + 70) \cdot \left(\frac{0,026}{3,54} + 0,22 + 4 \right) \approx 300 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{КПР}} \approx r_{i\text{VT}7} = 846 \cdot \left(1 + \frac{90 \cdot 6,8}{21,3 + (130 \cdot 1300) / ((130 + 1300) + 6,8)} \right) \approx 4385 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{НСПР}} = \frac{856 \cdot 4385 \cdot 300}{856 \cdot 4385 + 856 \cdot 300 + 4385 \cdot 300} = 211,4 \text{ Ом};$$

$$K_{\text{УПР}} = -\frac{211,4}{6,8 + \frac{1}{2,13}} \approx -29.$$

Коэффициент усиления входного дифференциального каскада в схеме усилителя (рис. 1.1) определяется по формуле [9]

$$K_{\text{УДИФ}} = -\frac{1}{2} S_{\text{VT}2} R_{\text{НСПР}},$$

где $S_{\text{VT}2}$ – крутизна преобразования в дифференциальном каскаде:

$$S_{\text{VT}2} = \frac{I_{\text{КVT}2}}{U_T} = \frac{0,0002}{0,026} \approx 0,0077 \text{ См};$$

$R_{\text{НЭДИФ}}$ – общее сопротивление нагрузки дифференциального каскада, состоящее из параллельного соединения сопротивлений:

$$R_{\text{НЭДИФ}} = \frac{r_{\text{КЭВТ2}} \cdot R_{\text{ТК}} \cdot R_{\text{ВХПР}}}{r_{\text{КЭВТ2}} \cdot R_{\text{ТК}} + r_{\text{КЭВТ2}} \cdot R_{\text{ВХПР}} + R_{\text{ТК}} \cdot R_{\text{ВХПР}}},$$

$r_{\text{КЭВТ2}}$ – активная составляющая дифференциального сопротивления участка между коллектором и эмиттером транзистора VT2, включенного по схеме с общим эмиттером [9]:

$$r_{\text{КЭВТ2}} \approx \frac{|U_Y| + |U_{\text{КЭВТ2}}|}{I_{\text{КВТ2}}} = \frac{77,5 + 15,4}{0,0002} = 464500 \text{ Ом},$$

$R_{\text{ТК}}$ – динамическое сопротивление токового зеркала, равное сопротивлению $r_{\text{КЭВТ4}}$ при отсутствии резистора в цепи его эмиттера:

$$R_{\text{ТК}} = r_{\text{КЭВТ4}} = \frac{|U_Y| + |U_{\text{КЭВТ4}}|}{I_{\text{КВТ4}}} = \frac{126 + 2,1}{0,0002} = 640500 \text{ Ом},$$

$R_{\text{ВХПР}}$ – входное сопротивление промежуточного каскада, построенного по схеме Дарлингтона:

$$R_{\text{ВХПР}} \approx 2 \cdot h_{21\text{ЭВТ6}} \cdot h_{21\text{ЭВТ8}} \frac{U_T}{I_{\text{КД}}} = 2 \cdot 158 \cdot 70 \frac{0,026}{0,111} = 5181 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{НЭДИФ}} = \frac{464500 \cdot 640500 \cdot 5181}{464500 \cdot 640500 + 464500 \cdot 5181 + 640500 \cdot 5181} = 5083 \text{ Ом},$$

$$K_{\text{УДИФ}} = -\frac{1}{2} 0,0077 \cdot 5083 = -19,6.$$

Общий коэффициент усиления по напряжению усилителя с разомкнутой обратной связью выражается произведением:

$$K_{\text{УДИФ}} \cdot K_{\text{УПР}} = 19,6 \cdot 29 = 568,4.$$

По условиям технического задания должно выполняться следующее тождество для сквозного коэффициента усиления:

$$K_E = K_{\text{ВХПОТЕРЬ}} \cdot \frac{K_{\text{УДИФ}} \cdot K_{\text{УПР}}}{1 + B \cdot K_{\text{УДИФ}} \cdot K_{\text{УПР}}} = \frac{U_H}{U_G},$$

где B – коэффициент передачи пассивной цепи общей отрицательной обратной связи R8, R9, C2. Он должен быть положительным и меньше единицы.

$$B = \frac{1}{K_{\text{УДИФ}} \cdot K_{\text{УПР}}} \cdot \left(\frac{U_G \cdot K_{\text{ВХПОТЕРЬ}} \cdot K_{\text{УДИФ}} \cdot K_{\text{УПР}}}{U_H} - 1 \right),$$

$$B = \frac{1}{19,6 \cdot 29} \cdot \left(\frac{0,707 \cdot 0,839 \cdot 19,6 \cdot 29}{10} - 1 \right) = 0,05756.$$

Значение коэффициента передачи цепи общей отрицательной обратной связи зависит от величин элементов R8, R9, C2. Если применить конденсатор C2 с реактивным сопротивлением на нижней границе заданного частотного диапазона меньшим или равным значению активного сопротивления резистора R9, то:

$$B = \frac{R9}{R8 + R9}.$$

Зная B и R8, найдём значение R9 и затем C2.

$$R9 = \frac{B \cdot R8}{1 - B} = \frac{0,05756 \cdot 12000}{1 - 0,05756} = 732,9 \approx 750 \text{ Ом};$$

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R9} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 750} = 7,07 \cdot 10^{-6} \approx 10 \text{ мкФ}.$$

После выбора значений сопротивлений резисторов из стандартизованного ряда уточним значение коэффициента B:

$$B = \frac{750}{12000 + 750} \approx 0,05882.$$

Рассчитаем значение ёмкости конденсатора C1. Его реактивное сопротивление должно быть меньше или равно значению входного сопротивления усилителя на нижней частоте рабочего диапазона частот:

$$X_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot C1} \leq R_{BX};$$

$$C1 = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_{BX}} = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 244600} = 2,17 \cdot 10^{-7} \approx 0,22 \text{ мкФ}$$

Проверим полученные значения коэффициентов передачи:

$$U_H = U_G \cdot K_E = 0,707 \cdot 0,839 \cdot \frac{19,6 \cdot 29}{1 + 0,05882 \cdot 19,6 \cdot 29} = 9,8 \text{ В}.$$

Требуемое значение напряжения усиленного сигнала на выходе выполняется с точностью выше 5 % (зависит от значения R9).

$$\frac{10 - 9,8}{10} \cdot 100 \% = 2 \% < 5 \%$$

Оценить нелинейные искажения сигнала в усилителе можно по экспериментальным данным: непосредственным измерением коэффициента гармоник усилителя (с помощью измерителя нелинейных искажений С6-11) или методом

пяти ординат по измеренной сквозной динамической характеристике. Правильно спроектированный усилитель, не охваченный обратной связью, с двухтактным комплементарным эмиттерным повторителем на выходе, работающим в классах усиления В и АВ, может давать искажения, оцениваемые через коэффициент гармоник k_G , порядка 5...15 % (при условии, что уровень сигнала на входе не вызывает перегрузки усилителя). Оценим действия общей отрицательной обратной связи на значение коэффициента гармоник.

$$k_{ГООС} = \frac{k_G}{1 + B \cdot K_{УДИФ} \cdot K_{УПР}};$$

$$k_{ГООС} = \frac{5}{1 + 0,05882 \cdot 19,6 \cdot 29} = 0,145 \%$$

$$k_{ГООС} = \frac{15}{1 + 0,05882 \cdot 19,6 \cdot 29} = 0,436 \%$$

Для уменьшения коэффициента гармоник рекомендуется увеличить коэффициент петлевого усиления. Например, можно поднять коэффициент усиления дифференциального каскада, увеличив рабочие токи транзисторов VT2, VT3.

На этом рассмотрение краткого примера расчёта усилителя закончено. Помимо основного расчёта, для повышения оценки за расчётно-графическую работу рекомендуется: произвести выбор теплоотвода для транзисторов выходных каскадов, используя теорию электротепловой аналогии [3]; провести анализ частотных свойств выбираемых транзисторов (найти значения характерных частот для применяемого включения транзистора в сравнении с верхней границей заданного частотного диапазона [2]); провести анализ схемы усилителя при помощи программ схемотехнического моделирования [6]. Моделирование схемы позволяет проверить расчёт усилителя, построить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики, оценить устойчивость работы усилителя и при необходимости ввести дополнительные элементы, повышающие устойчивость.

2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Вариант схемы усилителя	$R_{Г,}$ сопротивление источника сигнала, кОм	$U_{Г,}$ напряжение источника сигнала	$P_{ВЫХ,}$ выходная мощность, Вт	$R_{Н,}$ сопротивление нагрузки, Ом	$\Delta f,$ частотный диапазон, Гц	$\Delta T,$ интервал рабочих температур °С	$U_{П,}$ напряжение питания, В
1	10	2 В	8	8	100...12 500	0...+50	34
2	2	1 В	5	4	63...14 000	+10...+40	24
3	1	1 В	60	4	20...20 000	+10...+30	54
4	10	3 В	50	8	300...100 000	+10...+30	+35, -35
5	5	500 мВ	12	8	100...12 500	-20...+50	+20, -20
6	1	500 мВ	30	4	20...20 000	+10...+50	+20, -20
7	22	200 мВ	5	16	16...80 000	+10...+50	+18, -18
8	4,7	750 мВ	25	4	40...15 000	0...+50	+19, -19
9	47	200 мВ	12	4	20...20 000	+10...+30	+15, -15
10	50	100 мВ	40	8	40...25 000	+10...+30	+30, -30
11	10	100 мВ	25	4	20...12 000	-20...+50	+20, -20
12	1	1 В	200	2	20...20 000	+10...+40	+33, -33
13	100	300 мВ	10	2	20...25 000	-5...+50	22
14	47	1 В	30	8	20...20 000	0...+50	53
15	15	750 мВ	20	4	100...12 500	-30...+60	35
16	1	500 мВ	35	4	20...20 000	+10...+50	+16, -16
17	200	200 мВ	45	8	50...200 000	+10...+30	+32, -32
18	1	1,2 В	10	8	30...30 000	+15...+40	40

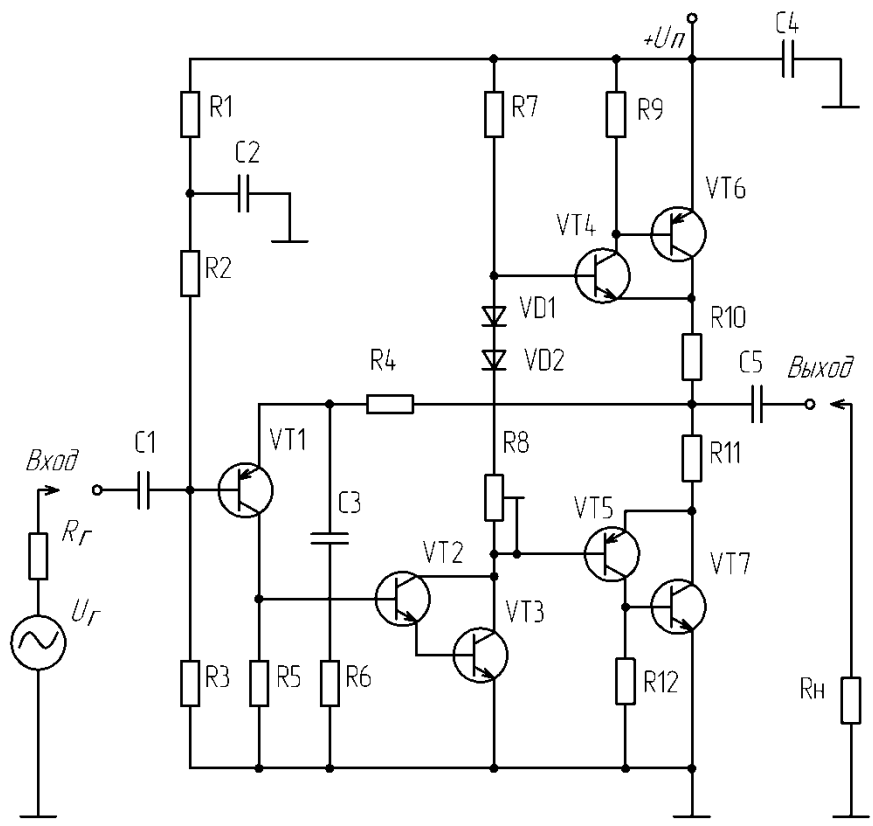


Рис. 2.3. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 3

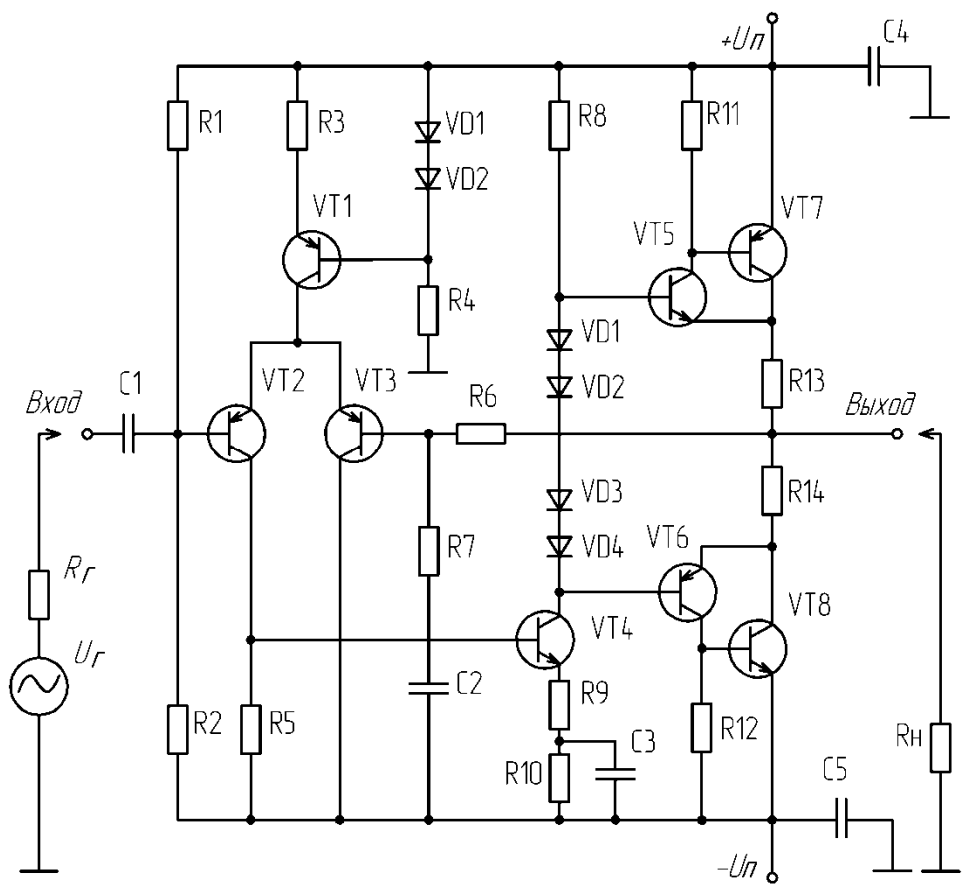


Рис. 2.4. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 4

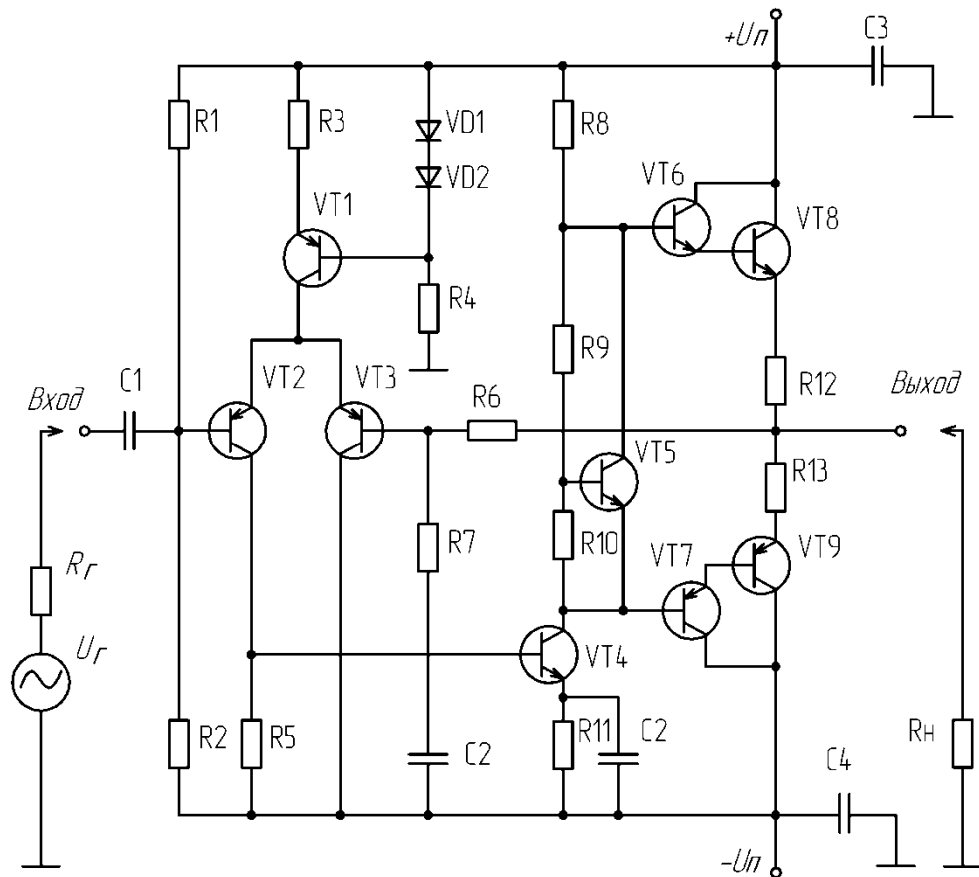


Рис. 2.5. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 5

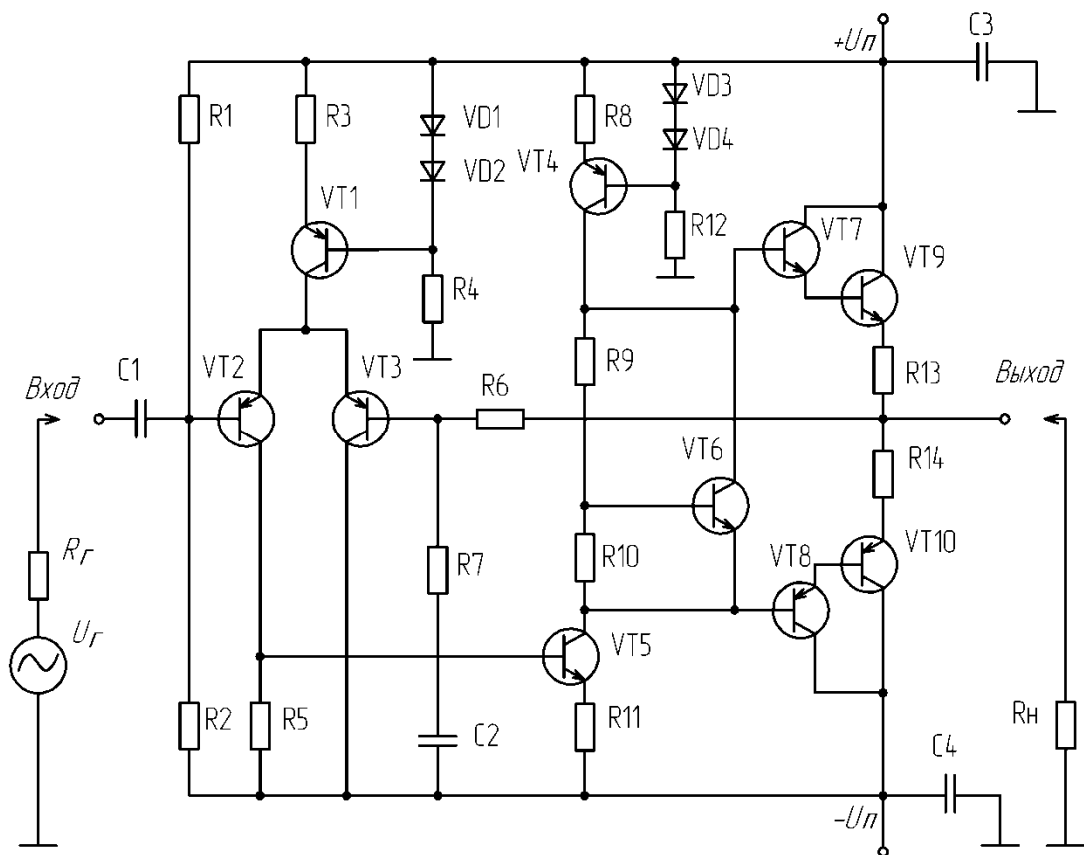


Рис. 2.6. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 6

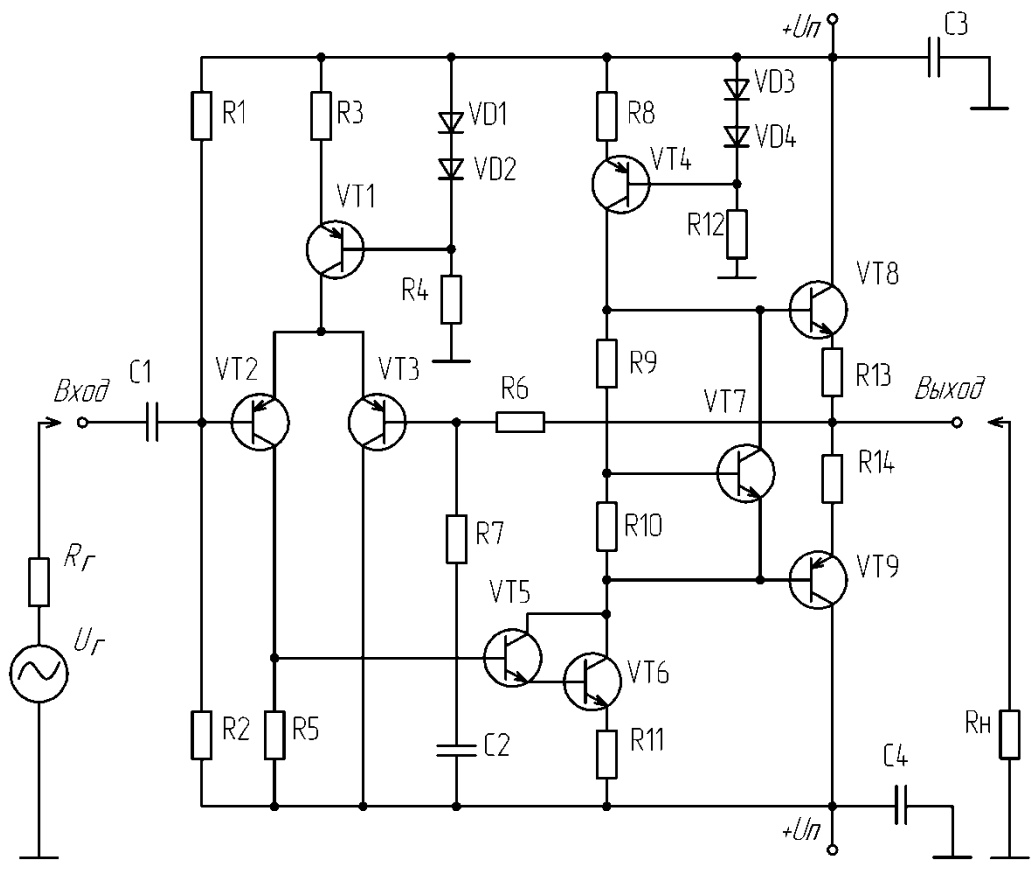


Рис. 2.7. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 7

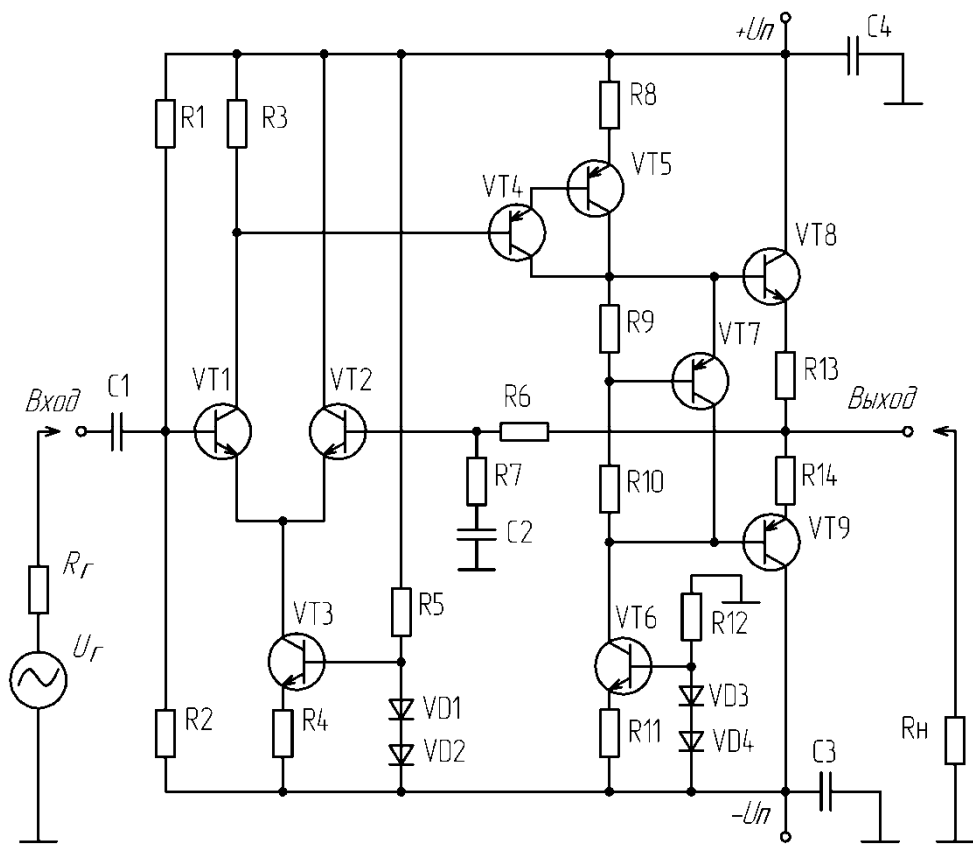


Рис. 2.8. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 8

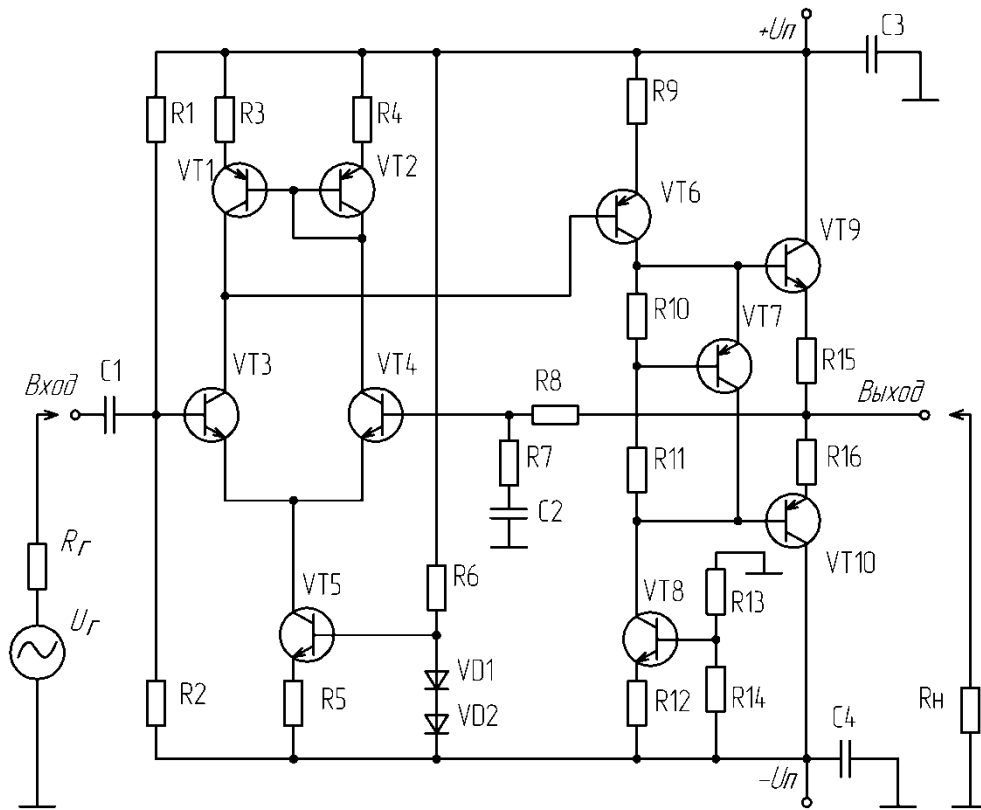


Рис. 2.9. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 9

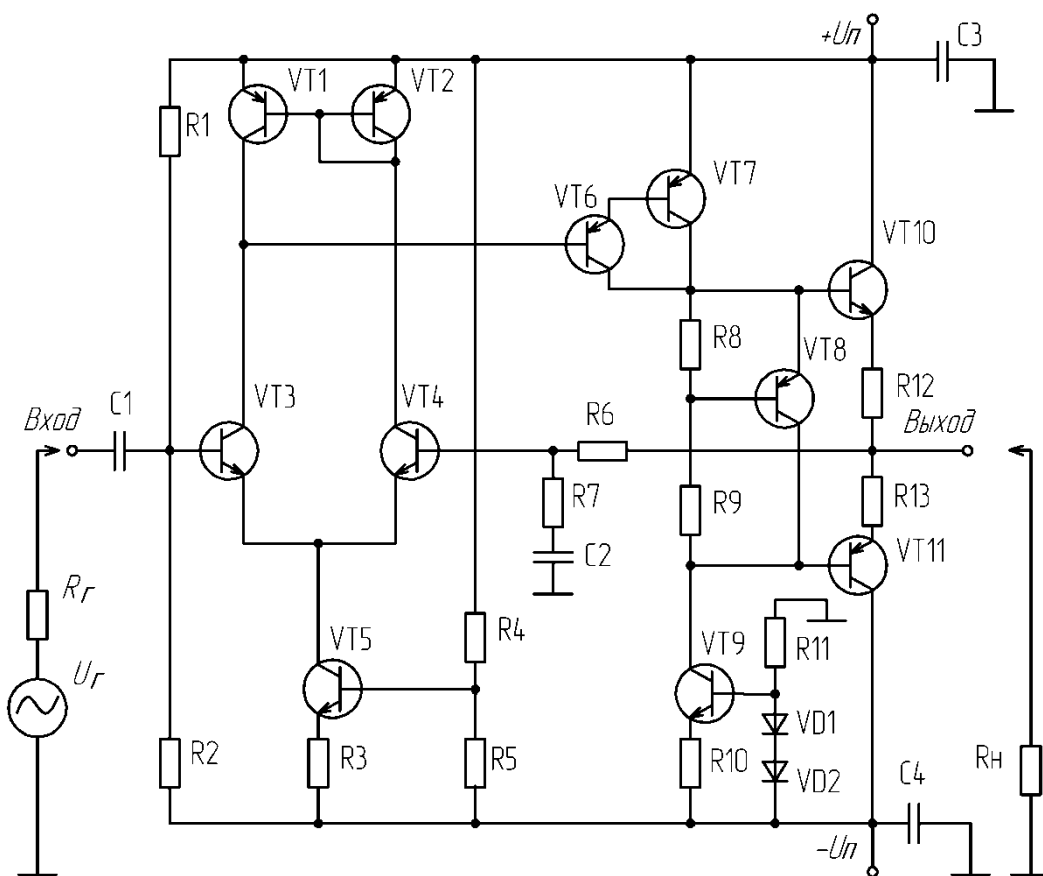


Рис. 2.10. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 10

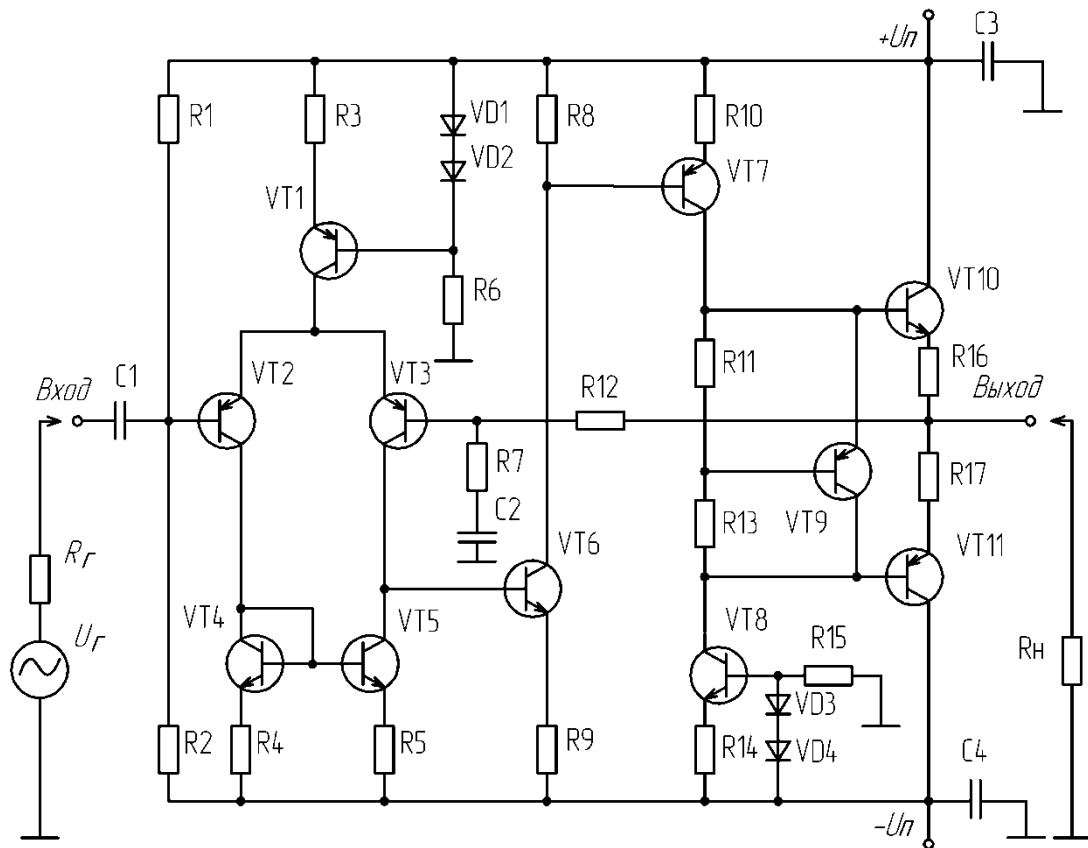


Рис. 2.11. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 11

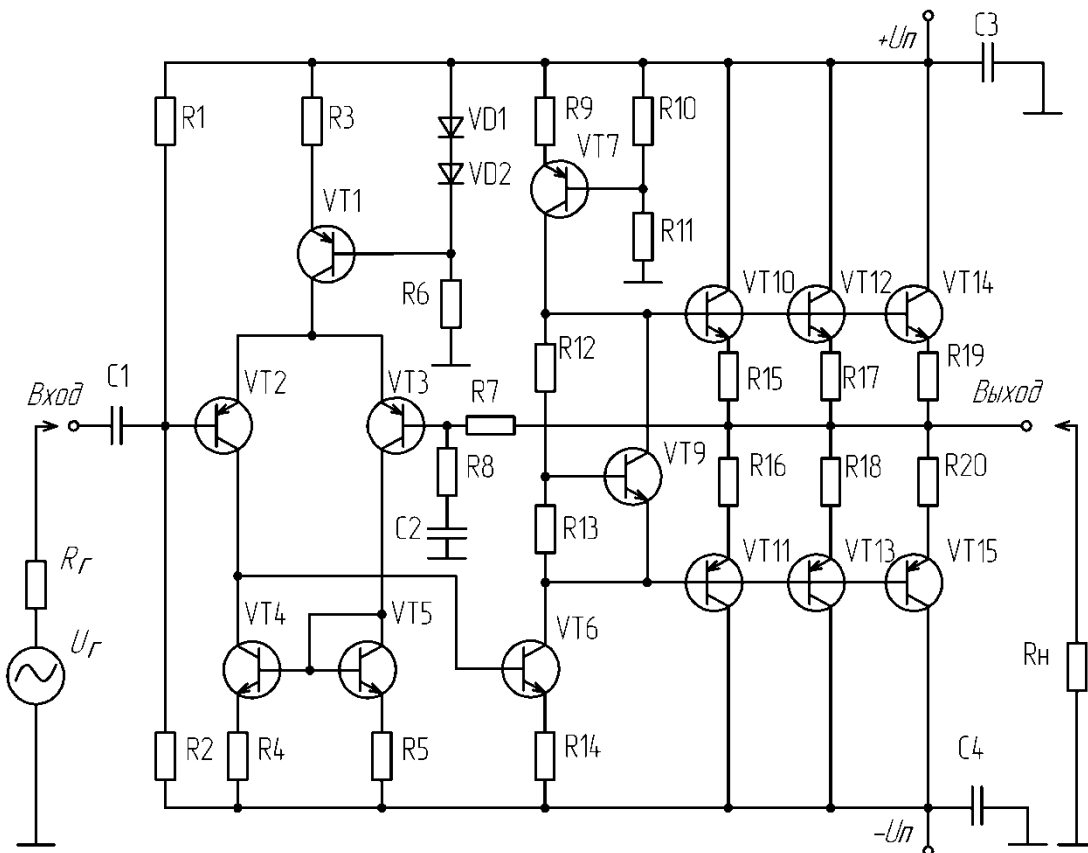


Рис. 2.12. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 12

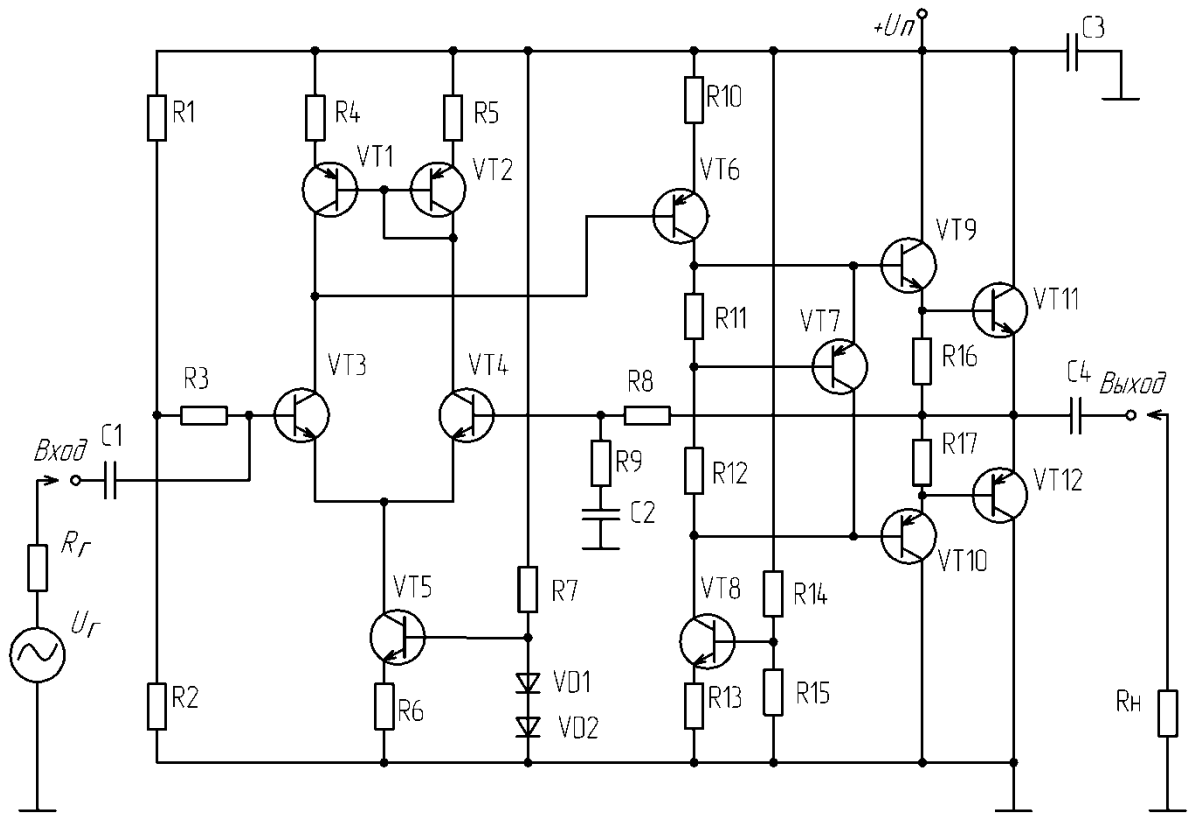


Рис. 2.13. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 13

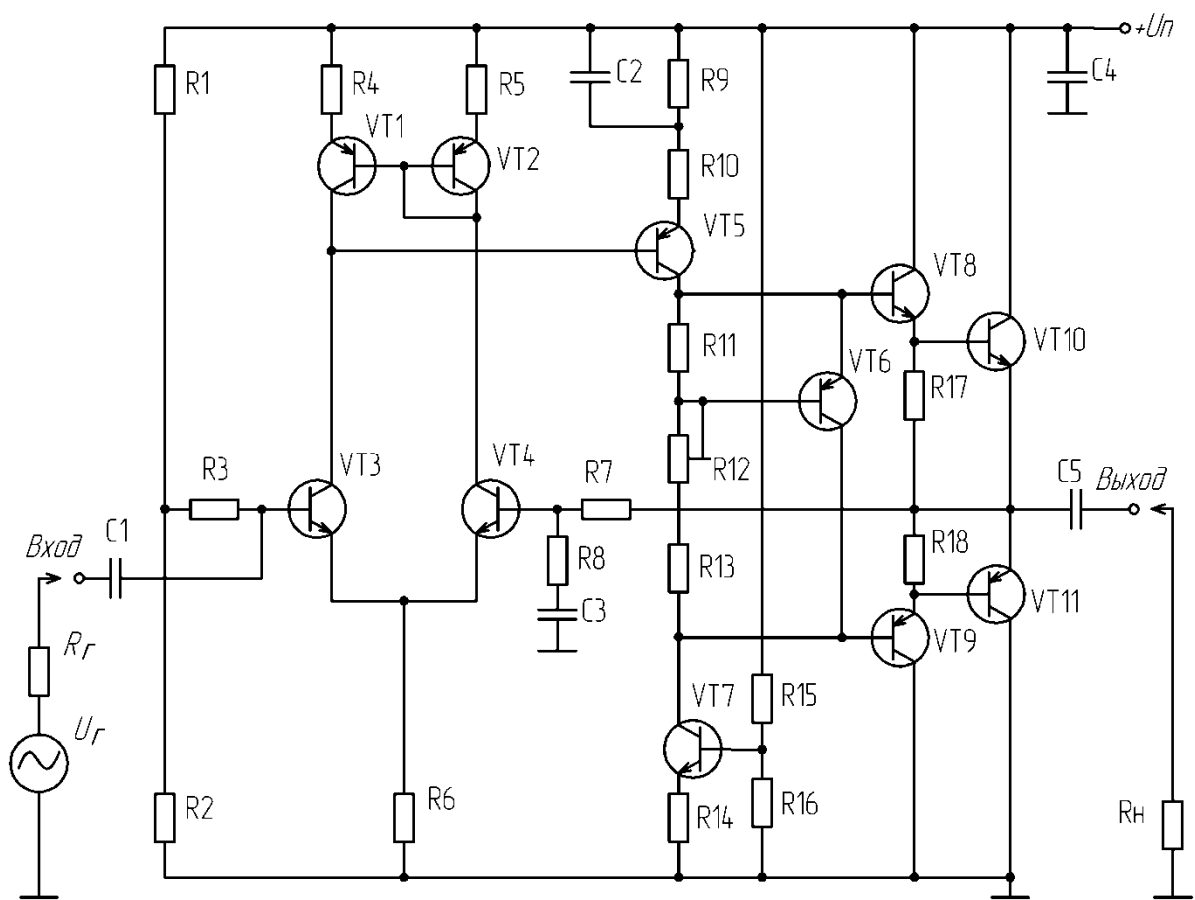


Рис. 2.14. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 14

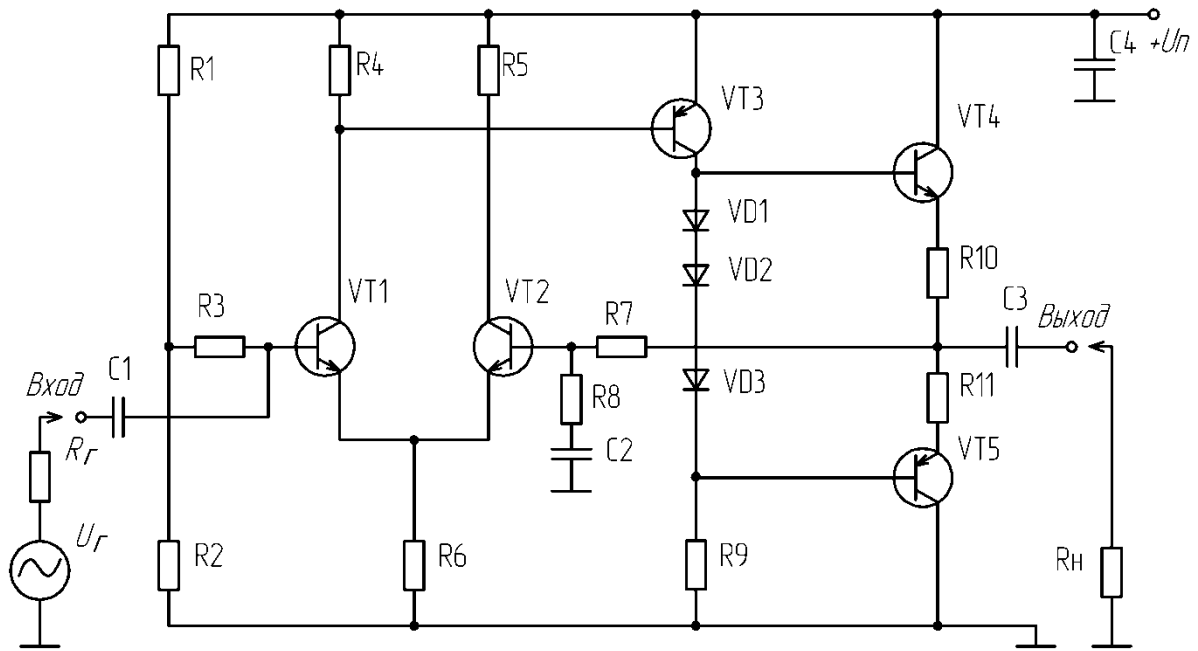


Рис. 2.15. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 15

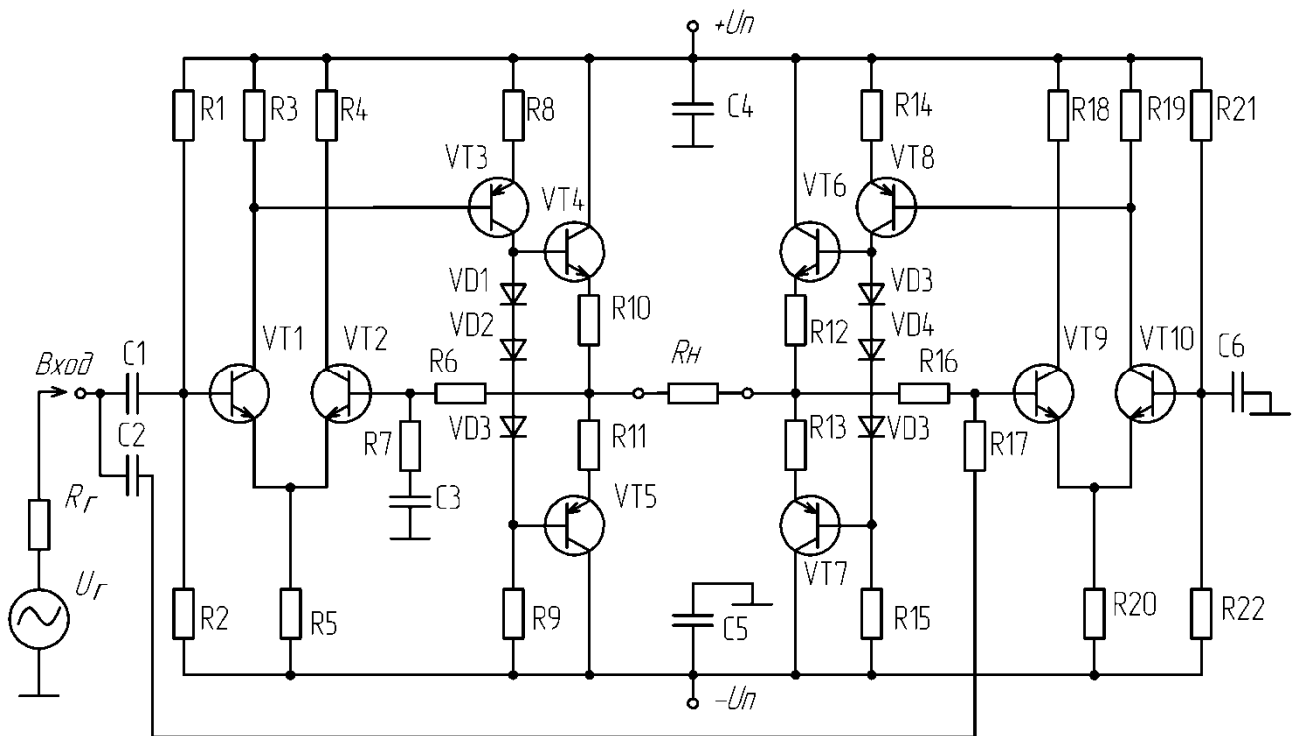


Рис. 2.16. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 16

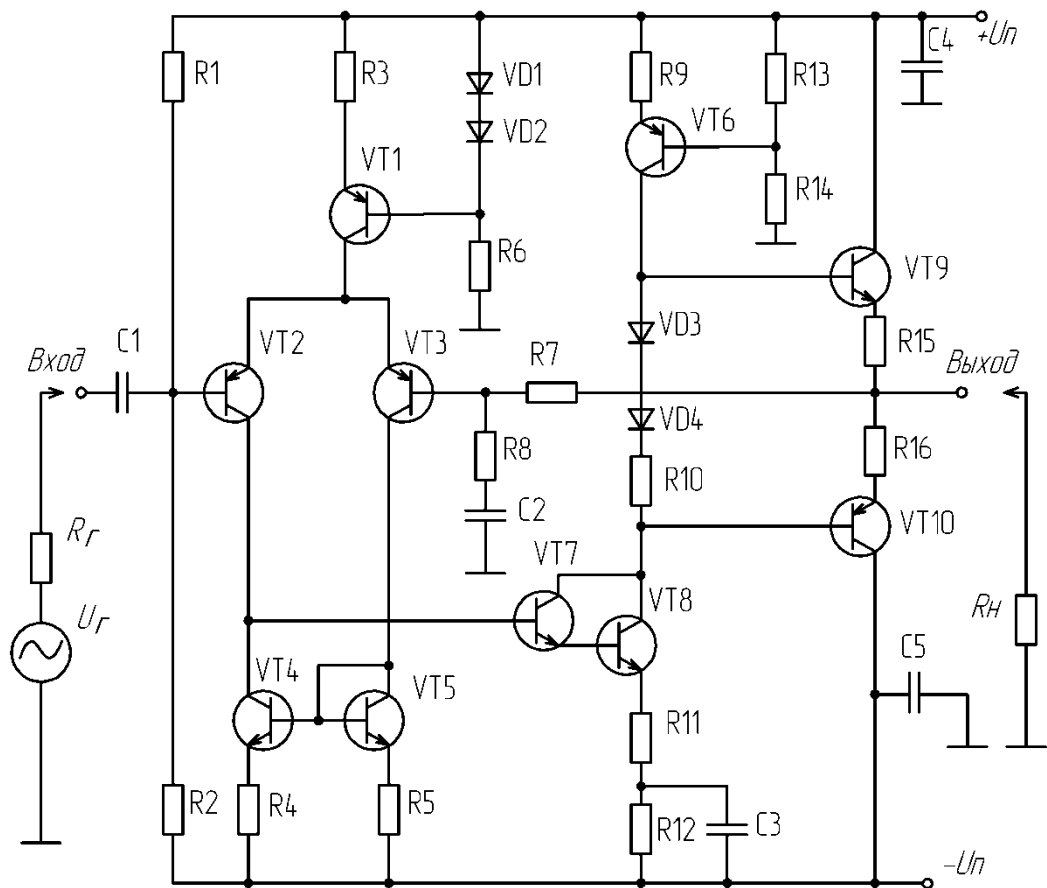


Рис. 2.17. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 17

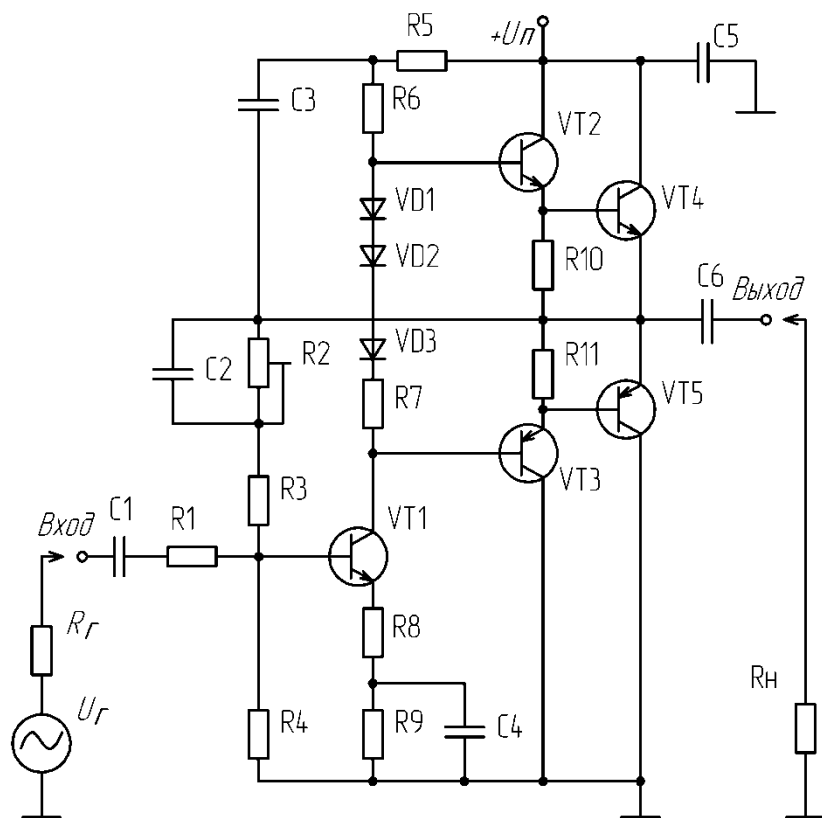


Рис. 2.18. Схема усилителя мощности звуковых частот. Вариант № 18

3. ВЫБОР ТЕПЛОТВОДА

Выбор варианта отвода тепла зависит от рассеиваемой на транзисторе мощности. В большинстве конструкций усилителей применяется отвод с естественной конвекцией воздуха, реже с принудительным потоком воздуха, создаваемым с помощью электромоторных вентиляторов. Задача теплоотвода – удерживать полупроводниковые переходы транзисторов при температуре, не превышающей предельно допустимой температуры $T_{\Pi\max}$ [11].

Для простых инженерных расчётов используют выражения, полученные для одномерной модели теплопередачи из теории электротепловой аналогии [3]. При расчётах используют тепловое сопротивление R_Q , которое равняется отношению величины перепада температур в градусах к передаваемой мощности. Например, тепловое сопротивление в контакте корпуса транзистора и радиатора зависит от площади контакта, теплопроводности материалов корпуса транзистора и радиатора, от состояния поверхности контакта (шероховатость поверхности, степень окисления поверхности). Для уменьшения теплового сопротивления поверхности зачищают от окислов, а микронеровности заполняют мелкодисперсной теплопроводящей пастой. Для последовательного ряда тепловых контактов общее температурное сопротивление равно сумме тепловых сопротивлений отдельных соединений.

Для выбора радиатора используют следующее соотношение [11]:

$$T_{\Pi\max} > T_{\Pi} = T_{CP} + (R_{\Pi} + R_K + R_{И} + R_P) \cdot P_{РАСС},$$

где T_{Π} – рабочая температура перехода транзистора;

T_{CP} – значение верхней границы рабочего температурного диапазона окружающей среды;

R_{Π} – тепловое сопротивление между переходом и корпусом транзистора;

R_K – тепловое сопротивление между корпусом транзистора и радиатором;

$R_{И}$ – тепловое сопротивление изоляционной прокладки между транзистором и радиатором;

R_P – тепловое сопротивление радиатора, характеризующее теплопередачу от радиатора в окружающую среду;

$P_{РАСС}$ – мощность, рассеиваемая на транзисторе в схеме усилителя.

Параметр R_{Π} является справочным [7] или вычисляется через другие справочные параметры:

$$R_{\Pi} = (T_{\Pi\max} - T_{K1}) / P_{\max},$$

где T_{K1} – температура корпуса транзистора, при которой обеспечивается максимальная мощность рассеивания P_{\max} .

Тепловое сопротивление R_K зависит от конструкции корпуса, поэтому у разных транзисторов, но с одинаковым корпусом эта величина может быть одинаковой. Наиболее распространённые корпуса транзисторов, применяемых в усилителях низкой частоты, и их тепловые сопротивления приведены ниже.

Корпус ТО-3 имеет тепловое сопротивление $R_K = (0,2 \dots 0,3 \dots 0,7)$ К/Вт.

Корпус ТО-220 имеет тепловое сопротивление $R_K = (0,8 \dots 1,0 \dots 1,5)$ К/Вт.

Корпуса ТО-126 и ТО-127 – $R_K = (1,5 \dots 2,0 \dots 3,0)$ К/Вт.

Корпуса ТО-218 и ТОР-3 – $R_K = (0,8 \dots 1,1)$ К/Вт.

Тепловое сопротивление $R_{И}$ может не использоваться при расчётах, если транзистор электрически не изолируется от радиатора, например, сам корпус транзистора из изоляционного материала или изолируется радиатор от конструкции усилителя. В качестве изоляционных прокладок используют пластины слюды или специально выпускаемые изолирующие теплопроводящие подложки. Например, теплопроводящие подложки из материала «Номакон» имеют $R_{И} \leq 0,12$ К/Вт.

Конструкции радиаторов, предлагаемых в настоящее время на рынке, разнообразны и имеют различные значения R_P : от 25 К/Вт для малогабаритных дешёвых радиаторов, таких как FK220, до 0,71 К/Вт для охладителя 0281 массой 1,75 кг. Принудительный воздушный поток со скоростью 6 м/с уменьшает тепловое сопротивление теплоотвода 0281 до значения 0,236 К/Вт. Приведённые данные по радиаторам взяты из каталога электронных компонентов «Пром-электроника» 2005 года. Выбрать теплопроводящую подложку и радиаторы можно на сайтах поставщиков электронных компонентов: www.promelec.ru, www.platan.ru, www.chipindustry.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валенко В. С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / В. С. Валенко ; под ред. А. А. Ровдо. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. – 368 с.
2. Войшвилло Г. В. Усилительные устройства : учебник для вузов / Г. В. Войшвилло. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1983. – 264 с.
3. Дульнев Г. Н. Методы расчёта теплового режима приборов / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфёнов, А. В. Сигалов. – М. : Радио и связь, 1990. – 312 с.
4. Завьялов С. А. Схемотехника усилителей мощности низких частот : учеб. пособие / С. А. Завьялов, К. В. Мурасов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. – 92 с.
5. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники : учеб. пособие для вузов / Е. И. Манаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1985. – 488 с.
6. Моделирование электрических схем усилителей мощности : метод. указания / сост. : С. А. Завьялов, И. В. Хоменко, А. Н. Лепетаев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 32 с.
7. Полупроводниковые приборы: Транзисторы : справочник / В. Л. Аронов, А. В. Баюков, А. А. Зайцев и др. ; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 904 с.
8. Схемотехника усилительных устройств на биполярных транзисторах : метод. указания / сост. : С. А. Завьялов, А. А. Губарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2006. – 44 с.
9. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Т. 1. – 832 с.
10. Транзисторы для аппаратуры широкого применения : справочник / К. М. Брежнева, Е. Г. Гантман, Т. И. Давыдова и др. ; под. ред. Б. Л. Перельмана. – М. : Радио и связь, 1981. – 656 с.
11. Хоровиц П. Искусство схемотехники : в 3 т. : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1993. – Т. 1. – 413 с.
12. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике : пер. с нем. / П. Шкритек. – М. : Мир, 1991. – 446 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Требования к содержанию, оформлению и срокам выполнения работы	4
1. Пример выполнения расчета усилителя мощности звуковой частоты	5
2. Варианты заданий для выполнения расчетно-графических работ	19
3. Выбор теплоотвода.....	29
Библиографический список.....	31

Редактор *М. А. Болдырева*
Компьютерная верстка *Т. А. Бурдель*

Сводный темплан 2012 г.

Подписано в печать 25.09.2012. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,0.
Тираж 50 экз. Заказ 554.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Типография ОмГТУ