

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Кафедра информационных радиотехнологий

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе

на тему

Усилитель мощности для виброакустических испытаний

Выполнил:
Студент группы 121901
Вечер Д. Л.

Проверил:
доцент кафедры ИРТ
Крушев Владимир Тимофеевич
Оценка: _____

Минск 2023

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	6
1.1 Виброакустические испытания	6
1.2 Приборы для виброакустической диагностики.....	7
1.3 Усилители	8
1.4 Усилитель мощности	9
2. РАСЧЕТ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ	11
2.1 Анализ технического задания	11
2.2 Выбор схемы УМ.....	12
2.3 Выбор цепи термостабилизации.....	12
2.4 Расчет оконечного каскада	13
2.5 Расчёт предоконечного каскада	15
2.6 Расчёт входного каскада	17
2.7 Выбор и расчёт инвертирующей схемы	22
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	25
3.1 Амплитудно-частотная характеристика	26
3.2 Исследование схемы THD vs POUT (Harmonic distortion).....	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире нет таких отраслей промышленности, в которых не использовались бы электронные измерительные приборы. Современные радиоэлектронные системы состоят из сложных комплексов технических средств, которые включают в себя датчики, преобразователи сигналов или же устройства отображения и регистрации. В большинстве нынешних электронных приборов и устройств необходимо обеспечить усиление электрических сигналов ввиду естественных потерь энергии. Для этих целей используются усилители.

Усилителем мощности называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки P_H при заданном сопротивлении нагрузки R_H . Усилитель мощности является примером устройств силовой электроники. Основная цель при разработке таких устройств состоит в том, чтобы отдать нагрузке заданную мощность.

Усилитель мощности широко используются в различных измерительных устройствах из-за нескольких очень полезных свойств, которых другие усилители не имеют. Исследование усилителей мощности является актуальной задачей на сегодняшний день.

В данном курсовом проекте необходимо разработать схему усилителя мощности для виброакустических испытаний, в дальнейшем используемый для автомобильной аппаратуры.

Целью данного проекта является:

- 1) Анализ требований к проектируемому устройству
- 2) Проектирование схемы
- 3) Расчет и выбор компонентов, включенных в схему
- 4) Компьютерное моделирование схемы и проверка ее работоспособности
- 5) Анализ результатов работы схемы

1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

1.1 Виброакустические испытания

Виброакустика - это метод изучения звуков, исходящих от узлов и агрегатов автотранспортного средства, в процессе их эксплуатации.

Виброакустика изучает причины возникновения шума в автомобиле, с целью улучшения работы составляющих его механизмов. А также для предупреждения нежелательной вибрации деталей во время работы автомашины.

В современных технологиях автомобилестроения виброакустика играет важную роль при конструировании и установке элементов шумоизоляции салона автомобиля, или двигателя внутреннего сгорания. На пример при разработке новых уплотнителей, при помощи виброакустики проверяется их качество.

В реальной жизни любая продукция, в том числе и электрический прибор, постоянно подвергаются воздействию вибраций. Для того чтобы проверить устойчивость к вибрациям исследуемый объект подвергают воздействию гармонических низких частот.

Основными компонентами вибрационных испытаний являются:

Контроллер – устройство, главное назначение которого следить чтобы сигнал, получаемый с акселерометра, соответствовал заданной программе исследований.

Вибратор – устройство, представляющее собой динамик большой мощности, передающий колебания на исследуемый объект.

Усилитель – электронный прибор, назначение которого из слабого электрического сигнала получить сигнал большей амплитуды без искажений и передать его на вибратор.

Акселерометр – датчик, сообщающий контроллеру характеристики сигнала, создаваемого вибратором.

Основными параметрами вибраций являются виброперемещение, виброскорость, виброускорение и частота. Виброперемещением $s(t)$ называют составляющую перемещения, описывающую вибрацию.

1.2 Приборы для виброакустической диагностики

Для виброакустической диагностики (ВАД) используются колебательные процессы упругой среды, возникающие при работе ШПГ (шатунно-поршневая группа). Источником этих колебаний являются газодинамические процессы (сгорание, выпуск, впуск), регулярные механические соударения в сопряжениях за счет зазоров и неуравновешенности масс, а также хаотические колебания, обусловленные процессами трения. При работе двигателя все эти колебания накладываются друг на друга и образуют случайную совокупность колебательных процессов, называемую спектром. Это усложняет виброакустическую диагностику из-за необходимости подавления помех, выделения полезных сигналов и расшифровки колебательного спектра.

Распространение колебаний в упругой среде носит волновой характер. Параметрами колебательного процесса являются частота (периодичность), уровень (амплитуда) и фаза (положение импульса колебательного процесса относительно опорной точки цикла работы механизма). Уровень измеряют смещением, скоростью или ускорением частиц упругой среды, давлением, возникающим в ней, или же возможностью колебательного процесса. Воздушные колебания называются шумами (стуками) и улавливаются с помощью микрофона. Вибрации отдельных деталей механизма измеряют с помощью пьезоэлектрических датчиков.

Существует несколько методов ВАД. Наибольшее распространение получила регистрация уровня колебаний в виде мгновенного импульса в функции времени (или угла поворота коленчатого вала) при помощи осциллографа. Уровень характер спада колебательного процесса по сравнению с нормативным позволяет определить неисправность диагностируемого сопряжения. Более универсальным методом ВАД является регистрация и анализ всего спектра, т. е. всей совокупности колебательных процессов. Колебательный спектр снимают на узком характерном участке процесса при соответствующем скоростном и нагрузочном режиме работы диагностируемого механизма. Анализ спектра заключается в группировке по частотам его составляющих колебательных процессов при помощи фильтров (подобно настройке радиоприемников на соответствующую волну). Дефект выявляют по максимальному или среднему уровню колебательного процесса в полосе частот, обусловленной работой диагностируемого сопряжения по сравнению с нормативами (эталоны).

Двигатель допускается к эксплуатации при умеренном стуке клапанов, толкателей и распределительного вала на малых оборотах холостого хода. Если обнаружены стуки в шатунных и коренных подшипниках коленчатого вала, двигатель к эксплуатации не допускается. Стук коренных подшипников глухой, сильный, низкого тона. Стук шатунных подшипников — среднего тона, более звонкий, чем стук коренных подшипников. При выключении зажигания стук в

цилиндре проверяемого подшипника исчезает. Стук коренных подшипников прослушивается в плоскости разъема картера, а шатунных — на стенках блока цилиндров по линии движения поршня в местах, соответствующих верхней и нижней мертвым точкам.

Стуки клапанов звонкие, хорошо прослушиваются на прогретом двигателе при малых оборотах двигателя. Они возникают при увеличении тепловых зазоров между стержнями клапанов и носком коромысла (толкателем). Точность диагноза в значительной степени зависит от опыта механика.

1.3 Усилители

Усилитель является одним из основных узлов различной аппаратуры в устройствах автоматики, телемеханики, вычислительной и информационно-измерительной техники.

Усилитель — устройство для усиления входного сигнала (например, напряжения, тока или механического перемещения, колебания звуковых частот, давления жидкости или потока света), но без изменения вида самой величины и сигнала, до уровня достаточного для срабатывания исполнительного механизма (или регистрирующих элементов), за счёт энергии вспомогательного источника. Элемент системы управления (или регистрации и контроля).

Усиление — процесс преобразования энергии некоторого её источника при воздействии на него сигнала.

Усилитель низких частот — электрический прибор, предназначенный для усиления электрических сигналов, соответствующих слышимому человеком частотному диапазону

Усиление мощности сигнала осуществляется за счет потребления усилителем энергии от источника питания.

Усилители делятся на ряд типов по различным признакам. По роду усиливаемых электрических сигналов усилители можно разделить на две группы:

- усилители гармонических сигналов, предназначенные для усиления периодических сигналов различной величины и формы, гармонические составляющие которых изменяются много медленнее длительности устанавливающихся процессов в цепях усилителя.
- усилители импульсных сигналов, предназначенные для усиления непериодических сигналов, например непериодической последовательности электрических импульсов различной величины и формы.

По ширине полосы и абсолютным значениям усиливаемых частот усилители делятся на ряд следующих типов:

- усилители постоянного тока или усилители медленно меняющихся напряжений и токов, усиливающие электрические колебания любой частоты в пределах от низшей нулевой рабочей частоты до высшей рабочей частоты.
- усилители переменного тока, усиливающие колебания частоты от низшей границы до высшей, но неспособные усиливать постоянную составляющую сигнала.
- усилители высокой частоты (УВЧ), предназначенные для усиления электрических колебаний несущей частоты, например принимаемых приемной антенной радиоприемного устройства.
- усилители низкой частоты (УНЧ), предназначенные для усиления гармонических составляющих не преобразованного передаваемого или принимаемого сообщения.

1.4 Усилитель мощности

Усилители мощности предназначены для передачи больших мощностей сигнала без искажения в низкоомную нагрузку. Обычно они являются выходными каскадами многокаскадных усилителей. Основной задачей усилителя мощности является выделение в нагрузке возможно большей мощности. Как правило, простейший усилитель имеет один усилительный элемент (УЭ). Если необходимо большее усиление, УЭ соединяются каскадно. Пример показан на (рис.2).

Поскольку выходной каскад усилителя мощности работает с большими амплитудами сигналов, то при его анализе вследствие нелинейности ВАХ транзисторов пользоваться малосигнальной эквивалентной схемой нецелесообразно. Обычно в усилителях мощности используют графический (или графо-аналитический) метод расчета по входным и выходным характеристикам.

Основными показателями усилителя мощности являются: отдаваемая в нагрузку полезная мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент нелинейных искажений и полоса пропускания АЧХ. Величины и во многом определяются режимом покоя транзистора – классом усиления. Поэтому рассмотрим классы усиления, используемые в усилителях мощности.

Основной функцией усилителей мощности (УМ) является обеспечение в нагрузке заданного значения мощности; усиление по напряжению является второстепенным фактором, в результате УМ являются основными потребителями энергии источников питания. Для обеспечения высокого КПД

мощные выходные каскады работают в режиме класса В или АВ. Схемы строят двухтактными на транзисторах различного типа проводимости (комплементарных), включенных по схеме с ОК или с ОЭ.

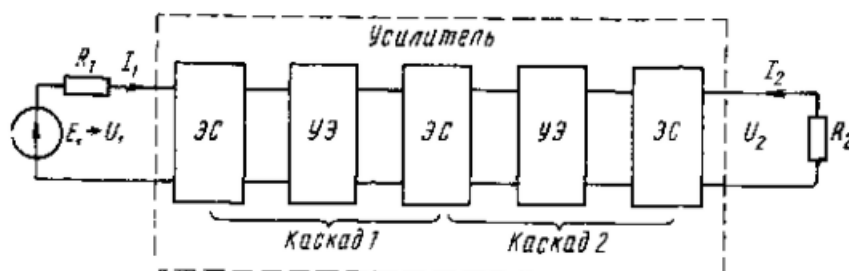


Рисунок 2

Каскад усиления – минимальная часть усилителя, сохраняющая свою функцию.

Для такого соединения общий коэффициент усиления определится как

$$K_{\text{общ}} = K_1 \cdot K_2$$

В микроэлектронике широко используются двухтактные бестрансформаторные усилители мощности, выполненные на комплементарных транзисторах (n-p-n и p-n-p-типа). Такие усилители мощности принято называть бустерами. Различают бустеры тока и напряжения. Если бустер тока предназначен для усиления тока, то бустер напряжения усиливает не только ток, но и напряжение. Поскольку усиление напряжения обычно, осуществляется предыдущими каскадами многоканального усилителя, наибольшее распространение получили выходные каскады в виде бустера тока. Необходимо отметить, что существенным недостатком бустера (рис. 2.36) является большой Кг (более 10%), что и ограничивает его использование на практике.

2. РАСЧЕТ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

2.1 Анализ технического задания

Источник сигнала: генератор, $E_{\text{г}}$, мВ – 100; $R_{\text{г}}$, кОм – 2;

Диапазон частот: $f_{\text{н}}$, Гц – 40; $f_{\text{в}}$, кГц – 16;

Выходная мощность, Вт – 6;

Сопротивление нагрузки, Ом – 3;

Коэффициент гармоник, %, не более – 1;

Вид аппаратуры - автомобильная;

Условия эксплуатации: температура среды -20...+40°C.

В данном курсовом проекте нужно разработать схему усилителя мощности, соответствующего заданным параметрам, который в будущем будет применяться в виброакустических испытаниях.

Проверяем, можно ли реализовать усилитель мощности с выходной мощностью согласно ТЗ при заданном входном напряжении. Для этого воспользуемся формулой максимальной мощности обычного двухтактного каскада при $U_{\text{ост}} = 2 \text{ В}$:

$$P_{\text{нmax}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{ист}}}{2} - U_{\text{ост}} \right)^2}{2R_{\text{н}}} = \frac{\left(\frac{13,2}{2} - 2 \right)^2}{2 \cdot 3} = 3,527 \text{ Вт.}$$

$P_{\text{нmax}} < P_{\text{н}}$

При заданном напряжении питания $P_{\text{нmax}}$ меньше указанного в ТЗ, необходимо применить трансформатор, мостовую схему или же повысить напряжение питания. Поскольку напряжение питания задано в ТЗ, в данной работе будет использована мостовая схема подключения, так как она не требует усложнения схемы усилителя, а достаточно лишь инвертора сигнала.

2.2 Выбор схемы УМ

Для построения усилителя мощности была выбрана типовая схема.

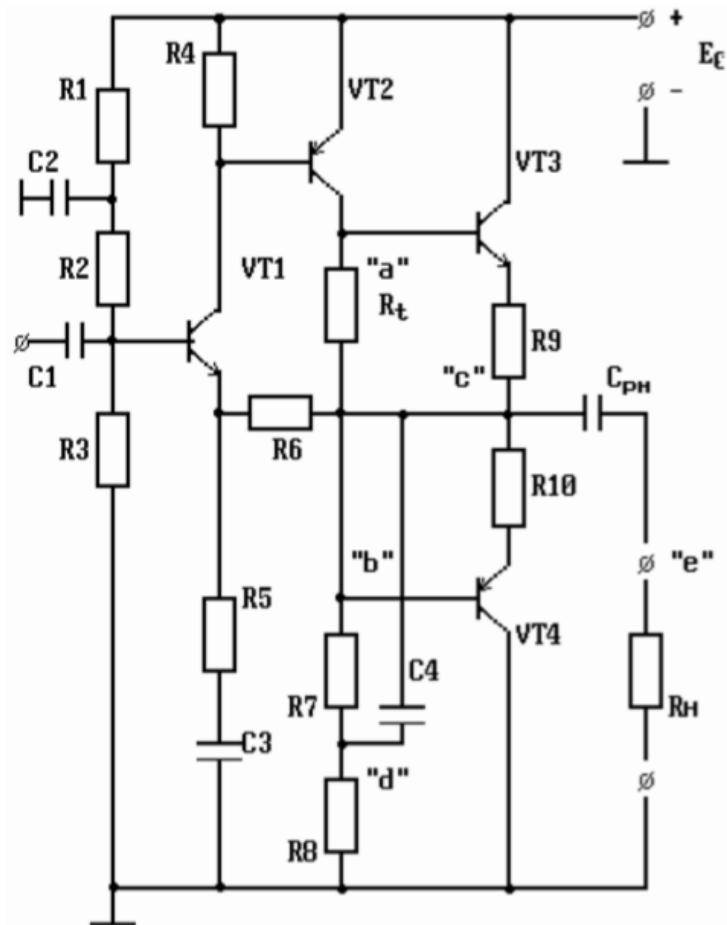


Рисунок 3 – Схема усилителя мощности

2.3 Выбор цепи термостабилизации

В процессе нагрева (охлаждения) параметры транзисторов могут значительно изменяться, для этого используется цепь термостабилизации, создающая смещение напряжения на базах транзисторов выходного каскада, чтобы компенсировать эти изменения.

Согласно ТЗ, усилитель будет использоваться при температурах от -20°C до +40°C. Такой температурный режим требует усложненную цепь термостабилизации.

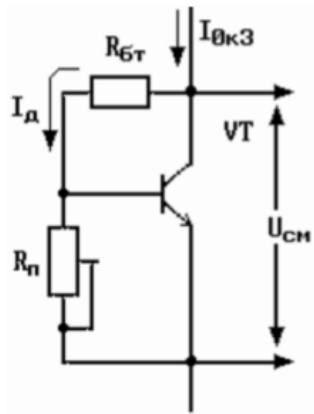


Рисунок 4 – Цепь термостабилизации

Теперь можно перейти к расчётам.

2.4 Расчет оконечного каскада

Номиналы всех резисторов и конденсаторов выбираются согласно ряду номиналов E_{24} . В дальнейших расчетах берётся этот стандартный номинал.

- 1) Определим амплитуду тока и напряжения на нагрузке требуемой от одного из усилителей мостовой схемы:

$$P_H = \frac{P_{HT3}}{4} = 1,5 \text{ Вт};$$

$$U_{nm} = \frac{\sqrt{2P_H R_H}}{2} = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,5 \cdot 3}}{2} = 1,5 \text{ В};$$

$$I_{km} = I_{nm} = \frac{U_{nm}}{R_H} = \frac{1,5}{3} = 0,5 \text{ А}.$$

- 2) Определяем максимальную мощность, рассеиваемую на коллекторах выходных транзисторов:

$$P_{к 3,4} = \frac{U_{ист}^2}{4\pi^2 R_H} = \frac{13,2^2}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 3} = 1,471 \text{ Вт}.$$

- 3) Определяем желаемый коэффициент усиления по току, при $P_H = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$:

$$h_{21 3,4} \geq \frac{P_H}{P_H} = \frac{1,5}{10 \cdot 10^{-3}} = 150.$$

- 4) Выбираем транзисторы оконечного каскада по следующим параметрам:

$$P_{к доп} \geq (1,1...1,2)P_{к 3,4}=1,2P_{к 3,4}=1,2 \cdot 1,471=1,765 \text{ Вт};$$

$$I_{к доп} \geq (1,1...1,3)I_{нм}=1,3I_{нм}=1,3 \cdot 0,5=0,65 \text{ А};$$

$$U_{кэ доп} \geq (1,1...1,3)U_{ист}=1,3U_{ист}=1,3 \cdot 13,2=17,16 \text{ В};$$

$$h_{21} \geq h_{21 3,4}=h_{21 \text{ треб}}=150;$$

$$f_{h21} \geq (2...5)f_{в}=5f_{в}=5 \cdot 10=50 \text{ кГц}.$$

Таблица 1 – Требования к характеристикам транзисторов оконечного каскада

$P_{к доп}, \text{Вт}$	$I_{к доп}, \text{А}$	$U_{кэ доп}, \text{В}$	h_{21}	$f_{h21}, \text{кГц}$
1,765	0,65	17,16	150	50

Таблица 2 – Характеристики транзисторов VT3 и VT4 [9, с. 27]

Модель	Тип	$U_{кэ \text{ max}}, \text{В}$	$I_{к \text{ max}}, \text{А}$	h_{21}	$f_{гр}, \text{МГц}$	$P_{р \text{ max}}, \text{Вт}$	$R_{t \text{ пс}}, \text{Ом}$
Т1Р35А	n-p-n	80	6,9	256	3	125	35,7
Т1Р36А	p-n-p	-80	6,9	256	3	125	35,7

5) Проверим, смогут ли транзисторы оконечного каскада нормально работать без дополнительного теплоотвода:

$$P_{к доп} = \frac{t_{п \text{ max}} - t_{с \text{ max}}}{R_{t \text{ пс}}} = \frac{150-40}{35,7} = 3,08 \text{ Вт}.$$

$$P_{к доп} > P_{к 3,4} \cdot (1)$$

На основании неравенства (1), VT3 и VT4 могут работать в данной цепи без дополнительного теплоотвода.

6) Определим постоянный ток и мощность, потребляемую оконечным каскадом от источника питания, и коэффициент полезного действия:

$$I_0 = \frac{I_{нм}}{2} = 0,25 \text{ А};$$

$$P_0 = I_0 \cdot U_{пит} = 0,25 \cdot 13,2 = 3,3 \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{P_{н}}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1,5}{3,3} \cdot 100\% = 45,45\%.$$

7) Рассчитаем амплитуду тока базы выходных транзисторов:

$$I_{6m3} = \frac{I_{nm}}{h_{21эКВ}} = \frac{0,5}{256} = 1,953 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

8) Рассчитаем входное сопротивление оконечного каскада:

$$R_{вх} \gg (1 + h_{21эКВ}) R_H = (1 + 256) \cdot 3 = 771 \text{ Ом.}$$

9) Рассчитаем напряжение смещения, где падение напряжения $U_{63} = 0,6 \text{ В}$:

$$U_{см} = U_{633} + U_{634} = 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ В.}$$

10) Рассчитаем сопротивление резисторов R_9 и R_{10} :

$$R_9 = R_{10} = (0,05 \dots 0,1) R_H = 0,1 R_H = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ Ом;}$$

$$R_9 = R_{10} = 0,3 \text{ Ом.}$$

2.5 Расчёт предоконечного каскада

1) Рассчитаем ток покоя:

$$I_{0к2} \geq (3 \dots 5 \dots 10) I_{6m3} = 10 I_{6m3} = 10 \cdot 2,255 \cdot 10^{-3} = 0,0195 \text{ А.}$$

2) Рассчитываем сопротивление резистора R_8 :

$$R_8 = (30 \dots 50) R_H = 30 R_H = 30 \cdot 3 = 90 \text{ Ом;}$$

$$R_8 = 91 \text{ Ом.}$$

3) Рассчитываем сопротивление резистора R_7 :

$$R_7 = \frac{\frac{U_{ист}}{2} - U_{634} - I_{0к2} \cdot R_8}{I_{0к2}} = \frac{\frac{13,2}{2} - 0,6 - 0,0195 \cdot 91}{0,0195} = 216,7 \text{ Ом;}$$

$$R_7 = 220 \text{ Ом.}$$

4) Выбираем VT2 по следующим параметрам:

$$P_{к доп} > (1,2 \dots 1,5) P_{к2} = 1,5 \cdot \frac{U_{ист} I_{0к2}}{2} = 1,5 \cdot \frac{13,2 \cdot 0,0195}{2} = 0,193 \text{ Вт};$$

$$I_{к доп} \geq (1,1 \dots 1,3) I_{к2 max} = 1,3(I_{0к2} + I_{бм3}) = 1,3(0,0195 + 1,953 \cdot 10^{-3}) = 0,028 \text{ А};$$

$$U_{кэ доп} \geq (1,1 \dots 1,3) U_{ист} = 1,3 U_{ист} = 17,06 \text{ В};$$

$$f_{h21} \geq (2 \dots 3) f_{в} = 3 f_{в} = 3 \cdot 10 = 30 \text{ кГц}.$$

Таблица 3 – Требования к характеристикам транзистора предоконечного каскада

$P_{к доп}, \text{ Вт}$	$I_{к доп}, \text{ А}$	$U_{кэ доп}, \text{ В}$	$f_{h21}, \text{ кГц}$
0,193	0,028	17,06	30

Для данного участка цепи подходит транзистор 2N4402 [8, с. 27].

Таблица 4 – Характеристики транзистора

Модель	Тип	$U_{кэ max}, \text{ В}$	$I_{к max}, \text{ А}$	h_{21}	$f_{гр}, \text{ МГц}$	$P_{р max}, \text{ Вт}$
2N4402	р-п-р	-40	-0,6	150	200	0,625

5) Расчёт цепи смещения:

а) Находим ток делителя:

$$I_{д} = (0,1 \dots 0,3) I_{0к2} = 0,3 \cdot 0,0195 = 5,85 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

б) Находим допустимый ток транзистора VTt:

$$I_{к доп} = (1,1 \dots 1,3) I_{к2 max} = 1,3 I_{к2 max} = 1,3 \cdot 0,0215 = 0,028 \text{ А}.$$

Для данного участка цепи подходит транзистор 2N699 [10, с.27].

Таблица 5 – Характеристики транзистора

Модель	Тип	$U_{кэ max}, \text{ В}$	$I_{к max}, \text{ А}$	h_{21}	$f_{гр}, \text{ МГц}$	$P_{р max}, \text{ Вт}$
2N699	п-р-п	80	0,15	89	50	0,6

в) Определяем $R_{бт}$, при $U_{бэт} = 0,6 \text{ В}$:

$$R_{\text{бт}} = \frac{U_{\text{бэт}}}{I_{\text{д}}} = \frac{0,6}{5,85 \cdot 10^{-3}} = 102,56 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{бт}} = 100 \text{ Ом}.$$

г) Определяем $R_{\text{п}}$, учитывая, что номинальный режим соответствует среднему положению движка:

$$R_{\text{п}50\%} = 2 \cdot \frac{U_{\text{см}} - U_{\text{бэт}}}{I_{\text{д}}} = 2 \cdot \frac{1,2 - 0,6}{5,85 \cdot 10^{-3}} = 205,13 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{п}} = 200 \text{ Ом}.$$

6) Определяем входное сопротивление предоконечного каскада:

$$R_{\text{вх}2} = h_{21\text{э}2} \gg r_{\text{э}2} \cdot h_{21\text{э}2}, \text{ где } r_{\text{э}2} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{0\text{э}2}}, I_{0\text{э}2} \gg I_{0\text{к}2};$$

$$R_{\text{вх}2} \gg \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{0\text{к}2}} \cdot h_{21\text{э}2} = \frac{0,025}{0,0195} \cdot 150 = 192,31 \text{ Ом}.$$

7) Определяем коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_{\text{пок}} = \frac{h_{21\text{э}2} R_{\text{н}}}{r_{\text{э}2}} = \frac{h_{21\text{э}2} R_{\text{н}} I_{0\text{к}2}}{\varphi_{\text{T}}} = \frac{256 \cdot 3 \cdot 0,0195}{0,025} = 599.$$

2.6 Расчёт входного каскада

1) Задаём постоянный ток коллектора транзистора VT1:

$$I_{0\text{к}1} = (5 \dots 10) I_{\text{бм}2} = 10 \cdot \frac{I_{\text{к}2\text{max}}}{h_{212}} = 10 \cdot \frac{0,0215}{150} = 1,433 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

2) Выбираем VT1 по следующим параметрам:

$$I_{\text{к доп}} \geq (1,1 \dots 1,3) I_{0\text{к}1} = 1,3 I_{0\text{к}1} = 1,3 \cdot 1,433 \cdot 10^{-3} = 1,863 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$f_{\text{h}21} \geq (5 \dots 10) f_{\text{б}} = 10 f_{\text{б}} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ кГц}.$$

Таблица 6 – Требования к характеристикам транзистора входного каскада

$I_{к доп}, A$	$f_{h21}, кГц.$
$1,863 \cdot 10^{-3}$	100

Для данного участка цепи подходит транзистор 2N4400 [8, с.27]

Таблица 7 – Характеристики транзистора

Модель	Тип	$U_{кэ max}, B$	$I_{к max}, A$	h_{21}	$f_{гр}, МГц.$	$P_{p max}, Вт$
2N4400	n-p-n	40	0,6	173	200	0,625

3) Рассчитываем сопротивление резистора R_4 , при $U_{06э2}=0,6 B$:

$$R_4 = \frac{U_{06э2}}{I_{0к1} - I_{06э2}} = \frac{0,6}{1,433 \cdot 10^{-3} - \frac{0,0195}{173}} = 454,45 \text{ Ом};$$

$$R_4 = 470 \text{ Ом.}$$

4) Расчет цепи обратной связи:

Для нахождения коэффициента обратной связи воспользуемся формулой:

$$\beta = \frac{R_{эКВ}}{R_6 + R_{эКВ}} \cdot \frac{r_{э1}}{R_{эVT1}}.$$

Найдем эквивалентное сопротивление $R_{эКВ}$ и сопротивление эмиттера транзистора $R_{эVT1}$ по следующей формуле:

$$R_{эКВ} = \frac{R_{эVT1} \cdot R_5}{R_{эVT1} + R_5};$$

$$R_{эVT1} = \frac{R_{эг} + h_{11}}{1 + h_{21}}, \text{ где } h_{21} \text{ и } h_{11} = r'_6 + (1 + h)r_{э1} - \text{параметры транзистора VT1.}$$

Сопротивление $R_{эг}$ является сопротивлением между базой транзистора VT1 и землёй по переменному току. Формула для расчёта:

$$R_{\text{эГ}} = \frac{R_{\text{Г}} \cdot R_2 \cdot R_3}{(R_{\text{Г}} \cdot R_2) + (R_{\text{Г}} \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}.$$

Формула для расчёта коэффициента петлевого усиления:

$$K_{\text{П}} = \beta \cdot K_{\text{ВК}} \cdot K_{\text{ПОК}} \cdot K_{\text{ОК}}, \text{ где } K_{\text{ОК}} = 1.$$

Определим ток базового делителя:

$$I_{\text{д1}} = (5 \dots 10) \frac{I_{0\text{к1}}}{h_{21}} = 10 \frac{I_{0\text{к1}}}{h_{21}} = 10 \cdot \frac{1,433 \cdot 10^{-3}}{173} = 8,28 \cdot 10^{-5} \text{ А.}$$

Определим падение напряжения на резисторе R_1 :

$$\Delta E_{0\text{R1}} = (0,1 \dots 0,3) U_{\text{ист}} = 0,3 U_{\text{ист}} = 0,3 \cdot 13,2 = 3,96 \text{ В.}$$

Зададимся значением R_6 :

$$R_6 \geq (20 \dots 100) R_{\text{н}} = 20 \cdot R_{\text{н}} = 20 \cdot 3 = 60 \text{ Ом.}$$

Сопротивление R_6 выбирается достаточно большим, чтобы не создавать дополнительной нагрузки для окончного каскада. Найдем предельный номинал для резистора R_6 . Проверим напряжение на коллекторном переходе транзистора VT1. Для нормальной работы перехода необходимо, чтобы $U_{\text{кб1}} \geq 2 \dots 3 \text{ В}$:

$$\begin{aligned} U_{\text{кб1}} &= U_{\text{к1}} - U_{0\text{б1}}; \\ 3 \text{ В} &\leq U_{\text{к1}} - U_{0\text{б1}} = U_{\text{ист}} - U_{0\text{б32}} - U_{0\text{б1}} = 13,2 - 0,6 - U_{0\text{б1}}; \\ 9,6 \text{ В} &\geq U_{0\text{б1}} = I_{0\text{э1}} \cdot R_6 + U_{0\text{б31}} + \frac{U_{\text{ист}}}{2}; \\ R_6 &\leq 653,773 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Учитывая условия определим номинал резистора

$$\begin{aligned} 653,773 &\geq R_6 \geq 60 \text{ Ом}; \\ R_6 &= 62 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Определим постоянный потенциал базы VT1:

$$U_{0\text{б1}} = I_{0\text{э1}} \cdot R_6 + U_{0\text{б31}} + \frac{U_{\text{ист}}}{2} = 1,433 \times 10^{-3} \cdot 62 + 0,6 + \frac{13,2}{2} = 7,29 \text{ В.}$$

Проверим напряжение на коллекторном переходе транзистора VT1. Для нормальной работы перехода необходимо, чтобы $U_{кб1} \geq 2...3 \text{ В}$:

$$U_{кб1} = U_{к1} - U_{об1} = U_{ист} - U_{обэ2} - U_{об1} = 13,2 - 0,6 - 7,29 = 5,31 \text{ В.}$$

Условие полностью соблюдено, а значит номинал резистора R_6 выбран правильно.

Определим сопротивление R_3 , R_2 и R_1 :

$$R_3 = \frac{U_{об1}}{I_{д1}} = \frac{7,29}{8,28 \cdot 10^{-5}} = 8,8 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 91 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{U_{ист} - U_{об1} - \Delta E_{об1}}{I_{д1}} = \frac{13,2 - 7,29 - 3,96}{8,28 \cdot 10^{-5}} = 2,355 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 24 \text{ кОм};$$

$$R_1 = \frac{\Delta E_{об1}}{I_{д1}} = \frac{3,96}{8,28 \cdot 10^{-5}} = 4,782 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$R_1 = 47 \text{ кОм.}$$

Определим коэффициент усиления входного каскада:

$$K_{вк} = S_i \cdot R_{кн1} = \frac{1}{r_{э1}} \cdot \frac{R_4 \cdot R_{вх2}}{R_4 + R_{вх2}} = \frac{I_{ок1}}{\Phi_T} \cdot \frac{R_4 \cdot R_{вх2}}{R_4 + R_{вх2}} = \frac{1,433 \cdot 10^{-3}}{0,025} \cdot \frac{470 \cdot 192,31}{470 + 192,31} = 7,822.$$

Определим сопротивление $R_{эг}$:

$$R_{эг} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)} = \frac{5000 \cdot 22000 \cdot 82000}{(5000 \cdot 22000) + (5000 \cdot 82000) + (22000 \cdot 82000)} = 1,81 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Определим коэффициент h_{11} транзистора VT1:

$$h_{11} = r_{б1} + (1 + h_{21})r_{э1} = \frac{\Phi_T h_{21}}{I_{ок1}} + (1 + h_{21}) \frac{\Phi_T}{I_{ок1}} = \frac{0,025 \cdot 173}{1,433 \cdot 10^{-3}} + (1 + 173) \frac{0,025}{1,433 \cdot 10^{-3}} = 6,05 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Определим выходное сопротивление транзистора со стороны эмиттера $R_{эVT1}$:

$$R_{эVT1} = \frac{R_{эг} + h_{11}}{1 + h_{21}} = \frac{1,81 \cdot 10^3 + 6,05 \cdot 10^3}{1 + 173} = 45,172 \text{ Ом.}$$

Определим сопротивление R_5 , где $k_{г\text{ок}} = 20\%$:

$$R_5 = \frac{\left(\frac{k_{\Gamma \text{ OK}}}{k_{\Gamma \text{ зад}}} - 1\right) R_{\text{эVT1}} R_6}{R_{\text{кн1}} K_{\text{пок}} - \left(\frac{k_{\Gamma \text{ OK}}}{k_{\Gamma \text{ зад}}} - 1\right) (R_{\text{эVT1}} + R_6)} =$$

$$= \frac{\left(\frac{k_{\Gamma \text{ OK}}}{k_{\Gamma \text{ зад}}} - 1\right) R_{\text{эVT1}} R_6}{\frac{R_4 \cdot R_{\text{BX2}}}{R_4 + R_{\text{BX2}}} \cdot K_{\text{пок}} - \left(\frac{k_{\Gamma \text{ OK}}}{k_{\Gamma \text{ зад}}} - 1\right) (R_{\text{эVT1}} + R_6)} = 1,4 \text{ Ом};$$

$$R_5 = 1,5 \text{ Ом}.$$

Определим эквивалентное сопротивление $R_{\text{эKB}}$:

$$R_{\text{эKB}} = \frac{R_{\text{эVT1}} \cdot R_5}{R_{\text{эVT1}} + R_5} = \frac{53,054 \cdot 4,7}{53,054 + 4,7} = 4,452 \text{ Ом}.$$

Определим глубину обратной связи F :

$$F = 1 + \frac{R_{\text{эKB}}}{R_{\text{эKB}} + R_6} \cdot \frac{R_{\text{кн1}}}{R_{\text{эVT1}}} \cdot K_{\text{пок}} = 1 + \frac{R_{\text{эKB}}}{R_{\text{эKB}} + R_6} \cdot \frac{\frac{R_4 \cdot R_{\text{BX2}}}{R_4 + R_{\text{BX2}}}}{R_{\text{эVT1}}} \cdot K_{\text{пок}} =$$

$$= 1 + \frac{4,318}{4,318 + 68} \cdot \frac{390 \cdot 191,773}{53,054} \cdot 692,82 = 42,411.$$

5) Находим входное сопротивление каскада на транзисторе VT1:

$$R_{\text{BX BK}} = \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot (h_{11} + (1 + h_{21}) R_5) F}{(R_2 \cdot R_3) + (R_2 \cdot (h_{11} + (1 + h_{21}) R_5) F) + (R_3 \cdot (h_{11} + (1 + h_{21}) R_5) F)} =$$

$$= 17,733 \text{ кОм}.$$

6) Рассчитываем величины ёмкостей конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 и C_{PH} :

$$C_1 = \frac{5 \dots 10}{2\pi f_{\text{H}} R_1} = \frac{5}{2\pi f_{\text{H}} R_1} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 47000} = 3,388 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = \frac{5 \dots 10}{2\pi f_{\text{H}} R_5} = \frac{5}{2\pi f_{\text{H}} R_5} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 1,4} = 113,74 \text{ мФ};$$

$$C_3 \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_{\text{H}} R_8} = \frac{5}{2\pi f_{\text{H}} R_8} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 91} = 1,75 \text{ мФ};$$

$$C_{\text{PH}} = \frac{5 \dots 10}{2\pi f_{\text{H}} R_{\text{H}}} = \frac{5}{2\pi f_{\text{H}} R_{\text{H}}} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 3} = 53 \text{ мФ}.$$

Таблица 8 – Номиналы емкостей усилителя мощности

C_1 , мкФ	C_2 , мФ	C_3 , мФ	C_{pH} , мФ
3,388	113,74	1,75	53

Таблица 9 – Номиналы резисторов усилителя мощности

R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	R_7 , Ом	R_8 , Ом	R_9 , Ом	R_{10} , Ом
47	24	91	470	1,5	62	220	91	0,3	0,3

2.7 Выбор и расчёт инвертирующей схемы

Инвертирующая схема нужна для работы усилителя, собранного по мостовой схеме, чтобы из одного сигнала генератора получить два сигнала, разность фаз между которыми 180° .

1) Зададимся током коллектора транзистора VTi. Для оптимального режима работы схемы достаточно малого тока коллектора:

$$I_{0ki} \geq 1 \text{ мА.}$$

2) Выбираем VTi по следующим параметрам:

$$I_{к доп} \geq (1,1 \dots 1,3) I_{0ki} = 1,3 I_{0ki} = 1,3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ А;}$$

$$f_{h21} \geq (5 \dots 10) f_B = 10 f_B = 10 \cdot 10 = 100 \text{ кГц.}$$

Таблица 10 – Требования к характеристикам транзистора входного каскада

$I_{к доп}$, мА	f_{h21} , кГц.
1,3	100

Для данного участка цепи подходит транзистор 2N699 [10, с.27]

Таблица 11 – Характеристики транзистора

Модель	Тип	$U_{кэ max}$, В	$I_{к max}$, А	h_{21}	$f_{гр}$, МГц.	$P_{p max}$, Вт
2N699	n-p-n	80	0,5	89	100	0,85

3) Определим номиналы резисторов R_{11} и R_{12} учитывая, что ток коллектора должен быть не меньше 1 мА:

$$R_{11}=R_{12} \leq \frac{U_{ист}}{2I_{0ки}} = \frac{13,2}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \text{ кОм};$$

$$R_{11}=R_{12}=6,8 \text{ кОм}.$$

4) Определим ток коллектора и базы транзистора VT1:

$$I_{0ки} = \frac{U_{ист}}{2R_{11}} = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$I_{0би} = \frac{I_{0ки}}{h_{21}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{89} = 18,989 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

5) Определим номиналы резисторов R_{13} и R_{14} :

$$R_{13}=R_{14} = \frac{U_{ист}}{2I_{0би}} = \frac{13,2}{2 \cdot 18,989 \cdot 10^{-6}} = 34,76 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$R_{13}=R_{14}=330 \text{ кОм}.$$

6) Определим коэффициент h_{11} транзистора VT1:

$$h_{11} = r_{б1} + (1+h_{21})r_{э1} = \frac{\varphi_T h_{21}}{I_{0ки}} + (1+h_{21}) \frac{\varphi_T}{I_{0ки}} = \frac{0,025 \cdot 89}{0,97 \cdot 10^{-3}} + (1+89) \frac{0,025}{0,97 \cdot 10^{-3}} = 4,613 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

7) Определим входное сопротивление инвертора:

$$R_{вх и} = \frac{R_{13} \cdot R_{14} \cdot h_{11}}{(R_2 \cdot R_3) + (R_2 \cdot h_{11}) + (R_3 \cdot h_{11})} = 2,656 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

8) Расчет номиналов конденсаторов C_g , C_{vh1} , и C_{vh2}

$$C_g \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_H R} = \frac{5}{2\pi f_H (R_{вх и} + R_r)} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (2,656 \cdot 10^3 + 2000)} = 3,42 \text{ мкФ};$$

$$C_{vh1} = C_{vh2} \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_H R} = \frac{5}{2\pi f_H R_{вх вк}} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,7733 \cdot 10^4} = 9,83 \text{ мкФ}.$$

Таблица 12 – Номиналы емкостей инвертирующей цепи

C_g , мкФ	C_{vh1} , мкФ	C_{vh2} , мкФ
3,42	10	10

Таблица 13 – Номиналы резисторов инвертирующей цепи

R_{11} , кОм	R_{12} , кОм	R_{13} , кОм	R_{14} , Ом
6,8	6,8	330	330

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проверка работоспособности и исследования схема были проведены в программе MicroCap12.

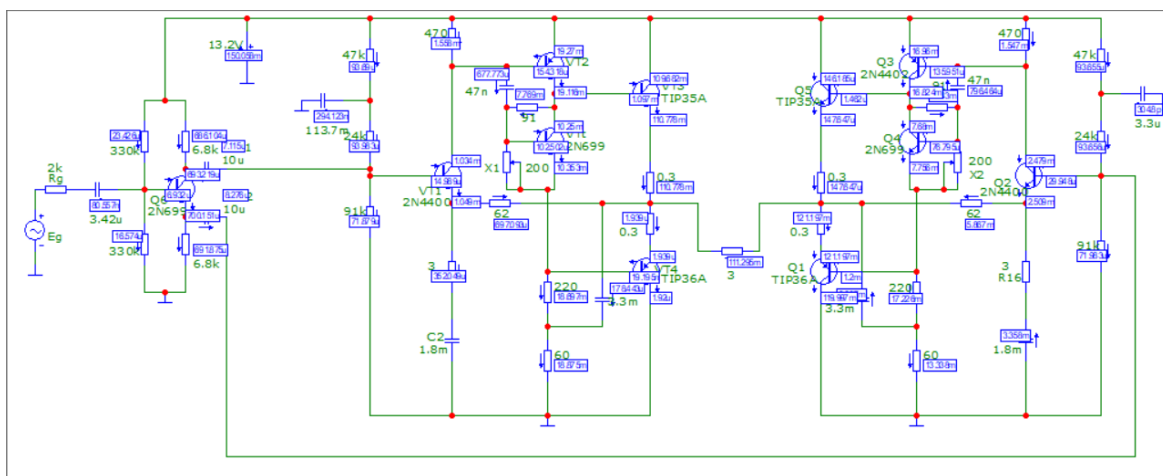


Рисунок 5 – полный базис токов схемы

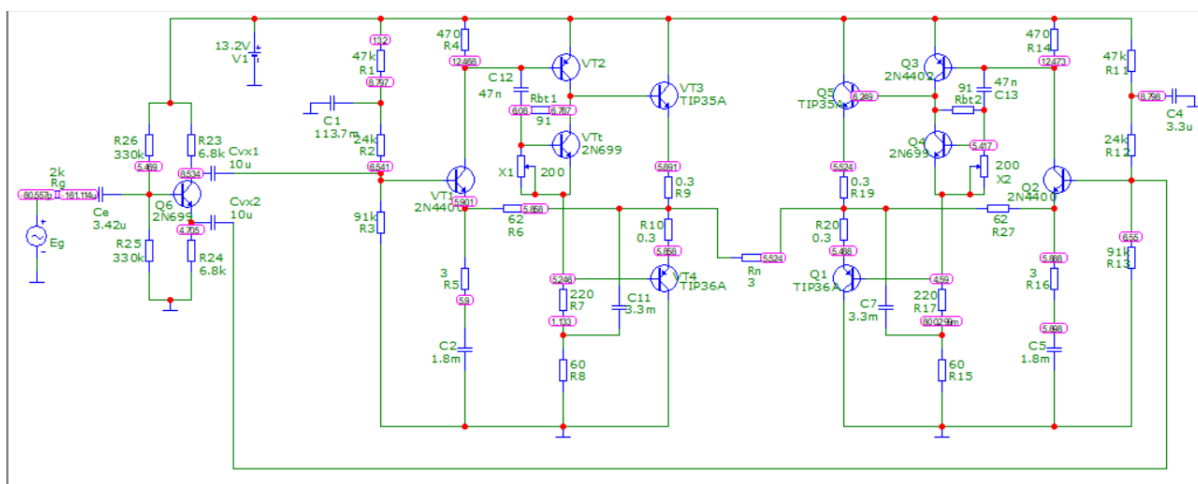


Рисунок 6 – полный базис напряжений схемы

3.1 Амплитудно-частотная характеристика

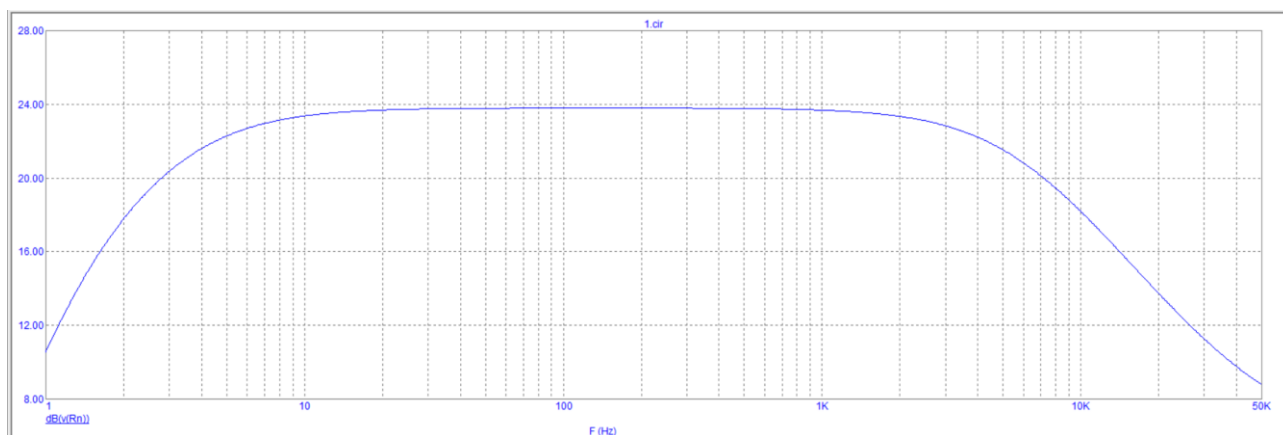


Рисунок 7 – АЧХ при +40°C

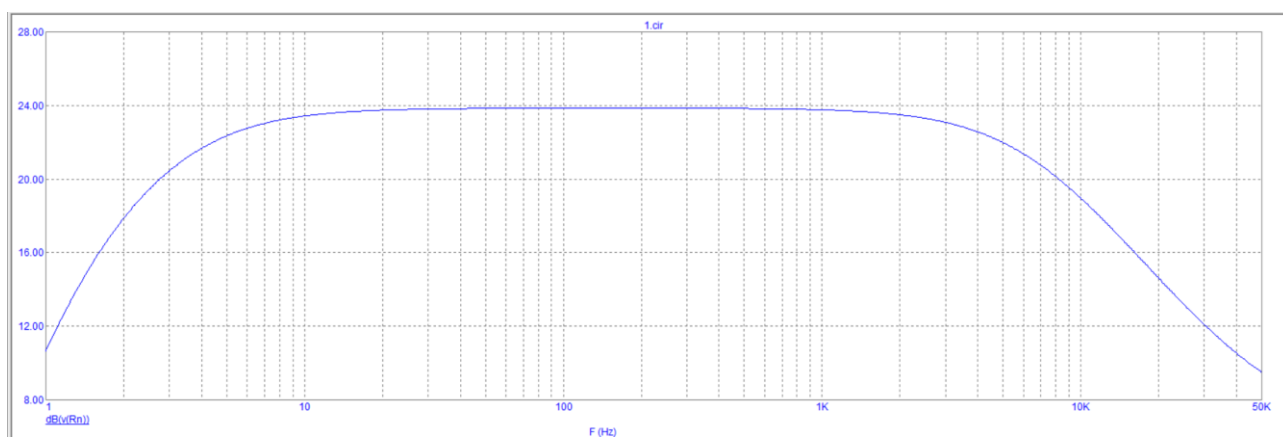


Рисунок 8 – АЧХ при -20°C

Как видно из графиков, коэффициент усиления практически не изменился при изменении температуры из чего можно сделать вывод, что цепь термостабилизации полностью выполняют свою задачу.

3.2 Исследование схемы THD vs POUT (Harmonic distortion)

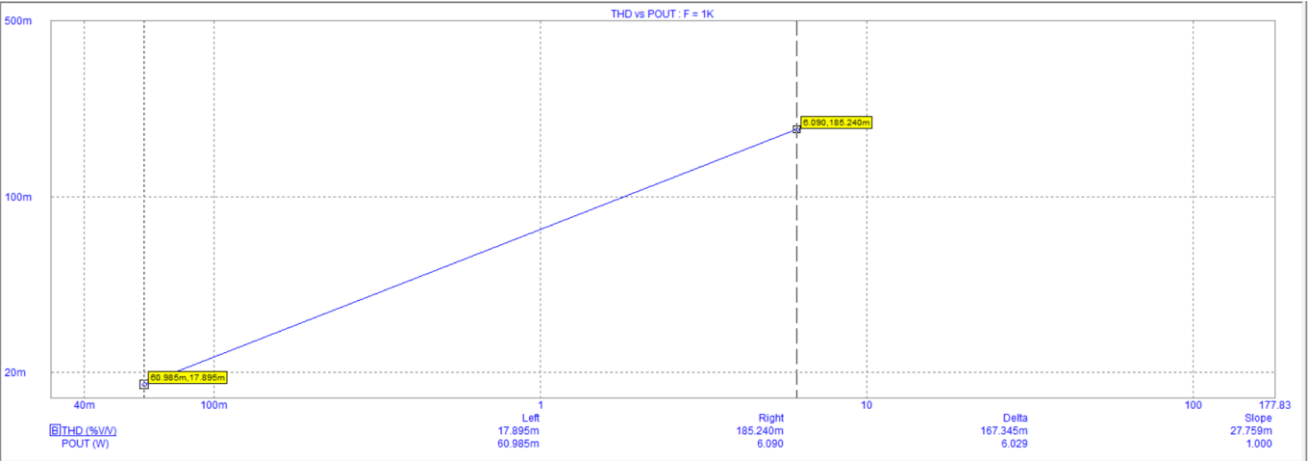


Рисунок 9 – THD vs POUT при +40°C

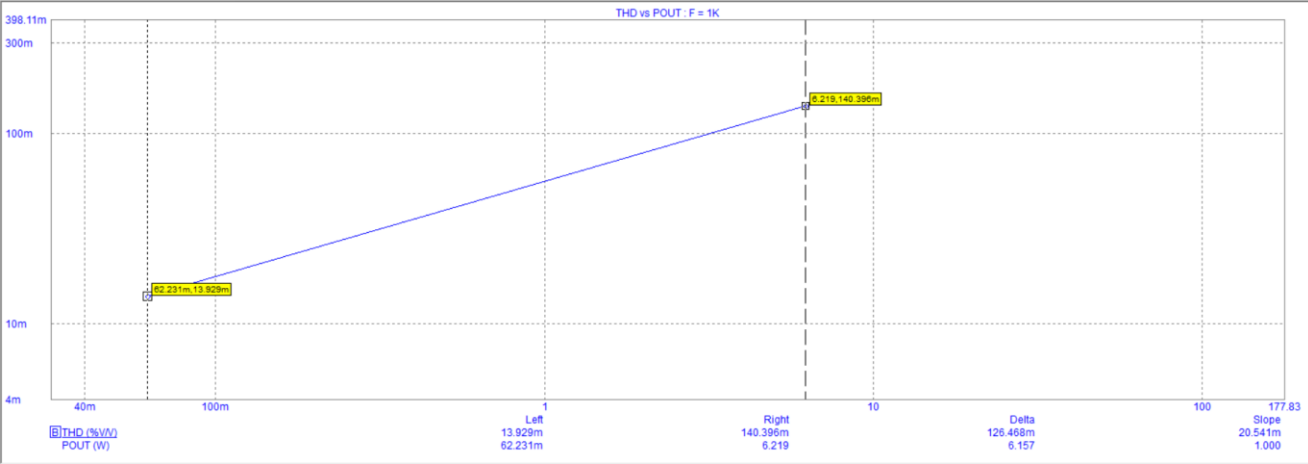


Рисунок 10 – THD vs POUT при -20°C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых выше расчётов и автоматизированного моделирования схемы, была разработана принципиальная схема УМ для виброакустических испытаний для автоаппаратуры. Несмотря на кажущуюся сложность и дорогую сборку, схема имеет относительно невысокий коэффициент гармоник, способна питаться от бортовой сети автомобиля средним напряжением 13.2В, а также выполняет свою задачу, т.е. отдаёт мощность 6 Вт в относительно малую нагрузку 3 Ом в заданном диапазоне температур, что позволяет внедрять данную схему в использование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТП П-01 2008 (Дипломные проекты (работы): общие требования. – Введ. 2009-02.01. – Утв. С изм. 24.12.2009. – Минск: БГУИР, 2010. – 176с.)
2. Крушев В.Т; Попов Э.Г.; Шатило Н.И. Методическое пособие по проведению курсового проектирования по курсу "Аналоговые электронные устройства" для студентов специальности "Радиотехника" и "Радиотехнические системы" – Минск: БГУИР, 1997.
3. Э.Г.Попов. Основы аналоговой техники.
4. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства. -М.: Радио и связь, 1983.
5. Резисторы:Справочник/В.В.Дубровский Д.М.Иванов, Н.Я.Пратусевич и др.;под общ.ред. И.И.Четверткова и В.М.Терехова. - М.: Радио и связь, 1987.
6. С.В.Триполитов, А.В.Ермилов. Микросхемы, диоды, транзисторы: Справочник. -М.: Машиностроение,1994.
7. Brüel & Kjær: виброакустические испытания.
<https://www.bksv.com/ru/knowledge/applications/vibration-testing>
8. Даташиты транзистора 2N4402, 2N4400
https://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=2N4402
9. Даташиты транзисторов TIP35A, TIP36A
https://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=TIP35A
10. Даташиты 2N699
https://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=2N699
- 11.А.П.Курулёв. Теория электрических цепей. Справочник в 3-х частях. Часть 1. Электрические цепи постоянного и переменного тока. – Минск:БГУИР, 2012.
- 12.ГОСТ 2.001-2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения.
- 13.ГОСТ 2.051-2013. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения.
- 14.ГОСТ 2.304-81. Единая система конструкторской документации. Шрифты чертёжные.
- 15.ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.
- 16.ГОСТ 2.728-74. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы.
- 17.ГОСТ 2.728-74. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники.