Міністерство освіти та науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

радіотехнічних систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: *"Підсилювач низької частоти"*

(назва теми)

(назва теми)

(назва теми)

Виконав (ла): студент (ка) *IV* курсу групи *РАс-41*

спеціальності: *172 "Телекомунікації та радіотехніка"*

(шифр і назва напряму підготовки)

		Форгель В.С.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник:		*Лесів В.В.*
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль:		*Марценюк А.С.*
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри:		*Дунець В.Л.*
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент:		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль 20 *21*

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет: *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*

(повна назва факультету)

Кафедра: *радіотехнічних систем*

(повна назва кафедри, циклової комісії)

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Завідувач кафедри

_____ *Дунець В.Л.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

" " *червня* 20 *21* р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня: *бакалавр*

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю: *172 "Телекомунікації та радіотехніка"*

(назва освітнього ступеня)

студенту: *Форгель Віталію Сергійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема: *"Підсилювач низької частоти"*

Керівник роботи: *Лесів Володимир Васильович, ст. викл.*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджена наказом ректора від " *31* " *травня* 20 *21* року № *4/7-435*

2 Термін подання студентом завершеної роботи: *25 червня 2021 р.*

3 Вихідні дані роботи: *Вихідна потужність, Вт* *150;*

Коефіцієнт нелінійних спотворень (TND), % *0,04;*

Чутливість по входу, мВ *250;*

Рівень інтермодуляційних спотворень (IMD), дБ *±1,5;*

4 Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 *Проектування та рахунок схеми електричної структурної*

2 *Проектування та рахунок схеми електричної принципової*

3 *Проектування друкованого вузла*

4 *Безпека життєдіяльності, основи охорони праці*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

5 *Схема електрична структурна (обов'язкове)*

6 *Схема електрична принципова (обов'язкове)*

7 *Друкований вузол (деталь) (обов'язкове)*

8 *Складальне креслення друкованого вузла (обов'язкове)*

9 *Технічні показники (плакат)*

6 Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис (дата)	
		завдання	
		видав	прийняв

Дата видачі завдання “ *31* ” *травня* 20 *21* р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1	*Розробка та затвердження технічного завдання*		
2	*Аналіз технічного завдання, підбір бібліографічних*		
	матеріалів, необхідних для виконання роботи		
3	*Розробка та розрахунок схеми електричної структурної*		
4	*Розробка та розрахунок схеми електричної принципової*		
5	*Проектування конструкторське*		
6	*Безпека життєдіяльності, основи охорони праці*		
7	*Нормоконтроль*		
8	*Попередній захист кваліфікаційної роботи*		
9	*Захист кваліфікаційної роботи*		

Студент _____ *Форгель В.С.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Лесів В.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Тема кваліфікаційної роботи: “Підсилювач низької частоти” // Кваліфікаційна робота бакалавра // Форгель Віталій Сергійович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра радіотехнічних систем, група РАс-41 // Тернопіль, 2021 // с. – 57, рис. – 28, табл. – 1, бібліографія – 16, креслення – 5.

Ключові слова: ДЗЕРКАЛО СТРУМУ, ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, НЕЛІНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ, ЧУТЛИВІСТЬ.

Проведено аналіз схемотехнічної реалізації аналогових підсилювачів потужності. Обґрунтовано вибір та розрахунок схеми електричної структурної. Вхідний каскад реалізовано на дзеркалі струму. Розроблено схему електричну принципову та проведено розрахунок її каскадів.

За проектований підсилювач має наступні технічні характеристики: вихідна потужність 150 Вт, коефіцієнт нелінійних спотворень (TND) 0,04%, чутливість по входу 250 мВ, рівень інтермодуляційних спотворень (IMD) ±1,5 дБ.

Annotation

Work qualification theme: “Low frequency amplifier” // Bachelor qualification work // Forhel Vitalii Serhiiovych // Ivan Pulyuj Ternopil National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Radio Engineering Systems Department, group RAs-41 // Ternopil 2021 // p. – 57, fig. – 28, table – 1, bibliography – 16, drawing – 5.

Keywords: CURRENT MIRROR, DYNAMIC RANGE, DISCRETIZATION, DYNAMIC RANGE, COEFFICIENT OF GAIN, PERIOD, NONLINEAR DISTORTION, SENSITIVITY.

The analysis of circuit realization of analog power amplifiers is carried out. The choice and calculation of the electrical structural scheme is substantiated. The input stage is implemented on a current mirror. The basic electric scheme is developed and its cascades are calculated.

The designed amplifier has the following technical characteristics: output power 150 W, nonlinear distortion factor (TND) of 0.04%, input sensitivity 250 mV, intermodulation distortion level (IMD) ± 1.5 dB.

Зміст

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів 7
Вступ 8
1 Основна частина 9
1.1 Аналіз технічного завдання 9
1.2 Проектування схеми структурної електричної 12
1.2.1 Проектування і розрахунок схеми структурної електричної 12
1.3.1 Розрахунок операційного підсилювача 17
1.3.2 Розрахунок параметрів двотактного диференціального каскаду 29
1.3.3 Диференціальний каскад 33
1.3.4 Розрахунок генератора струму 35
1.4 Вибір і обґрунтування компонентної бази 45
1.4.1 Компоновка друкованого вузла пристрою (вузла) 45
2 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці 47
2.1 Актуальність безпеки життєдіяльності людини 47
2.2 Законодавча та нормативно-правова база з охорони праці 49
Висновки 52
Список використаних джерел 53
Додатки 55

					ФВС3.023.010 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Форгель В.С.			Підсилювач низької частоти	Літ.	Арк. 6 / Аркушів 50
Перевір.		Лесів В.В.					
Реценз.						ТНТУ імені Івана Пулюя, ФПТ, каф. РТ, гр. РАс-41	
Н. Контр.		Марценюк А.С.			Пояснювальна записка		
Затверд.		Дунець В.Л.					

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів

АФЧХ – амплітудно-фазочастотна характеристика;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

БЖД – безпека життєдіяльності;

ЕСКД – єдина система конструкторської документації;

ЕСПД – єдина система програмної документації;

ОБР – область безпечної роботи;

ППЧ – підсилювач проміжної частоти;

САПР – система автоматизованого проектування;

ФЧХ – фазочастотна характеристика.

Вступ

Підсилювачі низької частоти найчастіше застосовують для підсилення сигналів, що підсилюють мовний або звуковий сигнал, в цих випадках вони називаються підсилювачами звукової частоти, також вони використовуються для підсилення інформаційних сигналів в наступних галузях:

- аналогова обчислювальна техніка;
- автоматика, телемеханіка;
- вимірювальна техніка і дефектоскопія;
- інші галузі електроніки.

Підсилювач звукової частоти зазвичай включає вихідний підсилювач потужності та підсилювач попереднього підсилення сигналу. Попередній підсилювач підсилює напруги, струм, потужність і приведення їх до величин, необхідної для роботи вихідного підсилювача потужності, дуже часто включає еквалайзер, регулювання гучності, тембру, часто конструктивно виконується окремим пристроєм. ПП повинен віддавати необхідні напругу, струм, потужність низькочастотного сигналу в коло навантаження (споживання). Навантаженням вихідного каскаду зазвичай є випромінювачі звуку: навушники (телефони), акустичні системи (колонки), радіотрансляційні мережі або модулятори радіопередавачів. Підсилювач звукової частоти є невід'ємною частиною всіх пристроїв звуковідтворюючих, радіотранслюючих та звукозаписуючих.

1 Основна частина

1.1 Аналіз технічного завдання

Класична структура підсилювача потужності [1], в якій диференціальний каскад на вході ППЗЧ навантажений на каскад підсилення напруги з транзистором за схемою з спільним емітером, за яким включається каскад підсилення потужності, як правило, представляє собою дво- або три каскадний підсилювач струму. Така структура і тепер є базовою для інтегральних мікросхем ППЗЧ.

За останні десятки років ця схема мало змінилася, її варіанти примножилися за рахунок поширення потужних польових транзисторів. Вона забезпечує необхідні параметри, вимірювані малими значеннями нелінійних спотворень, легко піддаються розрахунку вихідна потужність і коефіцієнт підсилення. Цілком зрозуміла доцільність застосування вхідного диференціального каскаду, що забезпечує високу стабільність всього пристрою в статичному режимі. Вихідний каскад, що представляє собою дво-або триступеневий емітерний повторювач, вносить мінімальні гармонійні спотворення при майже повному, порівнянним з напругою живлення (правильніше сказати, з його половиною) розмахом напруги на виході пристрою. Складніші справи з підсилювачем напруги – драйвером. За 80-річний період існування біполярного транзистора його включення із спільним емітером (СЕ) непогано вивчено, виявлені всі його сильні і слабкі місця, що і послужило його застосування у всіх аналогових і цифрових пристроях в широкому діапазоні частот, а також в підсилювачах постійного струму.

Дзеркало струму різновид основної схеми двох транзисторного дзеркала струму, яка містить резистор, що обмежує струм в колі емітера вихідного транзистора, що дозволяє використовувати цю схему для генерації слабких струмів, застосовуючи резистор тільки середніх номіналів. Змінний струм також може використовуватися, як струм повторення. Ідеальний інвертуючий операційний

підсилювач є ідеальним генератором струму, або джерелом струму. Дзеркало струму використовують для задання струмів зміщення каскадів та кіл живлення з активним навантаженням. Транзисторні генератори струму часто використовують в аналогових інтегральних мікросхемах, які завдяки простоті та ефективності. Дзеркало струму зазвичай використовуються для того, щоб одним струм управляти безліччю каскадів, таким чином ним можна задати струми спокою.

Є основні три характеристики, що характеризують Дзеркало струму. Першою з них є коефіцієнт передачі (у разі операційного підсилювача) або вихідний струм (у разі джерела постійного струму). По-друге, його вихідний опір на змінному струмі, який визначає, наскільки відбувається зміна вихідного струму від напруги на вході, прикладеної до генератора. Третя специфікація – це мінімальний спад напруги на виході генератора, необхідного, для роботи належним чином. Ця мінімальна напруга продиктована необхідністю підтримувати вихідний транзистор генератора в активному режимі. Діапазон напруг, в якому працює генератор, називається діапазоном відповідності, і напруга, що лежить на розділі між хорошим і поганим поводженням, називається діапазоном напруги. Є також ряд другорядних питань по роботі з генераторами, наприклад, температурна стабільність.

Біполярний транзистор використовується в якості елементарного підсилювача струму коефіцієнт передачі, якого сильно залежить від впливу зовнішніх факторів (температура, радіація і т. п). Компенсація непотрібних впливів реалізовується генератором струму, що включає два перетворювачі “напруга-струм” і “струм-напруга”, які з’єднані каскадами, мають дзеркальні характеристики та працюють в однакових умовах. Використовуються два однакові перетворювачі, один з яких звертають за допомогою від’ємного зворотного зв’язку. Таким чином, Дзеркало струму включає два каскади однакових перетворювачів (перший – обернений, та інший – прямий). Режим роботи генератора струму завдається струмом колектору транзистора. Напруга база-емітер для цього транзистора встановлюється відповідно до струму, який задається, типом транзистора та тем-

пературою навколишнього середовища. У результаті заданих режимів схеми виявляється, і інший транзистор, узгоджений з попереднім транзистором (краще використовувати здвоєний монолітний транзистор), який передає в навантаження струм, що заданий на цьому транзисторі. Нехтуємо незначними базовими струмами. Основною перевагою даної схеми є великий діапазон стійкості по напрузі за вирахуванням декількох десятих частин вольта, оскільки відсутній спад напруги на резисторі в колі емітера. Найлегше струм управління отримати резистором. Оскільки емітерні переходи транзисторів – діоди, тому падіння напруги на них незначне. Резистор формує управляючий (вихідний) струм. Генератори струму використовуємо, коли є потреба в джерелах струму на транзисторах. При проектуванні інтегральних схем часто використовують генератори струму, коли:

– наявна велика кількість узгоджених транзисторів;

– проектується схема, яка працюватиме в широкому діапазоні напруг живлення.

Промисловість виготовляє мікросхеми інтегральних операційних підсилювачів без резисторів, струм режиму роботи всього підсилювача задається зовнішнім резистором, а Дзеркало струму формують струми окремих внутрішніх каскадів підсилення.

Дзеркало струму проектується так, щоб вихідний струм або вхідний – в разі використання npn транзисторів буде віддаватися в кілька навантажень, схема представлена на рисунку 1.1.

Відзначимо, якщо для джерела струму один транзистор –переходить в режим насичення, то струм бази. Ці схеми є відображенням подвоєного або половинного струму управління. При проектуванні генераторів струму в інтегральному виконанні коефіцієнти відображення струму задаються вибором розмірів емітерних переходів.

Ще одним із способів отримання струму виходу пропорційного управляючому є під’єднання резистора в коло емітеру вихідного транзистора. Згідно з виразом Еберса-Молла, схема працює з струмами різної величини, тому вели-

чина напруги $U_{БЕ}$ залежить тільки від співвідношення струмів. Співвідношення струмів колекторів пропорційне співвідношенню струмів баз узгоджених транзисторів. При розробці генераторів струму з багатьма співвідображеннями корисним є використання графіку, дозволяє визначити різницю напруги база-емітер.

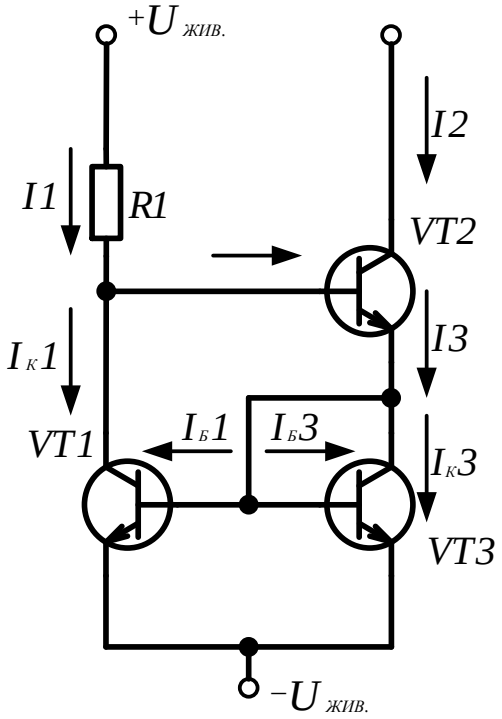

Рисунок 1.1 – Дзеркало струму

1.2 Проектування схеми структурної електричної

1.2.1 Проектування і розрахунок схеми структурної електричної

Розраховуємо максимальне значення напруги в навантаженні:

$$U_{Н.НОМ..} = \sqrt{2\ P_{Н,НОМ.} R_Н}\ , \qquad (1.1)$$

$$U_{Н.НОМ.} = \sqrt{2 \cdot 150 \cdot 4}\ = 35\ (В)\ .$$

де: $P_{Н.НОМ.}$. – номінальна потужність вихідного сигналу при коефіцієнті гармонік $K_{Г.}$ < 1 %. $P_{Н.НОМ.} = 150\ (Вт)$.

$R_Н$ – навантаження підсилювача, $R_Н = 4\ (Ом)$.

Визначаємо номінальний струм $I_{Н.НОМ.}$ навантаження:

$$I_{Н.НОМ.} = \frac{U_{Н.НОМ.}}{R_{Н.}}, \tag{1.2}$$

$$I_{Н.НОМ.} = \frac{35}{4} = 8{,}7\ (А)\ .$$

Розраховуємо необхідний коефіцієнт підсилення підсилювача по напрузі за формулою:

$$K_U = \frac{2\ U_{Н.МАХ.}}{\sqrt{2}\ E_{Г.}}. \tag{1.3}$$

де $E_{Г.}$ – рівень вхідного сигналу на вході підсилювача $E_{Г.} = 0{,}5\ (В)$;

$$K_U = \frac{2\ 35}{\sqrt{2}\ 0{,}5} = 9\ (раз)\ .$$

Розраховуємо необхідну кількість каскадів попереднього підсилення по напрузі:

$$n = lg\ \frac{K_U}{2}, \tag{1.4}$$

$$n = lg\ \frac{99}{2} = 1{,}6946\ .$$

Отже, для підсилення вхідного сигналу до рівня напруги 40 В необхідно $n = 2$ попередніх каскади підсилення по напрузі.

Розраховуємо напругу живлення по формулі:

$$E_{ЖИВ.} = U_{Н.МАХ..} + U_{КЕ.НАС.} + U_{RE.}\ . \tag{1.5}$$

де: $U_{КЕ.НАС.}$ – спад напруги колектор-емітер вихідного транзистора в режимі насичення, для потужних NPN-транзисторів $U_{КЕ.НАС.}$ = 0,5 В.

$U_{RE.}$ – спад напруги на резисторі в колі емітера, 1 В.

$$E_{ЖИВ.} = 35 + 0{,}5 + 1 = 36{,}5\ (\ В\ )\ .$$

ГОСТ 23366-78 встановлює такі номінальні значення напруг для виробів – джерел, перетворювачів та споживачів електричної енергії.

Приймаємо напругу живлення $E_{ЖИВ.} = 40 + 0{,}5 + 1 = 48\ (В)$.

Визначаємо амплітуду струму вхідного сигналу користуючись формулою:

$$I_{ВХ.С.} = \frac{\sqrt{2}\ E_{Г.}}{R_{ВХ.}}\ . \qquad (1.6)$$

де: $R_{ВХ.}$ – вхідний опір попереднього підсилювача, приймаємо $R_{ВХ.} = 30\ (кОм)$.

$$I_{ВХ.С.} = \frac{\sqrt{2}\ 0{,}5}{30000} = 23{,}6\ \approx 23{,}6\ (мкА)\ .$$

Проводимо розрахунок коефіцієнту підсилення по струму:

$$K_I = \frac{I_{Н.НОМ.}}{I_{ВХ.С.}}\ , \qquad (1.7)$$

$$K_I = \frac{8{,}7}{24\ 10^{-6}} = 36{,}25 \cdot 10^4 (\ раз)\ .$$

Проводимо розрахунок номінального коефіцієнту підсилення по потужності при якому коефіцієнт гармонік менше 1%:

$$K_P = K_U K_I\ , \qquad (1.8)$$

$$K_P = 99 \cdot 36{,}25 \cdot 10^4 = 36 \cdot 10^6\ .$$

Розраховуємо номінальний коефіцієнт підсилення по потужності в децибелах при якому коефіцієнт гармонік становить менше 1%:

$$K_{Рдд} = 10\ lg\ K_P, \tag{1.9}$$

$$K_{Рдд} = 10\ lg\ 36 \cdot 10^6 = 75{,}56 \approx 76\ (дБ)\ .$$

Отже, коефіцієнт підсилення по потужності становить $76\ (дБ)$.

Знаючи напругу живлення та максимальний струм навантаження вибираємо транзистори для вихідного каскаду.

Граничні параметри транзисторів 2SC5200 NPN та 2SA1943 PNP

“Напруга колектор-база максимальна при заданому зворотному струму і розімкнутому колі емітера” ($U_{КЕ0\ МАХ.}$), В	230
“Напруга колектор-емітер максимальна при заданому струму колектору і розімкнутому колі бази” ($U_{КЕ0\ МАХ.}$), В	230
“Струм колектору максимально допустимий” ($I_{К.МАХ.}$), А	15
“Коефіцієнт передачі струму статичний” ($h\ 21_Е$), min	60
“Частота коефіцієнту передачі струму” гранична ($f_{ГР.}$), МГц	30
“Потужність розсіювання” максимальна, Вт	150

Для покращення вихідних характеристик за рахунок перерозподілу струмів емітера під’єднують декілька транзисторів паралельно в плечі вихідного каскаду. Для проектованого підсилювача застосовуємо по два транзистори на плече. Та при необхідності для збільшення вихідної потужності можна паралельно під’єднати до 10 транзисторів на плече.

Визначивши тип транзистора та маючи необхідну розраховану кількість каскадів проектуємо структурну схему підсилювача (Рисунок 1.2).

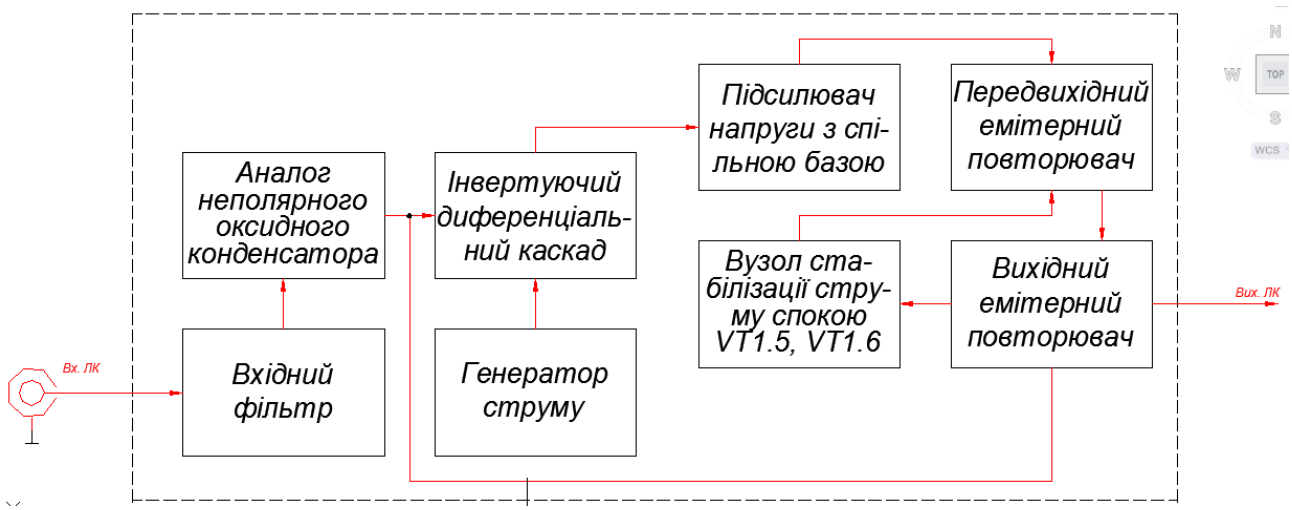

Рисунок 1.2 – Схема електрична структурна підсилювача

Схема структурна електрична підсилювача потужності рисунок 1.2 включає:

1) Вхідний фільтр;
2) Вхідний диференціальний каскад;
3) Фазоінвертор диференціальний каскад;
4) Дзеркало струму ;
5) Каскад формування режиму АВ;
6) Каскад вихідний додатної півхвилі;
7) Каскад вихідний від'ємної півхвилі;
8) Каскад захисту блока живлення.

Вхідний фільтр служить для формування амплітудно-частотної характеристики підсилювального каскаду.

1.3 Проектування і розрахунок вузлів схеми електричної принципової пристрою

Низькочастотний стереосигнал через роз'єми XS1 відповідно лівого та XS2 правого каналу через розділові конденсатори C1 C2 подається на смуговий операційний підсилювач на мікросхемі LM378 де підсилюється. Фільтр НЧ ре-

алізовано на елементах R7 R8 та C5. Фільтр ВЧ реалізовано на елементах операційному ся до рівня необхідного для роботи пружинного ревербератора. R5 та C4. Фільтри першого порядку зі спадом АЧХ 6дБ на октаву. В пружинному реверберататорі відбувається затримка сигналу. вхідний сигнал реверберації також подається через конденсатори C4. C6 на вихідний змішувач.

Проектування схеми електричної принципової проводять дотримуючись певної послідовності. Розрахунок проводять починаючи з вихідного каскаду і так далі попередні каскади і вхідний каскад, при цьому на кожному етапі приймаються ті чи інші схемотехнічні рішення, які забезпечать необхідні параметри пристрою в цілому.

1.3.1 Розрахунок операційного підсилювача

В дані схемі реалізовано неінвертуючий підсилювач.

Основна відмінність від інвертуючого підсилювача полягає в підвищеному вхідному опорі, який може досягати 10МОм і вище. При реалізації даної схеми передбачено розв’язку з попередніми каскадами по постійному струму – встановлено розділовий конденсатор C4 і між входом ОУ і загальним проводом включити резистор опором близько 100кОм R4 рисунок 1.3.

На даному операційному підсилювачі реалізовано смуговий підсилювач. На ланці C8, R8 реалізовано фільтр нижніх частот першого порядку з послабленням непотрібного сигналу – спад – 6дБ на октаву, а на ланці C3, R4 фільтр верхніх частот першого порядку зі спадом АЧХ 6дБ на октаву. На рисунку 1.2 зображено схему даного підсилювача.

В неінвертуючих операційних підсилювачах реалізовується послідовний по напрузі зворотній зв’язок (джерело вхідного сигналу та коло зворотного зв’язку під’єднані послідовно) сигнал зворотного зв’язку пропорційний вихідній напрузі). Для неінвертуючого операційного підсилювача коефіцієнт підсилення по напрузі :

$$K(j\ 2\ \pi\ f) = \left(1 + \frac{Z2}{Z1}\right) \tag{1.10}$$

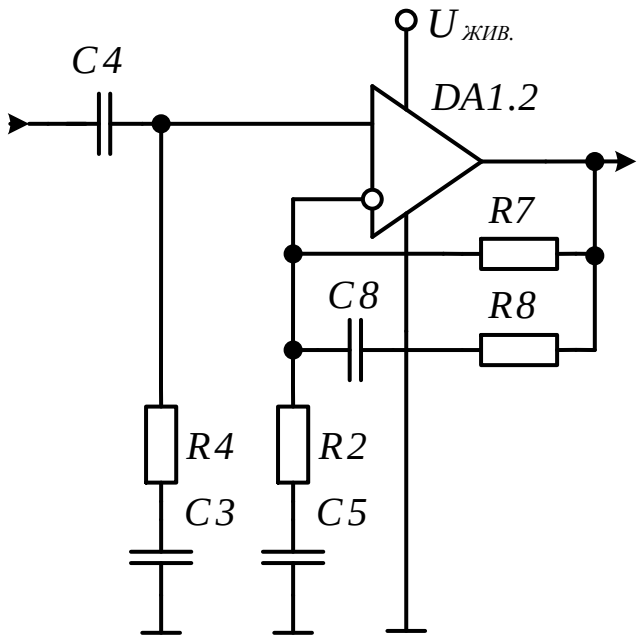

Рисунок 1.3 – Схема електрична принципова смугового підсилювача на операційному підсилювачі

Записуємо комплексні опори $Z1$ і $Z2$:

$$Z1 = R2 + ZC5\ , \tag{1.11}$$

$$Z2 = \frac{R7\ (R8 + ZC8)}{R7 + R8 + ZC8}. \tag{1.12}$$

Оскільки $ZC = \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C}$ отримаємо

$$Z1 = R2 + \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C5}, \tag{1.13}$$

$$Z2 = \frac{R7\left(R8 + \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}\right)}{R7 + R8 + \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}} \tag{1.14}$$

=

Отримаємо

$$Z1 = R2 - \frac{j}{2\ \pi\ f\ C5}, \tag{1.15}$$

$$Z2 = \frac{R7\left(R8 + \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}\right)\left(R7 + R8 - \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}\right)}{\left(R7 + R8 + \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}\right)\left(R7 + R8 - \frac{1}{j\ 2\ \pi\ f\ C8}\right)} =$$

$$= \frac{R7\left(R8\ (R7 + R8) + \frac{1}{2^2\pi^2 f^2 C8^2} + j\ \frac{R7}{2\ \pi\ f\ C8}\right)}{(R7 + R8)^2 + \frac{1}{2^2\pi^2 f^2 C8^2}} = \tag{1.16}$$

$$= \frac{R7}{(R7 + R8)^2 + \frac{1}{2^2\pi^2 f^2 C8^2}}\left(R8\ (R7 + R8) + \frac{1}{2^2\pi^2 f^2 C8^2} + j\ \frac{R7}{2\ \pi\ f\ C8}\right)$$

Підставивши комплексні опори в рівняння (1.2) отримаємо:

$$K(j\ 2\ \pi\ f) = 1 + \frac{\dfrac{R7}{(R7 + R8)^2 + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2}}}{R2 - \dfrac{j}{2\ \pi\ f\ C5}} \times$$

$$\times \left(R8\ (R7 + R8) + \frac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2} + j\ \frac{R7}{2\ \pi\ f\ C8} \right) = 1 +$$

$$+ \frac{R7}{(R7 + R8)^2 + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2}} \frac{\left(R2 \left(R8\ (R7 + R8) + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2} \right) - \dfrac{R7}{\omega^2 C8\ C5} \right)}{\left(R2^2 + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C5^2} \right)} +$$

$$+ j\ \frac{\left(\dfrac{R2\ R7}{2\ \pi\ f\ C8} + \dfrac{\left(R8\ (R7 + R8) + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2} \right)}{2\ \pi\ f\ C5} \right)}{\left(R2^2 + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C5^2} \right)} \qquad (1.17)$$

Провівши необхідні перетворення отримаємо:

$$K(j\ 2\ \pi\ f) = -\left(1 + \frac{\dfrac{R7\ (R8\ (R7 + R8) + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2} - \dfrac{j\ R7}{2\ \pi\ f\ C8}}{(R7 + R8)^2 + \dfrac{1}{2^2 \pi^2 f^2 C8^2}}}{R2 - \dfrac{j}{2\ \pi\ f\ C5}} \right) \qquad (1.18)$$

При виконанні рівності $R2 = \frac{1}{2\ \pi\ f\ C5}$ отримуємо перші критичні значеннями опору $R2$, частоти f та ємності $C5$. При прямуванні f до нуля $Z1$ прямує до безмежності, тому коефіцієнт підсилення також прямує до нуля.

Знаючи частоту зрізу ФВЧ, розраховуємо реактивний опір конденсатора, допоки він зрівняється з опором резистора, під'єднаного послідовно з конденсатором. Формула наступна:

$$C5 = \frac{1}{2\ \pi\ f\ R2}. \qquad (1.19)$$

Прийнявши нижню частоту зрізу $f_{ЗРН.}$ 110 кГц, опір резистора $R2$ рекомендується 1 кОм розраховуємо ємність конденсатора $C5$:

$$C5 = \frac{1}{2\ \pi\ 100\ 1000} = 0{,}0144\ (мкФ).$$

З ряду Е24 вибираємо $C5 = 0{,}015\ (мкФ)$.

Другим критичним значенням є значення опору $R7$, $R8$ частоти f та ємності $C8$ при яких виконується рівність $R7 = R8 + \frac{1}{2\ \pi\ f\ C8}$. При прямуванні f до нуля $Z1$ прямує до безмежності, отже коефіцієнт підсилення прямує до нуля.

Визначити частоту зрізу можна ФВЧ, розраховуючи реактивний опір конденсатора, коли він стане рівним опору резистора, включеного послідовно з конденсатором. Формула наступна:

$$R7 = R8 + \frac{1}{2\ \pi\ f\ C8}. \qquad (1.20)$$

Прийнявши нижню частоту зрізу $f_{ЗРН.}$ 11 кГц, опір резистора $R7$ рекомендується 100 кОм, $R8$ 10 кОм розраховуємо ємність конденсатора $C8$:

$$C8 = \frac{1}{2\ \pi\ f\ (R7 - R8)}, \qquad (1.21)$$

$$C8 = \frac{1}{2\ \pi\ 11000\ (100000 - 10000)} = 1{,}607\ 1^{-10} = 160{,}7\ (нФ).$$

З ряду Е24 вибираємо $C5 = 0{,}015\ 160{,}7\ (нФ).$

Зворотній зв'язок

Електричний розрахунок режиму роботи активного елемента проводиться окремо для колекторного і вхідного кола.

Для отримання максимальних підсилення по потужності і коефіцієнта корисної дії η , транзистор повинен працювати в критичному режимі з кутом відсічення $\theta = 70^{\circ}...90^{\circ}$. Для якого за таблицями або графіками знаходимо величини $\alpha_1 = 0{,}5$, $\alpha_0 = 0{,}319$, $\gamma_1 = 0{,}5$. Знайдемо вихідну потужність підсилювача

$$P_{ВИХ.} = \frac{P_{АНТ.}}{\eta_{ВКС.}} \qquad (1.22)$$

де $P_{ВИХ.}$ – вихідна потужність підсилювача;

$P_{АНТ.}$ – вихідна потужність підведена до навантаження;

$\eta_{ВКС.}$ – коефіцієнт корисної дії $0{,}85$.

$$P_{ВИХ.} = \frac{200}{0{,}85} = 235\ (Вт).$$

На рисунку 1.3 представлено вихідну характеристику вихідного каскаду на транзисторах VT7, VT11.

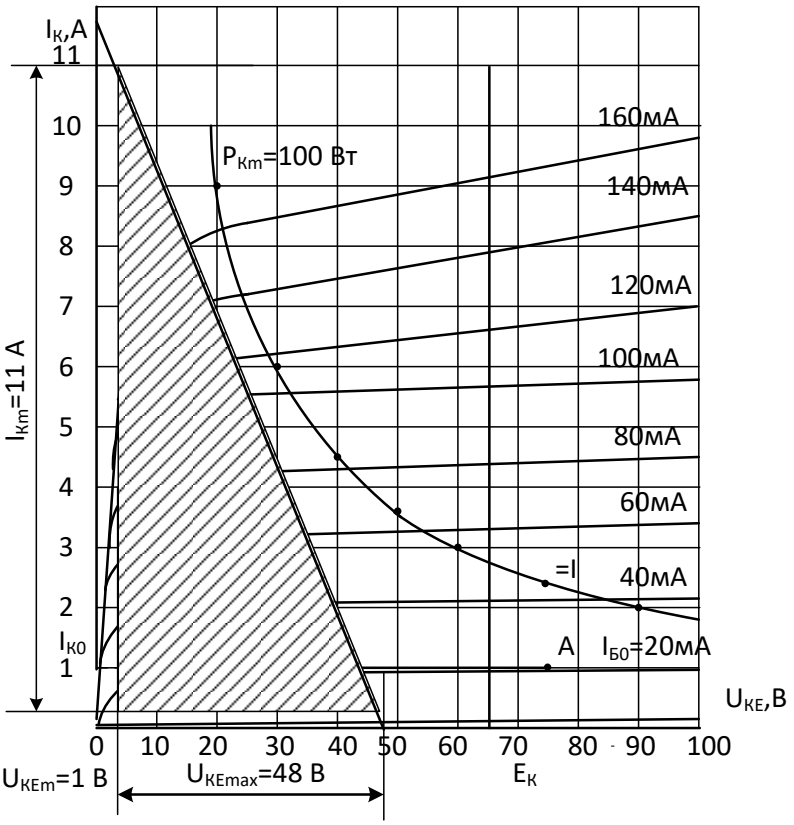

Рисунок 1.4 – Вихідна характеристика каскаду VT7, VT11

Амплітуда напруги першої гармоніки на емітері:(напруга живлення має відповідати стандартному ряду значень, наведеному в ГОСТ 21128-83 У нашому випадку $E_{ЖИВЛ.} = 48\ (В)$

$$U_{К.} = U_{ВИХ.} = E_{Ж.}\left[0{,}5 + 0{,}5\sqrt{1 - \frac{8}{\alpha_1(\theta)}\frac{r_{НАС.}}{E^2_{Ж.}}P_{ВИХ.}}\right] \qquad (1.23)$$

$$U_{К.} = U_{ВИХ.} = 48\left[0{,}5 + 0{,}5\sqrt{1 - \frac{8}{0{,}5}\frac{0{,}3}{48^2}235}\right] = 40{,}79\ (В)$$

Максимальна напруга на емітері не повинна перевищувати допустиму:

$$U_{К.МАКС.} = E_{Ж.} + U_{К..} \le U_{К.ДОП.} \quad (1.24)$$

$$U_{К.МАКС.} = 48 + 40{,}79 \le U_{К.ДОП.} = 88{,}79\ (В)$$

Вибираємо транзистор 2SC5200 $U_{К.ДОП.} = 230\ (В)$.

Відповідно для нижнього плеча вибираємо транзистор 2SA1943 $U_{К.ДОП.} = -230\ (В)$

Амплітуда струму колектору першої гармоніки

$$I_{ВИХ.} = I_{К.} = \frac{2P_{ВИХ.}}{U_{К.}} \quad (1.25)$$

$$I_{ВИХ.} = I_{К.} = \frac{2 \cdot 235}{40{,}79} = 11{,}52\ (А)$$

Розраховується опір емітерного навантаження

$$R_{ВИХ.} = \frac{U_{ВИХ.}}{I_{К.}} \quad (1.26)$$

$$R_{ВИХ.} = \frac{40{,}79}{11{,}52} = 3{,}54\ (Ом)$$

Постійна складова струму колектору

$$I_{ВИХ.0} = I_{К.0} = \frac{\alpha_{0.}(\theta)_{.}}{\alpha_{1.}(\theta)_{.}} I_{К.} \quad (1.27)$$

де $q_{1.}(\theta)_{.} = \frac{\alpha_{0.}(\theta)_{.}}{\alpha_{1.}(\theta)_{.}}$ – коефіцієнт форми струму по першій гармоніці

$$I_{ВИХ.0} = \frac{0{,}319}{0{,}5} 11{,}52 = 7{,}35\ (А)$$

Максимальний струм колектору транзистора:

$$I_{К.МАКС.} = \frac{I_{К.}}{\alpha_{0.}(\theta)_{.}}, \quad (1.28)$$

$$I_{К.МАКС.} = \frac{11{,}52}{0{,}319} = 37\ (А)$$

Споживана потужність:

$$P_0 = I_{ВИХ.0} E_{Ж} \quad (1.29)$$

$$P_0 = 7{,}35\ 48 = 352{,}8\ (Вт)$$

Коефіцієнт корисної дії емітерного кола при заданому навантаженні:

$$\eta = \frac{P_{ВИХ.}}{P_{0.}} 100\ \% \quad (1.30)$$

$$\eta = \frac{235}{352{,}8} 100\,(B) = 66{,}6\,(\ \%\ )\quad \eta = \frac{235}{352{,}8} 100\ \% = 66{,}6\ (\%)$$

Розсіювана потужність на колекторі транзистора:

$$P_{РОЗС.} = P_{0.} - P_{ВИХ.} \tag{1.31}$$

$$P_{РОЗС.} = 352{,}8 - 235 = 117{,}8\,(Вт)$$

Для забезпечення відводу теплової потужності від транзистора останні встановлюються на радіатори. Для зменшення площі радіатора використовуємо паралельне під'єднання двох або більше транзисторів в залежності від вихідної потужності, яка є необхідною.

Початковими даними для вибору транзистора є:

- амплітуда колекторного струму $I_{КМАХ.}$;
- максимальна напруга колектор-емітер $I_{КЕМАХ.}$;
- максимальна потужність розсіювання $P_{КМАХ.}$.

Для вибору транзисторів необхідно дотримуватися наступних умов:

- потужність розсіювання колектору транзистора повинна не перевищувати допустиму;
- струм колектору не повинен перевищувати допустимий;
- напруга колектор-емітер не повинна перевищувати допустиму;
- верхня частота не повинна перевищувати граничну.

Враховуючи, що основні нелінійні спотворення виникають на вихідних транзисторах, знайдемо максимально допустимий струм спокою колектору $I_{КССПО.}$ VT 11. Збільшення або зменшення цього струму дозволить встановити точку спокою якомога ближче до лінійної ділянки вихідної характеристики ви-

хідних транзисторів, що і зменшує нелінійні спотворення. Збільшення струму спокою обмежується коефіцієнтом корисної дії.

Знаходимо максимальний струм спокою вихідного транзистора в режимі АВ:

$$I_{КССПО.} = 0,7 \left(\frac{\pi}{4\ \eta} - 1 \right) \frac{P_{НАВ.}}{2\ E_{ЖИВЛ.}} \qquad (1.32)$$

де η – коефіцієнт корисної дії вихідного каскаду. В режимі АВ $\eta = 0,7$

$$I_{КССПО.} = 0,7 \left(\frac{\pi}{4\ 0,7} - 1 \right) \frac{200}{2\ 48} = 178\ (мА)$$

Знаходимо струм спокою бази і амплітуду струму бази транзистора VT11:

$$I_{ЬСПОК.} = I_{КСПОК.} / (1 + h_{21E}) \qquad (1.33)$$

Для транзистора 2SC5200 коефіцієнт підсилення при $I_{КССПО.} = 178\ (мА)$ і $U_{К.} = 48\ (мА)$ $h_{21E} = 90$ тому

$$I_{ЬСПОК.} = 178 / (1 + 90) = 1,98\ (мА)$$

По вхідній характеристиці знаходимо напругу база-емітер спокою $U_{ЬСПОК.}$ (напруга зміщення $U_{ЗМ.ВИХ.}$) транзистора VT7 : $U_{ЗМ.ВИХ.} = 0,7\ (В)$,

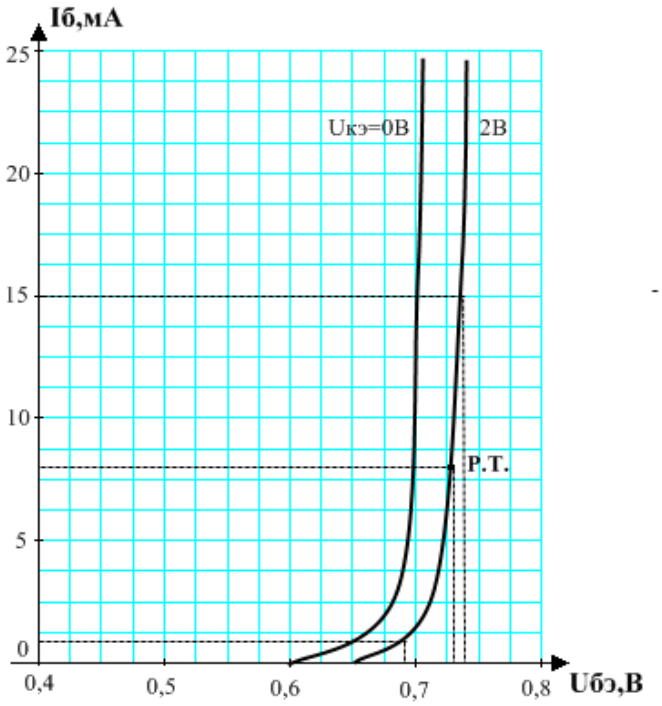

Рисунок 1.5 – Вхідна характеристика транзистора

Розраховуємо напругу управління базою для забезпечення необхідного струму емітера. Оскільки схема каскаду з спільним колектором, тому вхідний опір дорівнює безмежності, тому ним нехтуємо.

$$U_{БЕ} = \frac{(I_{КНОМ.} - U_{КЕНАС.} / R_{КЕ})}{H_{21E}} \qquad (1.34)$$

де $U_{БЕ}$ – напруга управління на базі;

$U_{КЕНАС.}$ – напруга насичення транзистора;

$I_{КНОМ.}$ – номінальний струм колектору;

$R_{КЕ}$ – колектор-емітер.

$$U_{БЕ} = \frac{(0,178 - 0,4 / 0,9)}{0,85} = 0,85\ (В)$$

1.3.2 Розрахунок параметрів двотактного диференціального каскаду

Враховуючи (1.22) розраховуємо параметри двотактного диференціального каскаду зображено на рисунку 1.5. Вихідними даними є розраховані $I_{ЬСПОК.}$ транзистора VT7, $U_{БЕ}$, $U_{ЗМ.}$ VT5. Практично коефіцієнт підсилення по напрузі підсилювача забезпечується двотактним диференціальним каскадом $K_U = 113{,}14\ (раз)$.

Розділимо коефіцієнт підсилення двотактного диференціального каскаду рівномірно між першим $K_{U1} = 10\ (раз)$ та другим каскадами, $K_{U2} = 12\ (раз)$.

Оскільки на вході диференціального каскаду на VT3 синфазний сигнал, а вихід несиметричний. Вихідна напруга при несиметричному виході, викликана подачею на вхід диференціального сигналу, зменшується в два рази порівняно з його значенням при симетричному виході.

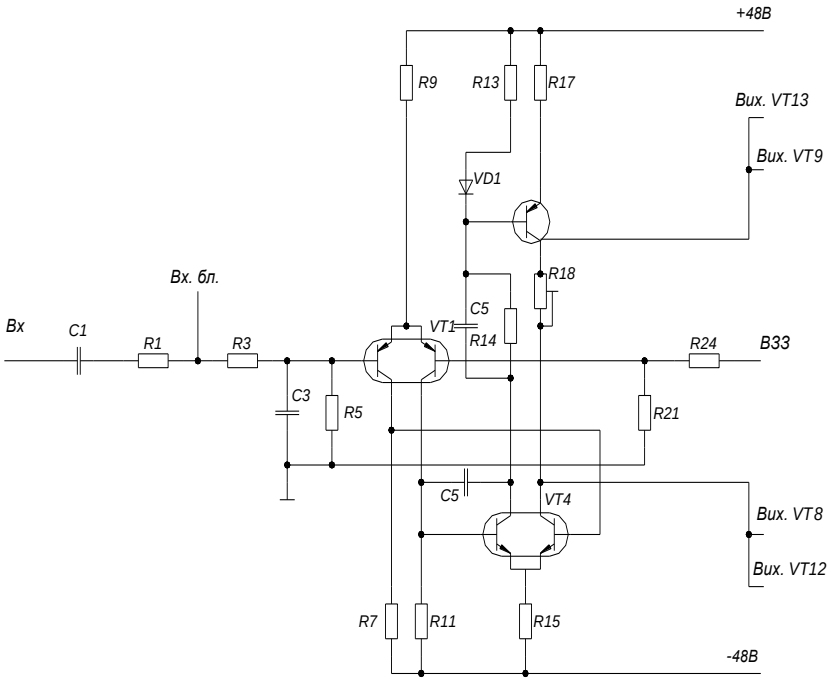

Рисунок 1.6 – Схема електрична принципова двотактного диференціального каскаду

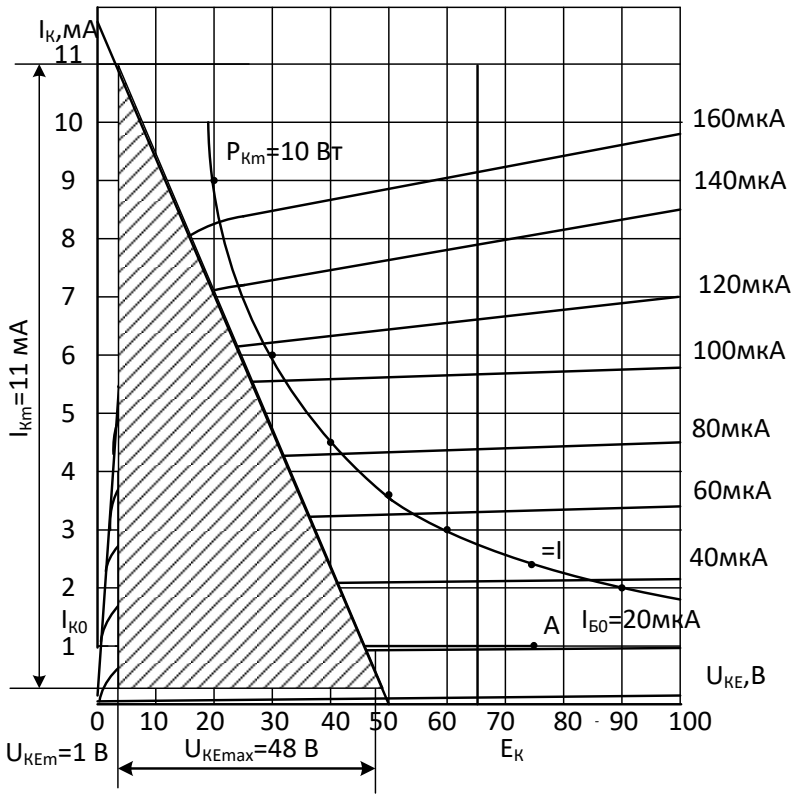

Рисунок 1.7 – Вихідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

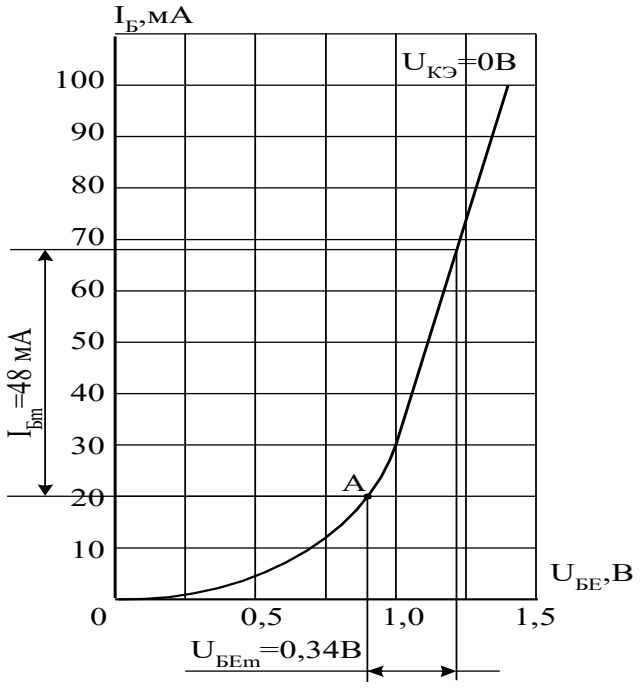

Рисунок 1.8 – Вхідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

Вибираємо для транзисторів VT3(1) та VT3(2) робочу точку $U_{КЕ0} = U_{зм.} = 2,6\ (В)$ для транзистора VT7 В, $I_{К0} = I_{Б\ СПОК.} = 1,98\ (мА)$ для транзистора VT7. Тоді номінал резистора

$$R\ 14 = \left(E_{ЖИВЛ.} - U_{КЕ0.}\right) / I_{К0} \qquad (1.23)$$

$$R\ 15 = \left(48 - 2,6\right) / 0,00198 = 23,89\ (кОм)$$

Вибираємо резистор з ряду Е24 $R\ 15 = 24\ (кОм)$

Розраховуємо струм бази транзистора VT4:

$$I_{Б0} = I_{К0} / \beta \qquad (1.24)$$

де: β – коефіцієнт підсилення по струму, схема включення спільний емітер

$$I_{Б0} = 1,98 / 35 = 56,6\ .$$

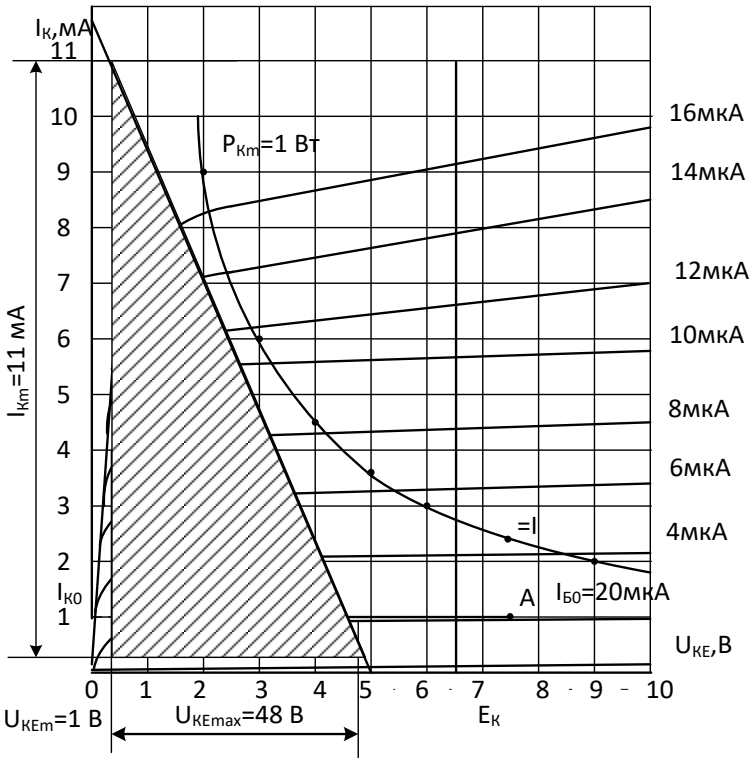

Рисунок 1.9 – Вихідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

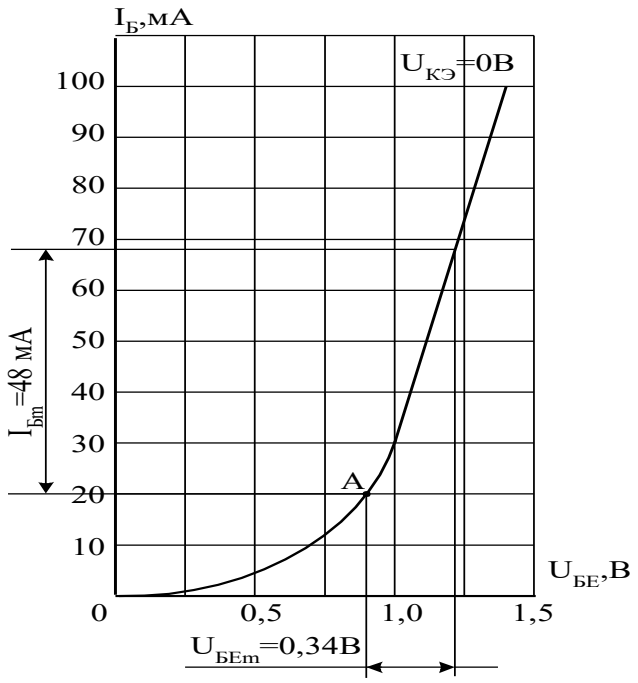

Рисунок 1.10 – Вхідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

Для збільшення вхідного опору диференціального каскаду VT4 та вирівнювання струмів транзисторів VT4(1), VT4(2) додаємо резистор R15, який вносить місцевий зворотній зв'язок по струму. Задавши величину резистора R15=220 Ом, розраховуємо вхідний опір транзистора VT3

$$R_{BX.} = 2\,(\,h_{21E} + R\,17\,(\,\beta + 1\,)\,/\,2\,) \tag{1.25}$$

$$R_{BX.} = 2\,(\,2\,10^{3} + 220\,(\,35 + 1\,)\,/\,2\,) = 11920\,(кОм)$$

При несиметричному виході та $R_{BX.} = \infty$, тому що навантаженням є емітерний повторювач.

$$K_U = \frac{1}{2}\,\frac{\beta\;R\;14}{R_Г + R_{BX.}15\,/\,2} \tag{1.26}$$

$$K_U = \frac{1}{2}\,\frac{35\;12}{(\;12 + 12.\,/\,2\;)} = 11{,}67\,(кОм)$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі задовольняє умові розподілу підсилення напруги по каскадах.

1.3.3 Диференціальний каскад

Розраховуємо диференціальний каскад на транзисторі VT3

Вибираємо для транзисторів VT1.1 та VT1.2 робочу точку $U_{КЕ0} = U_{зм.} = 2,6\ (В)$ для транзистора VT7 В, $I_{К0} = I_{Б\,СПОК.} = 1,98\ (мА)$. Тоді номінал резистора

$$R\,7 = \left(E_{ЖИВЛ.} - U_{КЕ0.}\right) / I_{К0} \qquad (1.27)$$

$$R\,7 = \left(10 - 2,6\right) / 0,00198 = 3,737\ (кОм)$$

Вибираємо резистор з ряду Е24 $R\,7 = 3,9\ (кОм)$

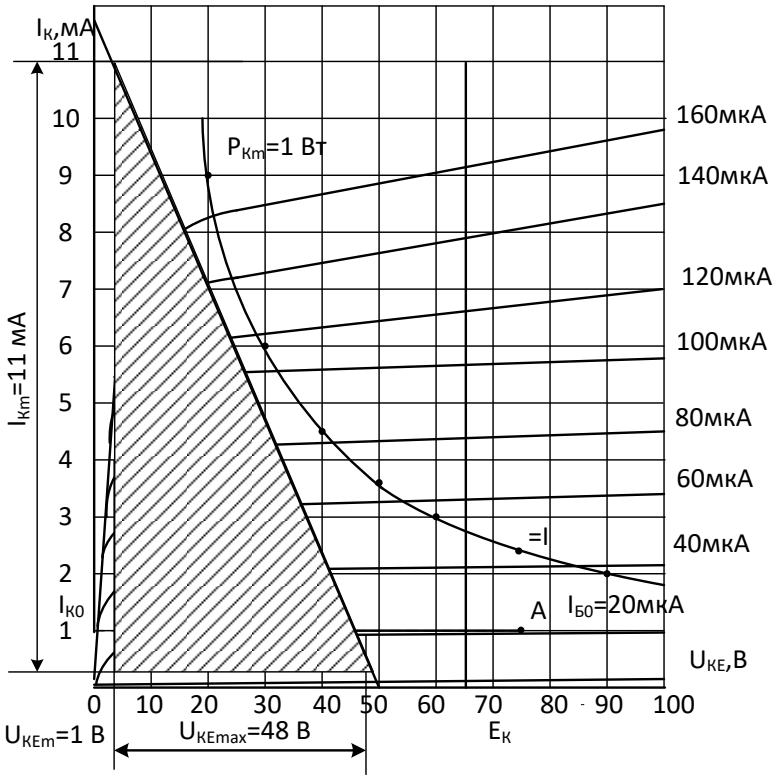

Рисунок 1.11 – Вихідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

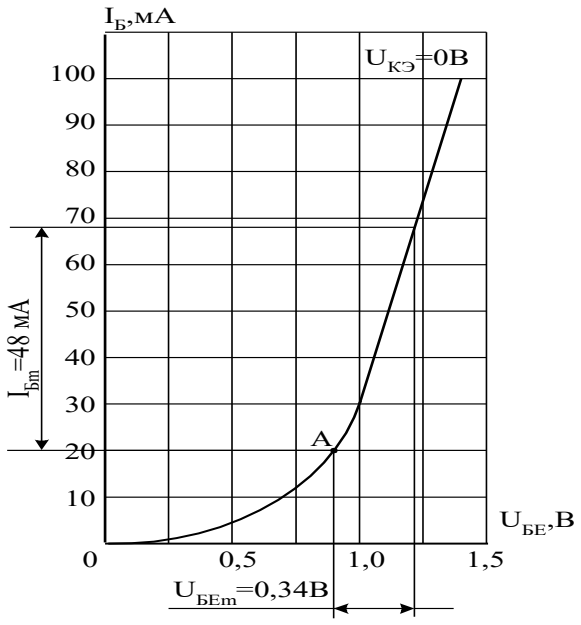

Рисунок 1.12 – Вхідна характеристика диференціального транзисторного каскаду

Розраховуємо струм бази:

$$I_{Б0} = I_{К0} / \beta \tag{1.28}$$

де β – коефіцієнт підсилення по струму, схема включення спільний емітер

$$I_{Б0} = 1{,}98 / 35 = 56{,}6\ (мкА)$$

Для збільшення вхідного опору диференціального каскаду VT1 та вирівнювання струмів транзисторів VT1(1), VT1(2) додаємо резистор R1.5, який вносить місцевий зворотній зв’язок по струму. Задавши величину резистора R9=62 кОм, розраховуємо вхідний опір транзистора VT1

$$R_{ВХ.} = 2\ (\ h_{21E} + R\ 17\ (\ \beta + 1\ ) / 2\ ) \tag{1.29}$$

$$R_{ВХ.} = 2\ (\ 2\ 10^{3} + 62\ 10^{3} (\ 35 + 1\ ) / 2\ ) = 2{,}24\ (мОм)$$

При несиметричному виході та VT1 $R_{ВХ.} = \infty$, тому що навантаженням є емітерний повторювач.

$$K_U = \frac{1}{2} \frac{\beta \ R \ 7}{R_Г + R_{ВХ.} 1 / 2} \tag{1.30}$$

$$K_U = \frac{1}{2} \frac{35 \ 12}{(\ 12 + 2{,}24 / 2 \ )} = 16{,}3 \ (\ раз \ )$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі задовольняє умові розподілу підсилення напруги по каскадах.

1.3.4 Розрахунок генератора струму

Дзеркало струму виконано на транзисторі VT3.

Знайдемо вихідну провідність цього джерела на змінному струмі:

$$Y_{ВИХ.} = I_{ВИХ} / U_{ВИХ} \tag{1.31}$$

Досить точна модель генератора на змінному струмі представлена а рисунку 1.12.

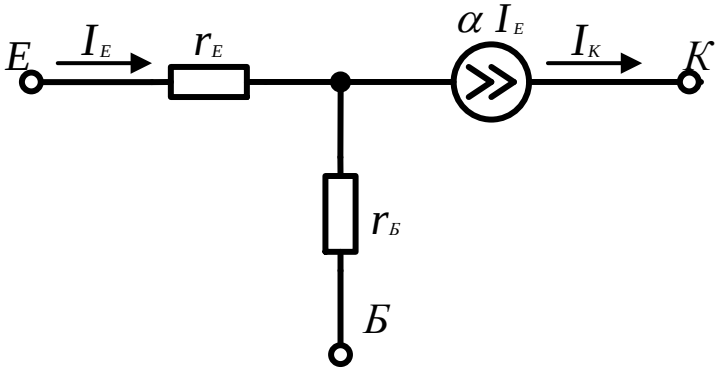

Рисунок 1.13 – Повна (спрощена) еквівалента схема генератора

де r_E – диференціальний опір емітерного переходу, який дорівнює відношенню температурного потенціалу $\varphi_T = 25 \ мВ$ до емітерного струму;

$r_Б$ – опір бази (звичайно менш 200 Ом);

$Y_К$ – диференціальна провідність колекторного переходу, яка складає близько 0,2 мкСм при струмі емітера в 1 мА і пропорційно падає при його зменшенні;

$r_{К0}$ – об'ємний опір колектору, зазвичай не перевищує 100 Ом;

$C_{ЕБ}$, $C_{КБ}$ – бар'єрні складові відповідно емітерної і колекторної ємностей для високочастотних транзисторів, що лежать в межах 1-10 пФ;

$C_{ЕД}$, $C_{КД}$ – дифузійні складові емітерної і колекторної ємностей;

$C_К = C_{КБ} + C_{КД}$ – загальна ємність колекторного переходу;

μ – коефіцієнт зворотного зв'язку [12], причому типове значення дорівнює $5 \cdot 10^{-4}$;

α – комплексний коефіцієнт передачі струму емітера [12]:

$$\underline{\alpha} = \alpha \frac{e^{-j c f / f_\alpha}}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}} \qquad (1.32)$$

де для високочастотних транзисторів параметр с = 0,6, а гранична частота передачі струму емітера теоретичної моделі транзистора $f_{\alpha ТМ} = f_\alpha$ становить для високочастотних транзисторів близько 500 МГц; α – коефіцієнт передачі емітерного струму на низькій частоті, типово $\alpha = 0{,}99$, тобто $\beta = \alpha / (1 - \alpha) = 100$). Для знаходження вихідної провідності джерела струму можна замінити кожен з транзисторів еквівалентною схемою, показаної на рис. 1.12. При цьому, однак, виходять досить громіздкі вирази. Тому ці вирази спрощують з урахуванням співвідношень між параметрами транзистора і зовнішньої ланки. Більш економічним є шлях, який базується на використанні еквівалентних генераторів [1]. Для цього необхідно спочатку знайти струми і напруги в ланці для спрощеної моделі транзисторів. Виключені з цього розгляду

параметри моделі враховуються потім за допомогою еквівалентних генераторів. На рисунку 1.13 показана вихідна еквівалентна схема транзистора, отримана зі схеми (рис. 1.12) шляхом її спрощення.

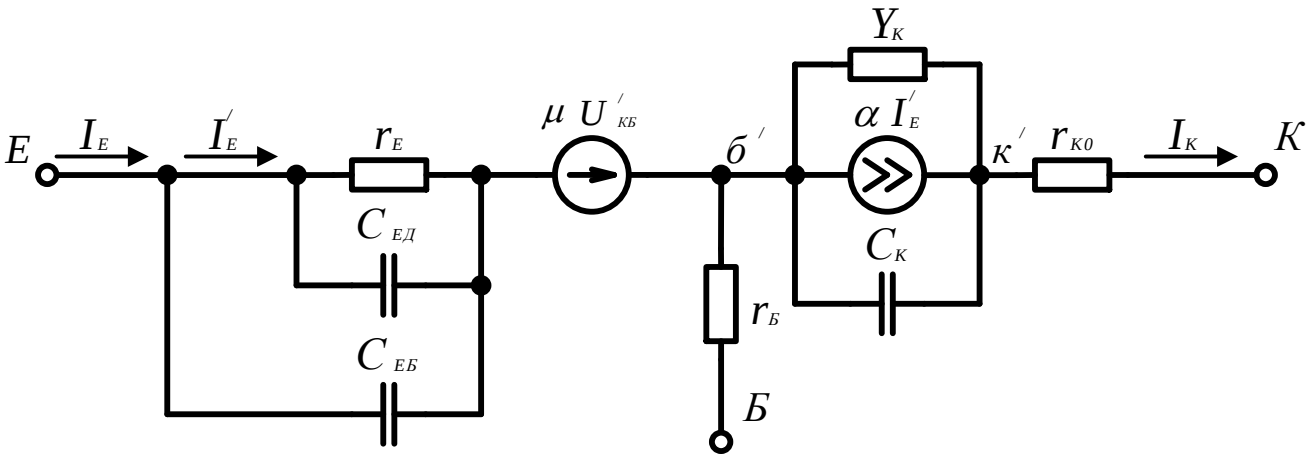

Рисунок 1.14 – Повна (спрощена) еквівалента схема транзистора

З врахуванням рис. 1.12, в еквівалентна схема джерела показана на рис. 1.14. Приймемо, що аналіз вихідної провідності проводиться на частотах $f << f_{\alpha TM}$.

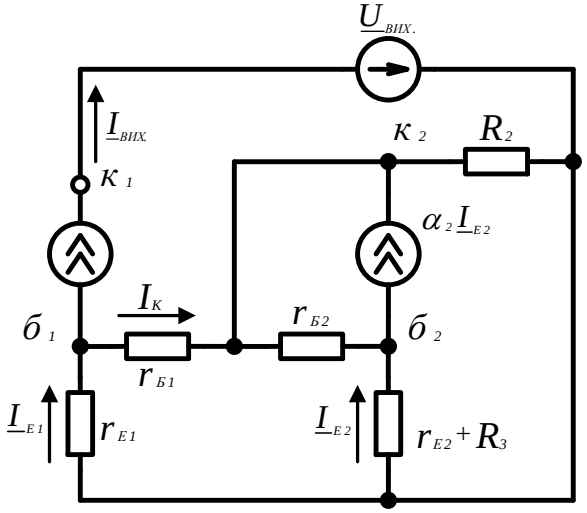

Рисунок 1.15 – Схема еквівалента транзистора

Тоді вираз (1.32) може бути наближено записано шляхом його розкладання в ряд у вигляді

$$\alpha = \alpha - j\,\alpha\,f\,(1+c)\,/\,f_{\alpha TM} \qquad (1.33)$$

Дзеркало струму $\alpha\, I_E$ представлений сумою двох генераторів:

$$\alpha\, I_E = \alpha\, I_E' - j\,\alpha\,f\,(1+c)\,/\,f_{\alpha TM} \qquad (1.34)$$

У вихідній схемі (рис. 1.14) ємність $C_{EБ}$ відсутня, тому $I_E = I_E'$. Отже, перший член правої частини виразу (1.34) представлений на рис. 1.14 і 1.15. Другий член правої частини виразу (1.34) будемо відображати шляхом заміни струму I_E' на близький йому струм I_E. Ємність $C_{EБ}$ можна врахувати за допомогою генератора струму $j\,\omega\,C_{EБ} r_E I_E$. Ємність C_{ED} за умови $f << f_{\alpha TM}$ несуттєва і її враховувати надалі не будемо. Параметр μ може бути відображений за допомогою генератора $\mu\, U_{БК0}$, де $U_{БК0}$ – напруга база-колектор відповідного транзистора для вихідної еквівалентної схеми джерела струму. Параметри Y_K і C_K врахуємо допомогою генераторів струму $Y_K U_{БК0}$, $j\,\omega\,C_K U_{БК0}$. Зауважимо, що ми використовуємо провідність Y_K, а не опір r_K, оскільки прийняте врахування опору колекторного переходу забезпечує більш високу точність розрахунку. Опір r_{K0} включено послідовно з шуканим вихідним опором. Тому для простоти спочатку його можна не враховувати, додавши значення r_{K0} до результату. Зважаючи на відносно малий r_{K0} його, як правило, можна не враховувати. Таким чином, нам необхідно врахувати за допомогою еквівалентних генераторів введення в схему наступних елементів:

$$\alpha\, I_E' - j\,\alpha\,f\,(1+c)\,/\,f_{\alpha TM},\ j\,\omega\,C_{EБ} r_E I_E,\ \mu\, U_{БК0},\ Y_K,\ U_{БК0},\ j\,\omega\,C_K U_{БК0}.$$

Для цього за допомогою еквівалентної схеми на рис. 1.14 необхідно знайти емітерні струми і напруги колектор-база, викликані напругою $U_{ВИХ.}$. Оскіль-

ки вихідна провідність джерела струму $\alpha_1 I_{E1}$ дорівнює для обраної вихідної еквівалентної схеми (рис. 1.13) нулю, то всі змінні струми обох транзисторів опиняються для схеми на рис. 1.14 рівними нулю. Напруга колектор-база другого транзистора також дорівнює нулю, а першого – збігається з вихідним, тобто $U_{БК10} = U_{ВИХ.}$. Тоді від схеми на рис. 1.15 приходимо введенням еквівалентних генераторів до результуючої схеми для вихідної провідності (рис. 1.16).

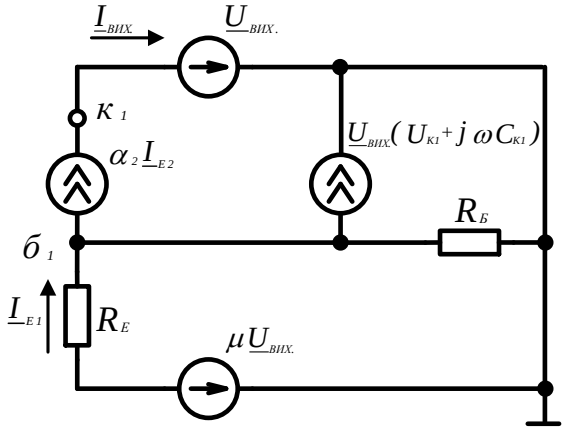

Рисунок 1.16 – Вихідна (уточнена) еквівалента схема транзистора

Знайдемо $R_Б$. Дивись рис.1.17

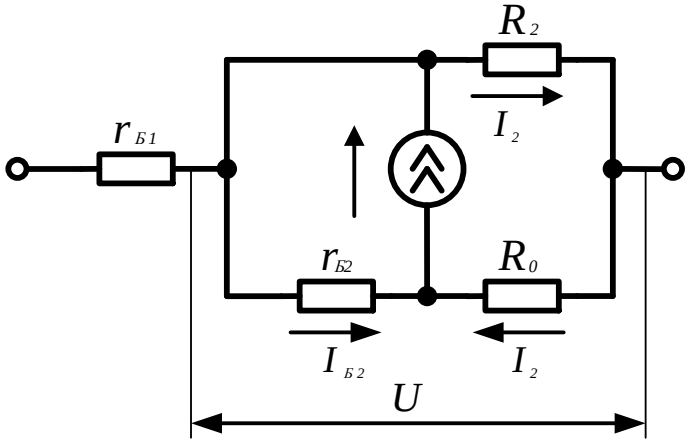

Рисунок 1.17 – Еквівалента схема для $R_Б$

$I_{Б2} + I_2 = I_2 \alpha_2$, звідки $I_{Б2} = I_2(1 - \alpha_2)$ враховуємо, що $\alpha < 1$.

Введемо позначення:

$R_0 = r_{E2} + R_3$

R – опір нижнього кола $r_{Б2} - R_0 = + R_3$. Тоді

$U = I_2 R = I_2 (r_{E2} + r_{Б2} (1 - \alpha_2))$, звідки $R = r_{E2} + r_{Б2} (1 - \alpha_2)$

$$R_Б = r_{Б1} + \frac{R_2 R}{R_2 + R} = r_{Б1} + \frac{R_2 (r_{E2} + R_3 + r_{Б2} (1 - \alpha_2))}{R_2 + (r_{E2} + R_3 + r_{Б2} (1 - \alpha_2))} \qquad (1.34)$$

Знайдемо тепер вихідну провідність $Y_{ВИХ.}$. Дивись рисунок 1.18 еквівалента схема для $Y_{ВИХ.}$.

$I_Б = U_{ВИХ.} Y_К + \alpha_1 I_{E1} - I_{E1}$;

$\mu_1 U_{ВИХ.} = - R_Б I_Б Y_К + I_{E1} R_E$;

$I_{E1} = I_{ВИХ.} - I_Б$;

$Y_К = y_К + j \omega C_К$;

$I_Б = U_{ВИХ.} Y_К + \alpha_1 I_{ВИХ.} - \alpha_1 I_Б - I_{ВИХ.} + I_Б$;

$\alpha_1 I_Б = U_{ВИХ.} Y_К + \alpha_1 I_{ВИХ.} - I_{ВИХ.}$;

$$\mu_1 U_{ВИХ.} = - R_Б \frac{U_{ВИХ.} Y_К + \alpha_1 I_{ВИХ.} - I_{ВИХ.}}{\alpha_1} + I_{ВИХ.} R_E - R_E \frac{U_{ВИХ.} Y_К + \alpha_1 I_{ВИХ.} - I_{ВИХ.}}{\alpha_1}.$$

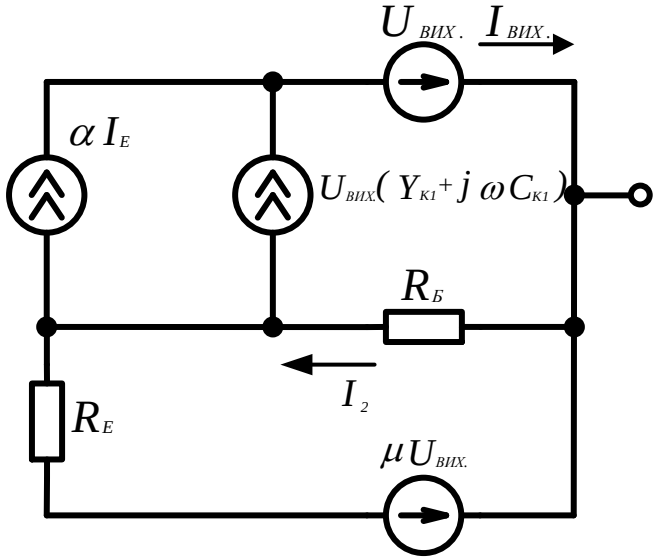

Рисунок 1.18 – Еквівалента схема для $Y_{ВИХ.}$

Звідси з врахуванням 1.31

$$Y_{ВИХ.} = \frac{\alpha_1 \mu_1 + (y_K + j\ \omega\ C_K)(R_E + R_Б)}{R_E + R_Б (1 - \alpha_1)} = \\ = \frac{\alpha_1 \mu_1 + y_K (R_E + R_Б)}{R_E + R_Б (1 - \alpha_1)} + \frac{j\ \omega\ C_K)(R_E + R_Б)}{R_E + R_Б (1 - \alpha_1)} . \quad (1.35)$$

Вихідна провідність може бути представлена паралельно включеними активною провідністю і ємністю $C_{ВИХ.}$:

$$C_{ВИХ.} = C_{K1} \frac{(R_E + R_Б)}{R_E + R_Б (1 - \alpha_1)}, \quad (1.36)$$

$$Y_{ВИХ.} = \frac{\alpha_1 \mu_1 + y_K (R_E + R_Б)}{R_E + R_Б (1 - \alpha_1)} . \quad (1.37)$$

Вираз (1.37) дозволяє досить строго сформулювати умову, при якій впливом коефіцієнта μ_1 можна знехтувати:

$$\mu_1 << y_K (R_E + R_Б) . \quad (1.38)$$

$I_{E1} = 1 (мА)$, то для зазначених вище типових значень $\mu_1 = 5\ 10^{-4}$, $y_K = 0{,}2 (мкСм)$ впливом μ_1 можна знехтувати при

$$(R_E + R_Б) >> 2{,}5 (кОм) \quad (1.39)$$

Якщо умова (1.38) перетворюється на рівність, то вплив параметрів μ_1 і y_K рівноцінний. Якщо в умові (1.38) змінити знак нерівності на протилежний, то вплив коефіцієнта μ_1 стає переважаючим. При виконанні нерівності (1.37) розглянуто залежність вихідної провідності і вихідної ємності від співвідношення опорів R_E і $R_Б$. Якщо $R_E >> R_Б$, та врахувавши рівність (1.38) випливає

$$Y_{ВИХ.} = y_K \tag{1.40}$$

$$C_{ВИХ.} = C_{K1} \tag{1.41}$$

Вирази (1.39) і (1.40) дають найменші (тобто найкращі) значення вихідний провідності для вибраної конфігурації джерела струму. При $R_Б >> R_E$ вирази (1.37) і (1.38) приймають вид

$$C_{ВИХ.} = C_{K1}(1 + \beta)$$

$$Y_{ВИХ.} = y_K(1 + \beta)$$

При типовому значенні β = 100 отримаємо приблизно в 100 раз гірші результати, ніж у попередньому випадку. Для джерел струму найчастіше виконується умова $R_E >> R_Б(1 - \alpha_1)$. Хоча умова $R_E >> R_Б$ може і не виконуватися. Тоді з (1.36-1.38) отримаємо:

$$C_{ВИХ.} = C_{K1}(R_E + R_Б) \tag{1.42}$$

$$Y_{ВИХ.} = y_K(R_E + R_Б) \tag{1.43}$$

З отриманих виразів видно, що збільшення R_E понад трьох значень $R_Б$ не має сенсу, тому що подальше зростання R_E може знизити провідність і ємність не більше ніж на 30%.

1.3.5 Розрахунок нелінійних спотворень

Оскільки вихідні каскади вносять значно більші спотворення сигналу ніж вхідний вхідні, то розрахунок нелінійних спотворень проводиться лише для вихідного каскаду.

Розрахунок проводиться методом двох ординат, який детальніше описаний в [2].

1) Знаходимо струм емітера транзистора VT1.7 при максимальному значенні напруги навантаження $U_{НМАКС.}$:

$$I_{VT} = I_{B.VT} + \frac{U_{НАВ.МАХ.}}{R_H} \quad (1.44)$$

2) По залежності коефіцієнта передачі gj струму від струму емітера знаходимо Y_{21E} VT1.7 = 18.

3) Знаходимо струм бази транзистора VT1.7:

$$I_{VT} = \frac{I_{C.}}{R_H + Y_{21E}} \quad (1.45)$$

4) По вхідній характеристиці визначаємо напругу база-емітер VT1.7

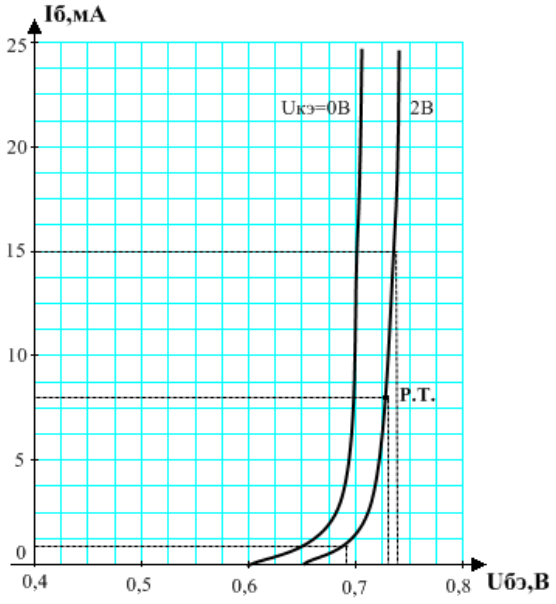

Рисунок 1.19 – Вхідна характеристика транзистора каскаду

5) Знаходимо вхідний опір транзистора VT1.7 Y_{11E}:

$$Y_{11E} = \frac{U_{БЕ}}{I_{Б}} \quad (1.46)$$

6) Розраховуємо струм колектору транзистора VT1.7:

$$I_{E} = \frac{R2 + Y_{11E}}{R2} I_{Б} \quad (1.47)$$

7) По залежності коефіцієнта передачі струму від струму колектору знаходимо коефіцієнт передачі VT1.7 h21VT1.7 = 21.

8) Визначуваний струм бази VT1.7

$$I_{Б} = \frac{I_{К.}}{h_{21}} \quad (1.48)$$

9) По вхідній характеристиці визначаємо напругу база-емітер V1.4 $U_{БЕ}$VT1.4

10) Визначаємо вхідну напругу:

$$U_{ВХ.} = U_{БЕVT7} + I_{E} R15 + U_{ВИХ.} - U_{ЗМ.} \quad (1.48)$$

Будуємо характеристику по вищеописаній методиці:

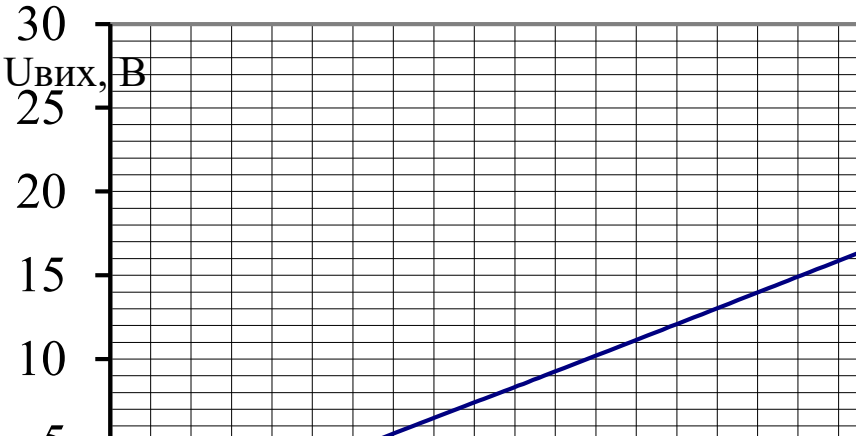

Рисунок 1.20 – Залежність вихідної напруги від вхідної

По даному графіку визначаємо значення $U_{ВИХ.0}$ при $U_{ВХ.}=U_{ВХ.НОМ}/2$: $U_{ВИХ.0}=13,1\ (В)$.

Розраховуємо коефіцієнт нелінійних спотворень для вихідних каскадів:

$$K_{fВВ}=0,5-\frac{U_{ВИХ.0}}{U_{ВИХ.НОМ.}} \tag{1.49}$$

$$K_{fВВ}=0,5-\frac{16,5}{34,5}=0,022 .$$

Приймемо що загальний коефіцієнт нелінійних спотворень інших каскадів $К_{FIK}$ буде таким самим що коефіцієнт $K_{fВВ}$: $K_{fII}=K_{fВВ}=0,022$.

Тоді загальний коефіцієнт підсилення усього підсилювача потужності буде рівним сумі усіх коефіцієнтів:

$$K_{Г}=K_{fII}+K_{fВВ}, \tag{1.50}$$

$$K_{Г}=0,022+0,022=0,044 .$$

Використана елементна база дозволяє не проводити розрахунок залежності параметрів підсилювача від температури.

1.4 Вибір і обґрунтування компонентної бази

1.4.1 Компоновка друкованого вузла пристрою (вузла)

Вихідні транзистори потужності розміщено по краях друкованої плати, з вертикальним варіантом встановлення для створення можливості кріплення до радіатора.

Під’єднання до джерела живлення відбувається за допомогою скручених провідників, що передбачено конструкцією підсилювача.

Окремо під’єднується до джерела живлення земля силова та земля сигнальна, що зменшує виникнення паразитного зворотного зв’язку.

Компоновка електро радіо елементів та трасування провідників друкованої плати виконувалась з використання програмного пакету P-CAD2006.

Основною вимогою, яка пред’являється при компоновці радіоелементів забезпечення мінімальної довжини провідників та незалежність сигнальної землі та силової. Параметри вимог до мінімальної довжини та оптимальної ширини задаються конструктором при налаштуванні параметрів в програмному пакеті P-CAD2006 проектування друкованого вузла.

1.4.2 Оптимізація компоновки, друкованого вузла

Оптимізація компоновки виконувалась програмним пакетом SPEKTRA в напівавтоматичному режимі що зумовлено вимогою конструктивної сумісності, тобто задається початкове розміщення частини радіоелементів.

Креслення друкованої плати та друкованого вузла з оптимальною компоновкою та трасуванням провідників виконувалось програмою Autodesk AutoCAD тому, що програма P-CAD не дозволяє виконувати наскрізну конструкторську документацію.

2 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

2.1 Актуальність безпеки життєдіяльності людини

Безпека життєдіяльності (БЖД) – наука, що вивчає проблеми безпечного перебування людини в довкіллі в процесі різних видів її діяльності. Якраз діяльність і вирізняє людину від інших істот. Вона є специфічною людською формою активності, необхідною умовою існування людського суспільства. Форми діяльності різноманітні. Вони охоплюють практичні, інтелектуальні і духовні процеси, які протікають в побуті, громадській, культурній, виробничій, науковій та інших сферах життя.

Діяльністю займаються всі – діти, дорослі, люди похилого віку, тому безпека діяльності має відношення до всього людства.

Актуальність ще більше зростає у зв'язку зі сталим розвитком людства на базі, що забезпечує його існування, тобто аксіоми про потенційну небезпеку діяльності – кожний вид діяльності є потенційно небезпечний. Ця аксіома справедлива і для бездіяльності, тому що бездіяльна людина ще більше залежить від діяльності іншої людини.

У сучасних умовах людина виступає в суспільстві як в ролі захисника від негараздів, так і в ролі істоти, що сприяє виникненню небезпек внаслідок своєї виробничої та іншої діяльності.

Гармонійний розвиток природи і техніки можливий тільки в результаті науково обґрунтованого компромісу між об'єктами природи і соціальною, виробничою та іншою діяльністю людини.

Безпека людини є базовою складовою "сталого людського розвитку" (Sustainable Human Development). Він широко використовується ООН як основна характеристика гуманітарного поступу суспільства. Сталий розвиток людства – це такий розвиток, який веде не тільки до економічного, а й соціального, духовного зростання, що сприяє гуманізації національного мента-

літету і збагаченню позитивного загальнолюдського досвіду. Основною ознакою, що відрізняє сталий розвиток від усіх інших форм соціального руху і видозміни, є відновлення природного і культурного довкілля, коли не тільки не знищується життєвий потенціал, а й підвищується соціальна відповідальність людей, гуманізуються взаємини, ставлення, реакції. Тому актуальність питань з безпеки життєдіяльності полягає саме у забезпеченні сталого людського гармонійного розвитку людства і природи. Виходячи з концепції сталого розвитку людства безпеку життєдіяльності найбільш повно можна охарактеризувати як багатопрофільну галузь знань про закони природозберігаючого формування техносфери планети та її збалансованого економічного й суспільного розвитку.

Мабуть, найправильніше бачити безпеку життєдіяльності як науку про закономірності формування, розвитку і стійкого функціонування систем різного рангу та їх взаємовідносин для встановлення комфортних умов існування людини. Безпека життєдіяльності забезпечує загальну освіту в галузі безпеки, що є науково-методичним фундаментом для всіх спеціальних дисциплін з безпеки.

Неможливо вивчати особливості людини, колективу чи суспільства, не враховуючи їх місця в навколишньому середовищі і стану цього середовища. Тому безпека життєдіяльності вивчає людину і її навколишнє середовище в системі “людина – життєве середовище”. Ця система є складною в тому розумінні, що до неї, як правило, входить велика кількість змінних факторів, які мають велику кількість зав’язків між собою.

Людина є одним з елементів (суб’єктом) зазначеної системи, в якій під терміном “людина” розуміється не лише одна істота, індивід, а й група людей, колектив, мешканці населеного пункту, регіону, країни, суспільство, людство загалом. Людину постійно оточує природне та соціальне навколишнє середовище, а також створені нею матеріальні та духовні умови її існу-

вання. Крім того, саме людина має своє індивідуальне середовище – організм.

Організм – це всі тканини і органи людини, в яких протікають ті фізіолого-біологічні процеси, які визначають життя організму, як цілого і які відгороджені від зовнішнього середовища шкірою і слизовими оболонками.

Навколишнє середовище – це вся сукупність природних та антропогенних факторів у середовищі яких існує людина.

Середовище життєдіяльності – сукупність природних та антропогенних факторів, з якими людина взаємодіє прямо чи опосередковано протягом життя. Середовище життєдіяльності є складовою навколишнього середовища і визначається для кожної людини окремо. Середовищем життєдіяльності людства в цілому практично є навколишнє середовище.

2.2 Законодавча та нормативно-правова база з охорони праці

Законодавство України про охорону праці являє собою систему взаємопов’язаних нормативно-правових актів, що регулюють відносини у галузі реалізації державної політики щодо правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров’я і працездатності людини в процесі праці. Воно складається з Закону України “Про охорону праці”, Кодексу законів про працю України, Закону України “Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності” та прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів.

Базується законодавство України про охорону праці на конституційному праві всіх громадян України на належні, безпечні і здорові умови праці, гарантовані статтею 43 Конституції України. Ця ж стаття встановлює також заборону використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров’я

роботах. Ст. 45 Конституції гарантує право всіх працюючих на щотижневий відпочинок та щорічну оплачувану відпустку, а також встановлення скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час.

Інші статті Конституції встановлюють право громадян на соціальний захист, що включає право забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності (ст.46); охорону здоров'я, медичну допомогу та медичне страхування (ст.49); право знати свої права та обов'язки (ст.57) та інші загальні права громадян, в тому числі, право на охорону праці.

Основоположним документом в галузі охорони праці є Закон України "Про охорону праці" від 1992 року з урахуванням подальших поправок, який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних державних органів відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні. Інші нормативні акти мають відповідати не тільки Конституції та іншим законам України, але, насамперед, цьому законові.

Відповідно до Конституції України, Закону України "Про охорону праці" та Основ законодавства України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування у 1999 р. було прийнято Закон України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності" з урахуванням подальших поправок.

До основних законодавчих актів про охорону праці необхідно віднести також "Основи законодавства України про охорону здоров'я" з урахуванням подальших поправок, що регулюють суспільні відносини в цій галузі з метою забезпечення гармонічного розвитку фізичних і духовних сил, високої працездатності і довголітнього активного життя громадян, усунення чинників, які

шкідливо впливають на їхнє здоров'я, попередження і зниження захворюваності, інвалідності та смертності, поліпшення спадкоємності.

Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення" з урахуванням подальших поправок встановлює необхідність гігієнічної регламентації небезпечних та шкідливих факторів фізичної, хімічної та біологічної природи, присутніх в середовищі життєдіяльності людини.

Закон України "Про пожежну безпеку" з урахуванням подальших поправок визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

Окремо питання правового регулювання охорони праці містяться в багатьох інших законодавчих актах України.

Глава 40 Цивільного кодексу України "Зобов'язання, що виникають внаслідок заподіяння шкоди» регулює загальні підстави відшкодування шкоди і у т. ч. відповідальність за ушкодження здоров'я і смерть працівника у зв'язку з виконанням ним трудових обов'язків.

Ст. 7 Закону України "Про колективні договори і угоди" передбачає, що у колективному договорі встановлюються взаємні зобов'язання сторін щодо охорони праці.

Крім вищезазначених законів, правові відносини у сфері охорони праці регулюють інші національні законодавчі акти, міжнародні договори та угоди, до яких Україна приєдналася в установленому порядку, підзаконні нормативні акти: Укази і розпорядження Президента України, рішення Уряду України, нормативні акти міністерств та інших центральних органів державної влади. На сьогодні кілька десятків міжнародних нормативних актів та договорів, до яких приєдналася Україна, а також більше сотні національних законів України безпосередньо стосуються або мають точки перетину із сферою охорони праці.

Висновки

Результатом дипломного проектування є з проектована схема електрична структурна, а на її основі розроблена та розрахована схема електрична принципова. Параметри та технічні характеристики пристрою. Повністю відповідають завданню на дипломний проект та стандартам для даного типу апаратури. Виріб з проектовано на сучасній елементній базі, що дозволило підвищити надійність виробу.

Розроблено конструкцію друкованого вузла з врахуванням вимог ЕСКД.

Проведено розрахунок економічної ефективності виробу, що доводить його конкурентоздатність з іншими виробами такого класу. Проведено аналіз охорони праці в галузі.

Проведено аналіз як виробу так і технології його виготовлення на навколишнє середовище та людину.

Проектування виробу схемотехнічне та конструкторське проводилось з використанням САПР.

Список використаних джерел

1 ГОСТ 24388-88 Усилители сигналов звуковой частоты бытовые. Общие технические условия

2 IEC 60581-6(1979) Акустическая аппаратура и системы высокой верности воспроизведения (Hi-Fi). Минимальные требования к параметрам. Часть 6. Усилители.

3 IEC 60268-3(2000) Оборудование звуковых систем. Часть 3. Усилители.

4 Схемотехніка електронних систем: У 3кн.Кн.1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В.І.Бойко, А.М.Гужій, В.Я. Жуйков та ін. – 2 – ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 366с,: іл.

5 Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. Р15 посібник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А. Мачунського, В.І.Правди. – К.: Ви-ща шк., 1999. – 838с.

6 Електроніка і мікросхемотехніка. / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін. - К.: Обереги, 2000. - Т. 1. - 299 с.

7 Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах. Под ред. Дьяконова В.П. – М.: Радио и связь, 1994. – 280 с.

8 Окснер Э.С. Мощные полевые транзисторы и их применение. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 288 с.

9 Титце У, Шенк А. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982. – 512 с.

10 Терещук Р.М, Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. – К.: Наукова думка, 1981. – 672 с.

11 Козинцева Л.П. Усилители на полевых транзисторах. М.: Связь, 1975. – 96 с.

12 Методичні вказівки по виконанню організаційно-економічної частини дипломних проектів науково-дослідницького характеру для студентів спеціаль-

ності 7.080401 “Інформаційні управляючі системи та технології” 7.090901 “Прилади точної механіки” – Тернопіль, ТДТУ, 2008. – 39- с. Укладачі: д.е.н., доц. Кирич Н.Б., Старший викладач Шевчук Я. М.

13 Технико-экономическое обоснование дипломных проектов/Под. ред. Беклешова В.К. - М.: Высшая школа, 1991.

14 Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. - Львів: Афіша, 2000 – 350с.

15 Винокурова Л.Е., Васильчук М.В., Гаман М.В. Основи охорони праці. – К.: Факт, 2005. – 344 с.

16 Дорогунцов С.І. Екологія. – К.: КНЕУ. – 1999 – 152с.

17 Гайченко В. А., Коваль Г. М. Основи безпеки життєдіяльності людини. – К.: В-во МАУП. – 2004.

Міністерство освіти та науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри

_____ *Дунець В.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)
“____” *червня* 20 *21* р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему: *“Підсилювач низької частоти”*

(назва теми)

Узгоджено
Керівник кваліфікаційної роботи

_____ *Лесів В.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)
“_____” _____ 20 *21* р.

“ВИКОНАВЕЦЬ”
Студент групи *РАс-41*

_____ *Форгель В.С.*
(підпис) (прізвище та ініціали)
“____” _____ 20 *21* р.

Тернопіль 20 *21*

1 НАЗВА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

1.1 Назва: *“Підсилювач низької частоти”*

1.2 Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ університету про затвердження кваліфікаційної роботи “ *31* ” *травня* 20 *21* року *№ 4/7-435*

2 ВИКОНАВЕЦЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

2.1 Студент *Форгель Віталій Степанович групи РАс-41, кафедри радіотехнічних систем, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*

3 Метою кваліфікаційної роботи є:

– проектування схеми електричної структурної;
– проектування схеми електричної принципової;
– розрахунок параметрів каскадів проектованого виробу;
– проектування друкованого вузла;
– розрахунок собівартості проектованого виробу;

4 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ:

4.1 Вихідна потужність, Вт	150;
4.2 Рівень нелінійних спотворень (TND), %	0,0044;
4.3 Рівень інтермодуляційних спотворень (IMD), дБ	±1,5;
4.4 Демпінг-чинник (коефіцієнт демпфування)	200;
4.5 Частотний діапазон – частоти, відтворювані підсилювачем при нормованому спаду і підйому (нерівномірності), ± 0,5 дБ для діапазону 20 Гц – 20 кГц, або +1/-3 дБ для діапазону 5 Гц – 100 кГц, Гц	31-15000;
4.6 Відношення сигнал/шум, дБ	105

5 ВИМОГИ ДО ДОКУМЕНТАЦІЇ:

5.1 Конструкторська документація має відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ.

5.2 Комплект конструкторської документації:

– пояснювальна записка;
– схема електрична структурна;
– схема електрична принципова;
– друкована плата (деталь);
– друкований вузол (складальне креслення).

6 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ:

Таблиця 6.1 – Етапи виконання кваліфікаційної роботи

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1.	Розробка та затвердження технічного завдання	
2.	Проектування схеми електричної структурної	
3.	Розрахунок каскадів схеми електричної принципової	
4.	Обґрунтування вибору компонентної бази	
5.	Компоновка друкованого вузла	
6.	Спеціальна частина	
7.	Розділ охорона праці та безпека життєдіяльності	
8.	Нормоконтроль	
9.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	
10.	Захист кваліфікаційної роботи	

Термін виконання кваліфікаційної роботи узгоджується з керівником і з графіком виконання.

7 ДОДАТКОВІ УМОВИ ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

7.1 Під час виконання кваліфікаційної роботи в дане технічне завдання можуть вноситися зміни та доповнення.

ДОДАТКИ

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
	Конденсатори		
C1, C2	Supertech RD15 NPO – 1,0 мкФ ±5%	2	
C3, C4	Supertech RD15 NPO – 30 ±5%	2	
C5, C6	Supertech RD15 NPO -6800 ±5%	2	
C7, C8	Supertech RD15 NPO – 15 ±5%	2	
C9, C10	Supertech RD15 NPO – 0,22 мкФ ±5%	2	
	Резистори		
	MF-12 YAGEO		
	PV36 Murata		
R1...R4	MF-12 – 1,2 кОм ±5%	4	
R5, R6	MF-12 – 47 кОм ±5%	2	
R7, R8	MF-12 – 5,6 кОм ±5%	2	
R9, R10	MF-12 – 62 кОм ±5%	2	
R11, R12	MF-12 – 5,6 кОм ±5%	2	
R13	MF-12 – 100 Ом ±5%	1	
R14	MF-12 – 12 кОм ±5%	1	
R15	MF-12 – 100 Ом ±5%	1	
R16	MF-12 – 12 кОм ±5%	1	
R17, R18	MF-12 – 220 Ом ±5%	2	
R19	MF-12 – 100 Ом ±5%	1	
R20	PV36 1 кОм+-10%	1	

Перш. використ.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № оригі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ФРКЗ.023.001 ПЕ

Розроб.	Форгуль В.С.	
Перевір.	Лесів В.В.	
Реценз.		
Н. Контр.	Марценюк А.С.	
Затверд.	Дунець В.Л.	

Підсилювач низької частоти

Літ.	Арк.	Акрушів
	1	2

ТНТУ імені Івана Пулюя, ФПТ, каф. РТ, гр. РАс-41

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
R21	MF-12 – 100 Ом ±5%	1	
R22	PV36 1 кОм+-10%	1	
R23, R24	MF-12 – 1 кОм ±5%	2	
R25, R26	MF-12 – 27 кОм ±5%	1	
R27...R34	MF-12 – 100 Ом ±5%	8	
R35...R42	MF-12 – 5,0 – 0,2 Ом ±5%	8	
R43...R50	MF-12 – 1 кОм ±5%	8	
R51, R52	MF-12 – 2,0 – 4,7 Ом ±5%	2	
R53...R56	MF-12 – 10 кОм ±5%	4	
VD1...VD8	Діод КД522Б дР3.362.029ТУ	8	
VT1, VT2	BCM856BS NXP Semiconductors	3	
VT3	2SC547 Panasonic Semiconductor	1	
VT4	BCM847BV NXP Semiconductors	1	
VT5	2SC547 Panasonic Semiconductor	1	
VT6	BCM847BV NXP Semiconductors	1	
VT7	2SC5200 Toshiba	1	
VT8	2SA1943 Toshiba	1	
VT9	2SC5200 Toshiba	1	
VT10	2SA1943 Toshiba	1	
VT11	2SC5200 Toshiba	1	
VT12	2SA1943 Toshiba	1	
VT13	2SC5200 Toshiba	1	
VT14	2SA1943 Toshiba	1	
VT15,VT16	2SC547 Panasonic Semiconductor	2	
XS1	Роз'єм PF-50	1	

Перш. використ.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № оригін.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ФРКЗ.023.001 ПЕ	Арк. 2

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
A1			ФРК6.023.010 СК	Складальне креслення		
A1			ФРК3.023.010 Е3	Схема електрична		
				принципова	1	
A4			ФРК3.023.010 ПЕ	Перелік елементів	1	
A4			ФРК3.023.010 ПЗ	Пояснювальна записка	1	
				Деталі		
A1		1	ФРК7.817.010	Плата друкована	1	
A4		3	ФРК8.023.010-01	Перемичка L=7,5 мм	2	П1, П6
A4		4	ФРК8. 023.010-02	Перемичка L=17,5 мм	3	П2,П3,П5
A4		5	ФРК8.023.010-03	Перемичка L=20 мм	1	П4
				Інші вироби		
		9		Діод КД522Б дР3.362.029ТУ	6	VD1...VD6

Перш. використ.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № оригін.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ФВС6.023.010 СК

Розроб.	Форгель В.С.		
Перевір.	Лесів В.С.		
Реценз.			
Н. Контр.	Марценюк А.С.		
Затверд.	Дунець В.Л.		

Підсилювач низької частоти

Літ.	Арк.	Аркушів
	1	3

ФПТ, каф. РТ, гр. РАс-41

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Конденсатори:		
				Supertech RD15 NPO		
		10		15 пФ ±5%	2	C7,C8
		11		30 пФ ±5%	2	C3,C4
		14		6800 пФ ±5%	2	C5,C6
		16		0,22мкФ ±5%	2	C9,C10
		17		1,0мкФ ±5%	2	C1,C2
				Резистори		
				MF-12 YAGEO		
				PV36 muRata		
		33		MF-12 - 100 Ом ±5%	2	R13,R15,
					2	R19,R21,
					8	R27...R34
		34		MF-12 - 220 Ом ±5%	2	R17, R18,
				MF-12 - 1 кОм ±5%	2	R23, R24,
					8	R43...R50,
		35		MF-12 - 1,2 кОм ±5%	4	R1...R4
		36		MF-12 - 5,6 кОм ±5%	2	R7, R8,
					2	R11, R12
		37		MF-12 - 10 кОм ±5%	4	R53...R56
		38		MF-12 - 12 кОм ±5%	2	R14, R16
		39		MF-12 - 27 кОм ±5%	2	R25, R26
		40		MF-12 - 47 кОм ±5%	2	R5, R6
		41		MF-12 - 62 кОм ±5%	2	R9, R10

Перш. використ.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № оригін.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ФВС6.023.010 СК	Арк. 2

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		43		MF-12 - 2,0 - 4,7 Ом ±5%	2	R51, R52
		44		MF-12 - 5,0 - 0,2 Ом ±5%	8	R35...R42
		46		PV36 1 кОм+-10%	2	R20, R22
		48		Роз'їм RF-50	1	XS1
		49		Транзистори		
		52		BCM856BS NXP Semiconductors	2	VT1...VT3, VT5
		54		BCM856BS NXP Semiconductors	2	VT4,VT6
		56		2SC5200 Toshiba	2	VT7,VT9
					2	VT11,VT13
		58		2SA1943 Toshiba	2	VT8,VT10
					2	VT12,VT14
		62		2SC547 Panasonic Semiconductor		VT15,VT16
				Матеріали		
				Лак УР-231 ТУ-10 863 76		
				Припій ПОС-61 ГОСТ21931-73		
				Каніфоль ГОСТ 19113-73		
				Фарба МКЗ-6, біла		
				ТУ29-02-659-78		

Перш. використ.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № оригін.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ФВС6.023.010 СК	Арк. 3