

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

з дисципліни _____ Аналогова електроніка _____
на тему: _____ Звуковий процесор _____

Студента 2 курсу групи ДК-92
Напряму підготовки: Телекомунікації та
радіотехніка

_____ Бодака Є. Є. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник:

_____ доцент, к.т.н. Короткий Є.В. _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна оцінка: _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії: _____ доцент, к.т.н. Короткий Є.В. _____
(підпис) (вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ _____
(підпис) (вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Київ - 2021 рік

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Розділ I – Розробка принципової схеми приладу.....	5
1.1. Вибір мікросхеми.....	5
1.2. Розробка темброблоку.....	6
1.3. Розробка блоку перевантаження.....	8
1.4. Розробка мікшера.....	9
1.5. Компонентна база.....	10
1.6. Принципова схема.....	11
Розділ II -- Розрахунок вузлів схеми.....	12
2.1. Розрахунок і призначення елементів блоку перевантаження.....	12
2.2. Розрахунок схеми темброблоку.....	15
2.3 Розрахунок мікшера.....	18
Розділ III -- Моделювання роботи приладу.....	19
3.1. Моделювання роботи схеми перевантаження.....	19
3.2. Моделювання роботи темброблоку.....	21
3.3. Моделювання вихідного сигналу схеми.....	23
Висновок.....	25
Перелік використаних джерел.....	26

ПЕРЕЛІК УМОВНИЙ СКОРОЧЕНЬ

ОП – операційний підсилювач.

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика.

ФЧХ – фазо-частотна характеристика.

ВСТУП

Звуковий процесор є розповсюдженим пристроєм у музикальній індустрії й поза її межами, він має різне виконання таке як мобільний переносний пристрій з достатнім набором функцій, так і розширенні збірки для яких передбачають штативи та захисні короби. Головною задачею пристрою є робота зі звуковим сигналом, його мікшування, спотворення за допомогою електричної схеми та внесення змін через елементи характеристики яких можна регулювати вручну.

Метою роботи є розробка простого по конструкції звукового процесора, який зможе в міру своєї простоти виконувати декілька важливих функцій по роботі зі звуковим сигналом.

Для досягнення мети потрібно вирішити три задачі розробки:

1. Вирішити з яких блоків буде складатися схема, порівняти характеристики з іншими щоб вибрати кращу.
2. Розрахувати принципову схему так щоб її характеристики задовольняли потреби користувача, але опиралися на технічні рішення конструктора.
3. Провести ряд тестів і впевнитись, що схема працює як задумалося й описувалось у першому розділі.

У першому розділі піде розмова про «блоки», вони являють собою міні схеми які роблять певне перетворення. Проміжним етапом виконання задачі є правильна комплектація блоків, так щоб вони не конфліктували та не протидіяли один одному.

Другий розділ посвячений розрахункам номіналів схеми. Найбільше я хотів би приділити уваги розрахунку RC-фільтрів, через те, що схема матиме змінні елементи, важливо щоб номінали не перевищували межі амплітуди пропускання звукового сигналу.

Третій розділ наповнений графічними зображеннями сигналу, порівнянням вхідних і вихідних характеристик, наведенням проміжних висновків і недоліків схеми, а також можливі варіанти їх вирішень.

Висновком роботи є детальний огляд сконструйованого пристрою, характер його роботи, позитивні та негативні сторони, його призначення, функціональність, можливість модернізації.

РОЗДІЛ I

Розробка принципової схеми приладу

1.1. Вибір мікросхеми

Найкращим вибором мікросхеми на мій погляд є схеми одноканальний операційний підсилювач LM741. В міру своїх характеристик підсилення і низьких вихідних шумів, для звукової техніки компактнішої мікросхеми не знайти. У своєму корпусі має: інвертуючий та неінвертуючий вхід, два зовнішніх виводи Offset балансування - призначені для встановлення умовного нуля на виході, виводи живлення та вихід мікросхеми. Максимальна допустима напруга живлення $+22V$, максимальна напруга на входах $+15V$. Мікросхема, не потребує більше каналів, для моїх задач.

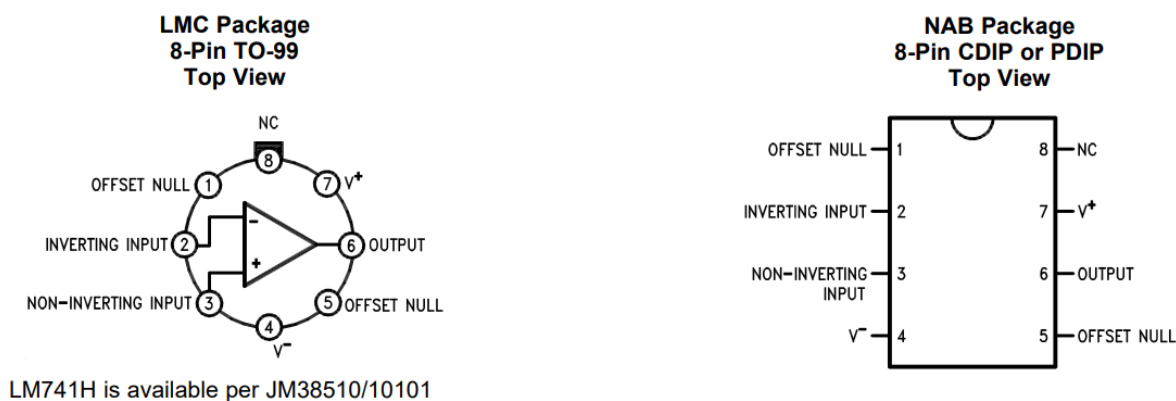


Рис.1.1 Принципова схема ОП та позначення каналів

Важливим етапом розробки є проектування структури схеми, від цього залежить подальша складність процесів та розв'язання поставлених задач, якщо блоки конфліктують між собою схема є несправною тобто не виконує своїх функцій. Конфлікт блоків може бути пов'язаний з тим, що сигнал посупивши на вхід наступного блоку є занадто слабим, або занадто великим і його подальша обробка дає незадовільний результат на виході приладу.

1.2. Розробка темброблоку

Спочатку схема являла собою пасивний мікшер для сумування вхідних сигналів, для розширення можливостей застосування приладу я почав розробку регулюючого RC фільтру, з часом його складність змінювалася, кінцевий прототип показав хороші характеристики під час моделювання.

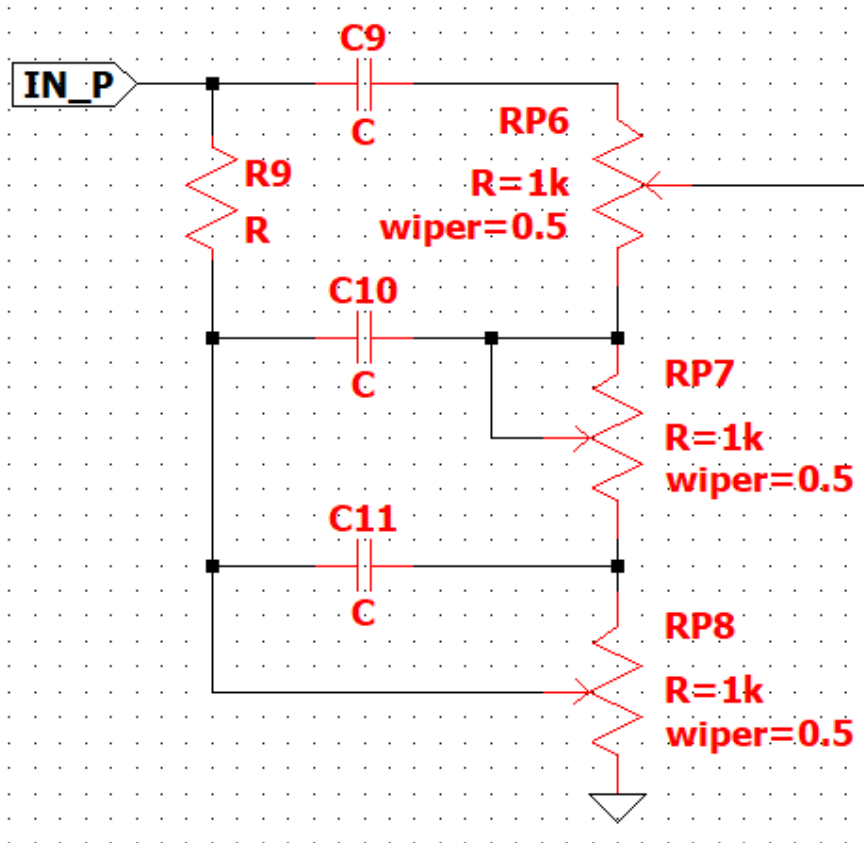


Рис.1.2 Темброблок

В комплекті маємо три RC кола та постійний опір розриву, схема спроектована так щоб потенціометри змінюючи свій опір впливали на АЧХ виходу. Впливаючи на частоту зрізу яка зміщується в діапазон більших, або менших частот кожне коло впливає на наступні характеристика АЧХ має вигляд кривої.

Провівши виміри, на виході темброблоку можна бачити які спотворення вносить кожен з опорів. Кожен фільтр не лежить в межах якогось із діапазонів, а може зміщувати частоту зрізу у потрібному напрямку. Потенціометр RP6 вважається головним, так як він на межі балансу між не суттєво зміненим сигналом та впливом додаткових елементів.

Низькі частоти	Середні частоти	Високі частоти
20-80 Hz	200-900 Hz	2-8 kHz

Таблиця 1.1 Умовні діапазони частот звукового сигналу

Далі зроблена розв'язка балансу між двома частинами схеми. Потенціометри RP9 та RP10 знаходяться в одному корпусі і тому виділенні рамкою, підчас обертуту кожен з них змінює свій опір у протилежному напрямку, середнє положення фіксує що сигнал на виході є сумою однаково поданих сигналів на вхід. У випадку переміщення ручки потенціометрів до крайнього положення, регулюється який із сигналів більше поступить до виходу. Схема спроектована для регулювання балансу між правим та лівим каналом звукового роз'єму по типу Jack 3.5.

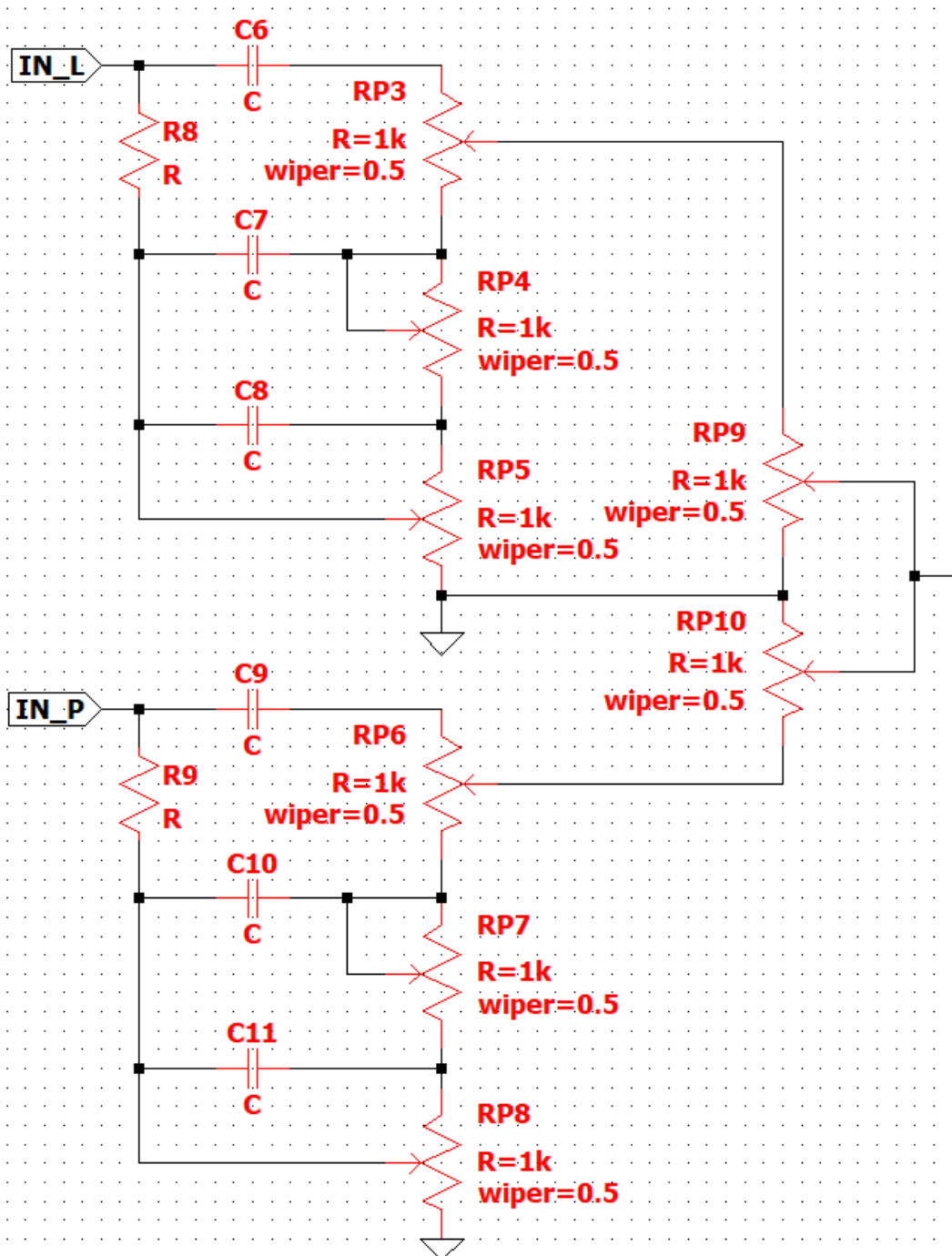


Рис. 1.3 Темброблок під роз'єм Jack 3.5

1.3. Розробка блоку перевантаження

Невід'ємною функцією звукового процесора є підсилення сигналу. Скориставшись мікросхемою LM741 і не складного розрахунку коефіцієнту підсилення був отриманий задовільний результуючий, сигнал без втрати по якості звукового ряду та просідання амплітуди на по частотах. На перший погляд використання двох ОП U1 та U2 з одним каналом є не раціональним, зауважу, що мікросхеми знаходяться в різних блоках і мають багато з'єднань.

Застосувавши нелінійну характеристику діоду в межах амплітуди від 0.1 В до 1 В можна отримати цікавий ефекти під назвою distortion або перегруз. Надлишковий сигнал на виході відсікається за допомогою двох діодів, або світлодіодів, такий підхід може по різному вплинути на сигнал. У випадку підключення світлодіодів буде витрачатися енергія на фотоефект, це може добре вплинути на звук у випадку опрацювання сигналів високої частоти та може згладити гармоніки. Потенціометр RP1 між інвертуючим та неінвертуючим входом регулює підсилення і сам ефект перевантаження, RP2 призначений для регулювання амплітуди сигналу виходу і уникненню конфлікту з наступними блоками.

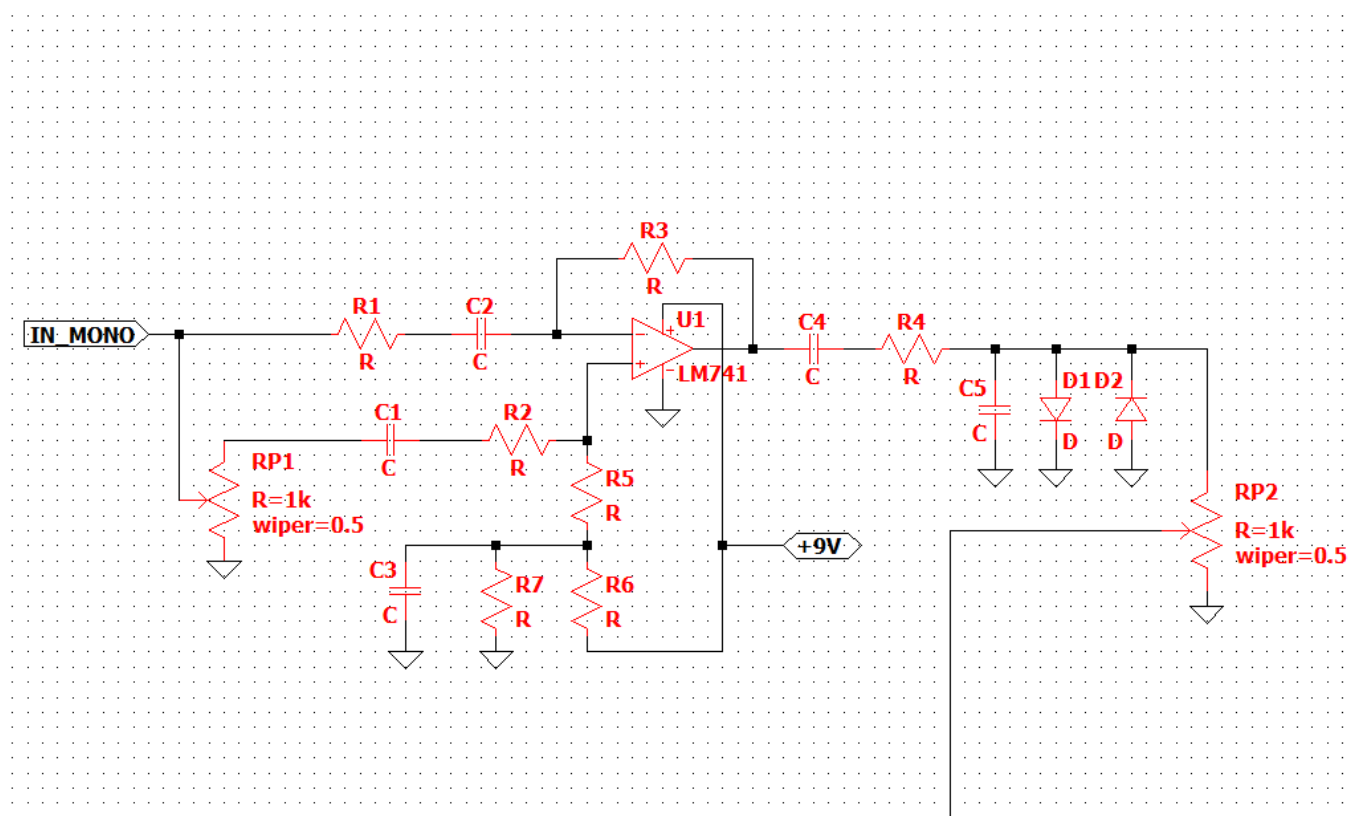


Рис.1.4 Блок перевантаження

1.4. Розробка мікшера

Останнім сектором конструювання принципової схеми приладу є мікшер. Сама відповідальна частина пристрою поєднує всі сигнали які приходять з первинних блоків. Принцип не складний, тут застосовується простий суматор і конденсатор розриву. Щоб постійна напруга не впливала на джерело змінного сигналу, а також не порушувався режим роботи схеми по постійному струмі. У схемі виділяється конденсатор C12 і якщо повернутись до попереднього блоку перевантаження можна побачити що C2 має теж саме призначення, але їх відмінність у кількості сигналів що приходять на вхід. Потім міксований сигнал підсилюється, відділяється та через RC фільтр йде на зовні.

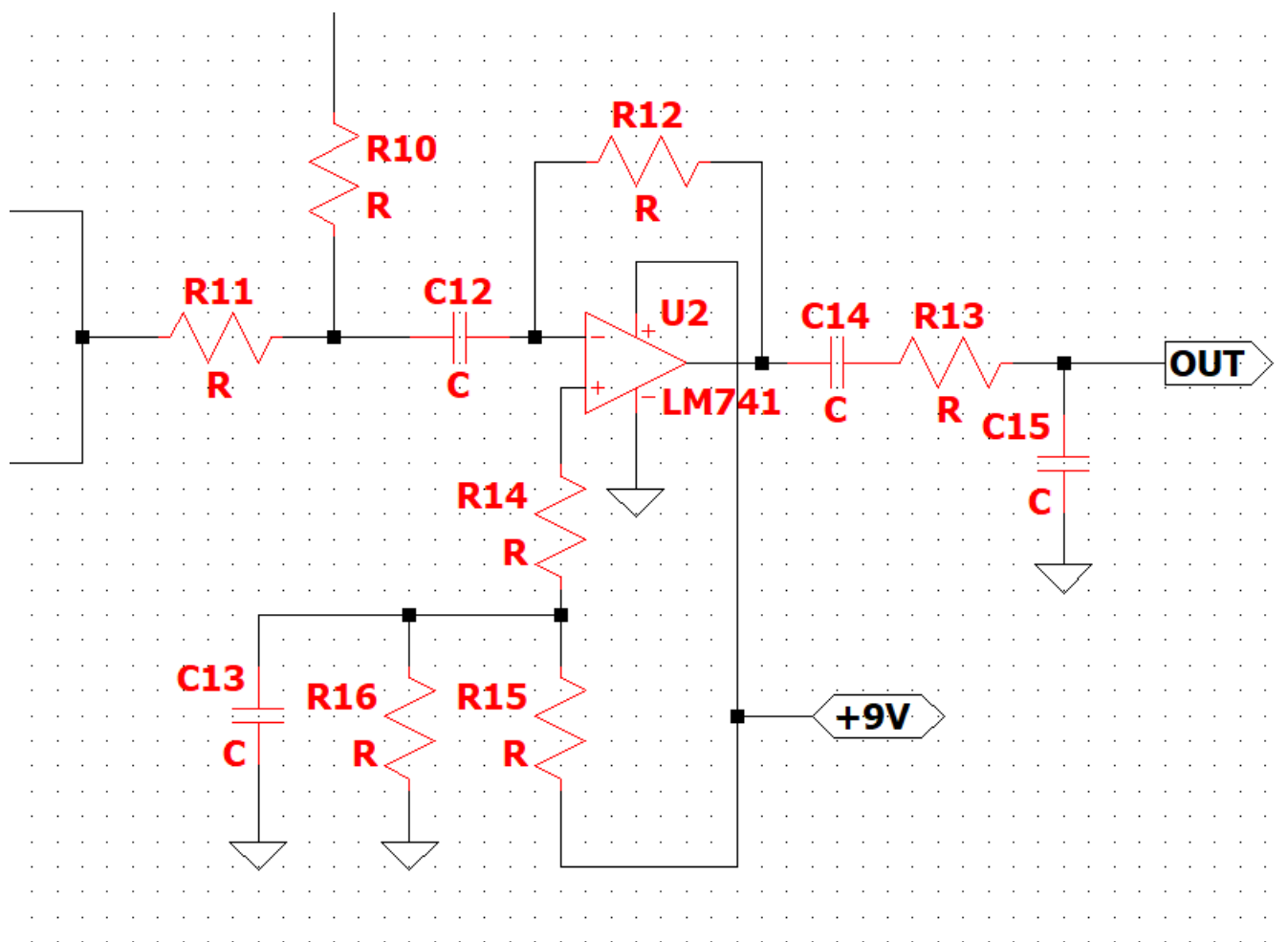


Рис.1.5 Схема мікшера

1.5. Компонентна база

Список компонентів змінювався на протязі всього часу розробки схеми і навіть під час написання розрахункової роботи. Так як деякі номінали компонентів могли показатися дивними вирішувалось їх замінити, але через деякий час ставало зрозуміло чому елементи мали саме такі номінали (*не збережені дані моделювання проекту*).

Позначення	Номінали	Кількість	Примітка
Резистори			
R1,R10,R11	4.7k	3	
R2,R13,R4,R12	10k	4	
R8,R9	100k	2	
R3,R5,R6,R7,R14,R15,R16	1M	7	
Конденсатори			
C6,C7,C8,C9,C10,C11	22n	6	
C5,C15	0.001u	2	
C1	0.01u	1	
C3,C4,C13,C14	1u	4	
C2,C12	10u	2	
Потенціометри			
RP3,RP4,RP5,RP6,RP7,RP8	50k	6	
RP1,RP2	100k	2	
RP9,RP10	1M	2	В одному корпусі
Діоди			
D1,D2	1N914	2	
Мікросхеми			
U1,U2	LM741	2	ОП

Таблиця 1.2 Список елементів та їх позначення

1.6. Принципова схема

Розібравшись з блоками маємо схему процесора, що перетворює сигнал, корегує амплітуду на певних частотах має елементи управління, що розширюють його можливості.

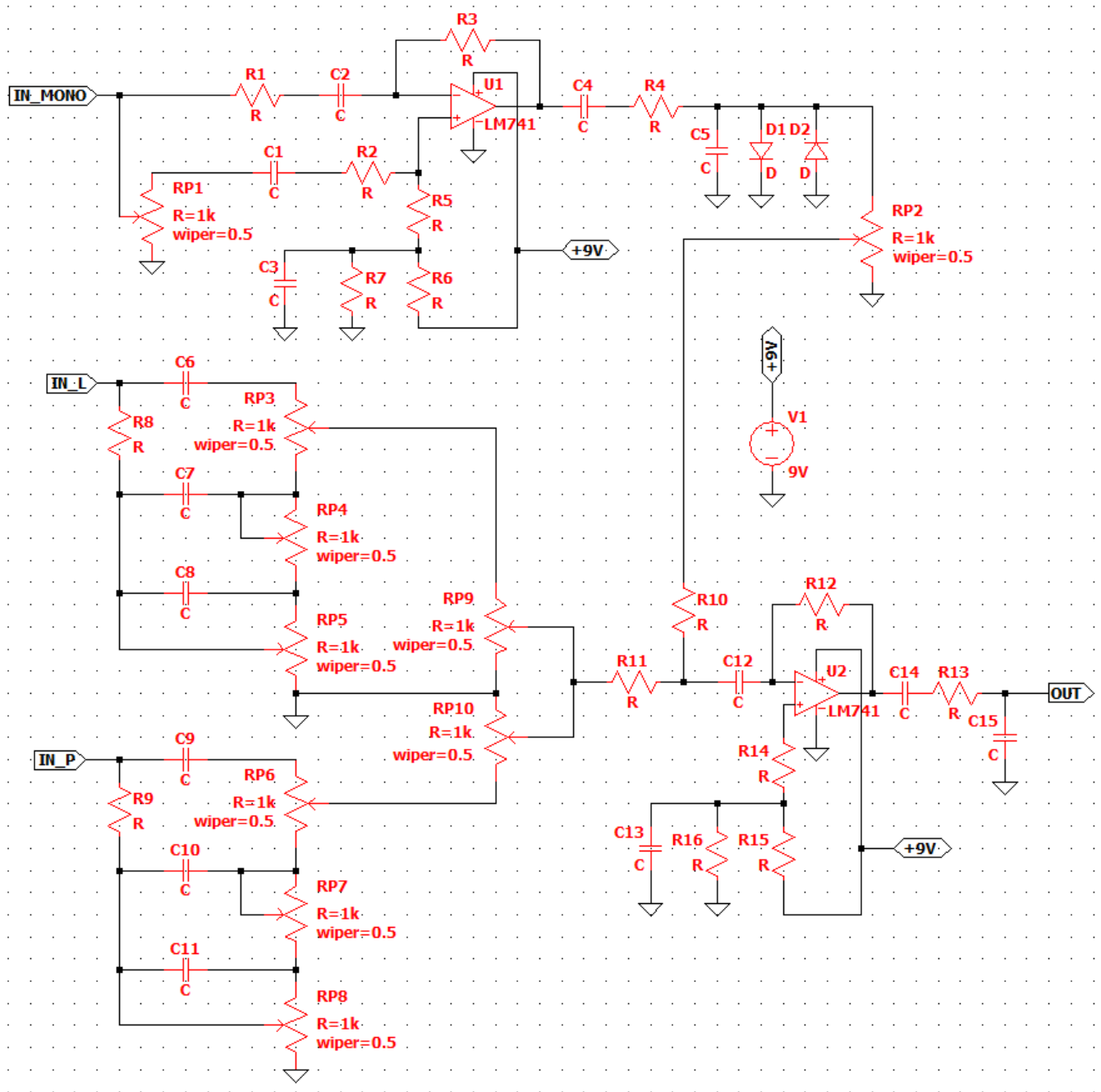


Рис.1.5 Принципова схема і позначення елементів

РОЗДІЛ II

Розрахунок вузлів схеми

2.1. Розрахунок і призначення елементів блоку перевантаження

ОП підключений в диференційному режимі де сигнал подається на два входи інвертуючий і неінвертуючий. Отже припустимо, що при однакових номіналах $R1$ та $R3$ (зворотній зв'язок), на входи схеми подані напруги, оскільки потенціали по обидва боки резистора $R1$ рівні то струм через нього не протікає, а значить дорівнює нулю і струм через резистор $R3$. Тобто два резистора при однакових номіналах не виконують ніякої дії і по суті ми отримуємо неінвертуючий повторювач, відповідно на виході отримуємо таке значення напруги як і на вході. У випадку повороту потенціометра $RP1$ ми отримуємо різницю напруги і протікання струму.

Диференціальний підсилювач призначений для підсилення різниці сигналів, що надходять на його входи. Розрахунок схеми будується на принципі рівності напруги на входах підсилювача. Струм через ланцюжок резисторів $R1$ - $R3$ дорівнює:

$$I_{R1\ R3} = \frac{U_{out} - U_{inv}}{R3} = \frac{U_{inv} - U_{in}}{R1}$$

Звідси напруга на вході, що інвертує:

$$U_{inv} = \frac{U_{out} * R1 + U_{in} * R3}{R1 + R3}$$

Напруга на неінвертуючому вході:

$$U_{not\ inv} = U_{RP1} \frac{R2}{R1 + R3}$$

Таким чином, напруга на вході операційного підсилювача:

$$U_{out} = (U_{RP1} - U_{in}) \frac{R3}{R1}$$

Якщо ми приймемо, що:

$$\frac{R3}{R1} = \frac{R7}{R2}$$

(З урахуванням що опір $R2$ залежить від подільника напруги та потенціометра $RP1$)

Перетворимо і спростимо вираз:

$$U_{out} = (U_{in1} - U_{in2}) \frac{R3}{R1}$$

($in1$ та $in2$ є відповідними входами ОП)

Вирішивши систему отримаємо:

$$U_{out} = U_{in1} \frac{R3}{R1 + R2} * \frac{R3 + R4}{R3} - U_{in2} \frac{R3}{R1}$$

Таким чином, коефіцієнт посилення диференціального сигналу визначається відношенням $R3$ до $R1$.

$$K = \frac{R3}{R1} = \frac{10^6 \text{ Ом}}{4,7 * 10^3 \text{ Ом}} \approx 212,7$$

На перший погляд коефіцієнт занадто великий, але його розмір обумовлений призначенням схеми, а саме перевантаження сигналу. Отриманий сигнал є підсиленим і далі проходить через RC фільтр і обмежується двома діодами підтягнутих на землю.

Частота зрізу фільтру:

$$f_{R4 C5} = \frac{1}{2 * \pi * R4 * C5} = \frac{1}{2 * \pi * 10^4 * 0,001 * 10^{-6}} \approx 15915,4 \text{ Hz} \approx 15,9 \text{ kHz}$$

Частота відсікається так як є безкорисною для звукового сигналу.

Розрахуємо конденсатори які призначені для того щоб не порушувався режим роботи схеми по постійному струмі, враховується опір попереднього каскаду та нижній поріг частоти сигналу в даних вузлах.

$$C \geq \frac{1}{f_H * R_{BX}}$$

Для конденсатора C2 обираємо мінімальну частоту яку може почути людське вухо:

$$C2 \geq \frac{1}{20 * 4700} \approx 10 \text{ uF}$$

Конденсатор C4 не залежить від частоти тому беремо одиницю для зручності розрахунку:

$$C4 \geq \frac{1}{1 * 10^6} \approx 1 \text{ uF}$$

Для конденсатора C1 опором попереднього каскаду є потенціометр RP1, візьмемо його номінал:

$$C1 \geq \frac{1}{100 * 10^5} \approx 0,01 \text{ uF}$$

Конденсатор C3 має аналогію з C4 тому отримуємо той же номінал:

$$C3 \geq \frac{1}{1 * 10^6} \approx 1 \text{ uF}$$

2.2. Розрахунок схеми темброблоку

Темброблок це складний по структурі фільтр високих частот який від зміни опорів може змінювати свій порядок. «Порядок» пасивного фільтра визначається кількістю реактивних елементів, тобто конденсаторів або індуктивностей, які присутні в ланцюзі. Фільтр вищого порядку має більше реактивних елементів, що призводить до більшого зсуву фази і більш крутому спаду АЧХ. Додаючи один реактивний елемент до фільтру, переходячи від першого порядку до другого або від другого до третього, ми збільшуємо максимальний спад на 20 дБ / декада. Більш крутий спад призводить до швидшого переходу від низького загасання до високого загасання, і це може привести до поліпшення продуктивності роботи, коли немає широкої смуги частот, що відокремлює потрібні частотні компоненти від шумових компонентів, але враховуючи, що фільтр пасивний, він також послаблює потрібні частоти.

Для спрощення розрахунку промодельював можливі еквівалентні схеми включення темброблоку. Як за приклад розрахунку візьмемо третій режим включення(100).

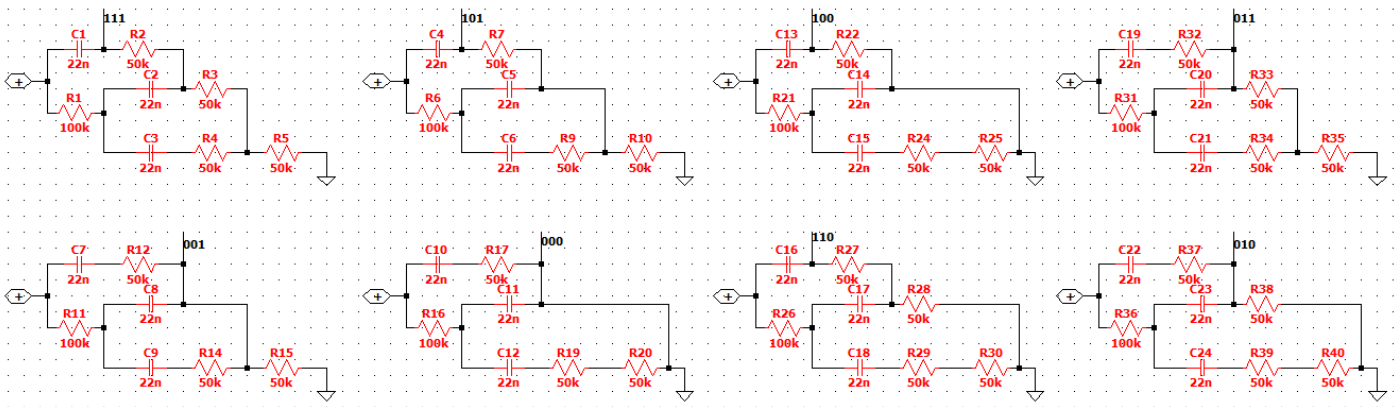


Рис.2.6 Можливі варіанти включення темброблоку

Для розрахунку частоти зрізу застосовуємо:

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Також ми можемо розрахувати поведінку фільтра використовуючи еквівалентну схему заміщення конденсаторів реактивними опорами. Таким чином схема спрощується до ділянки напруги.

Напруга змінюється за законом:

$$U_{out} = U * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

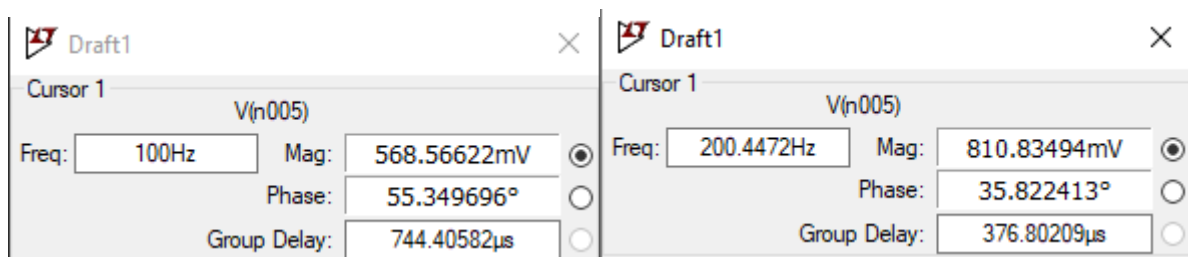
Візьмемо розрахунок реактивного опору конденсатору:

$$X_C = \frac{1}{2\pi * f * C}$$

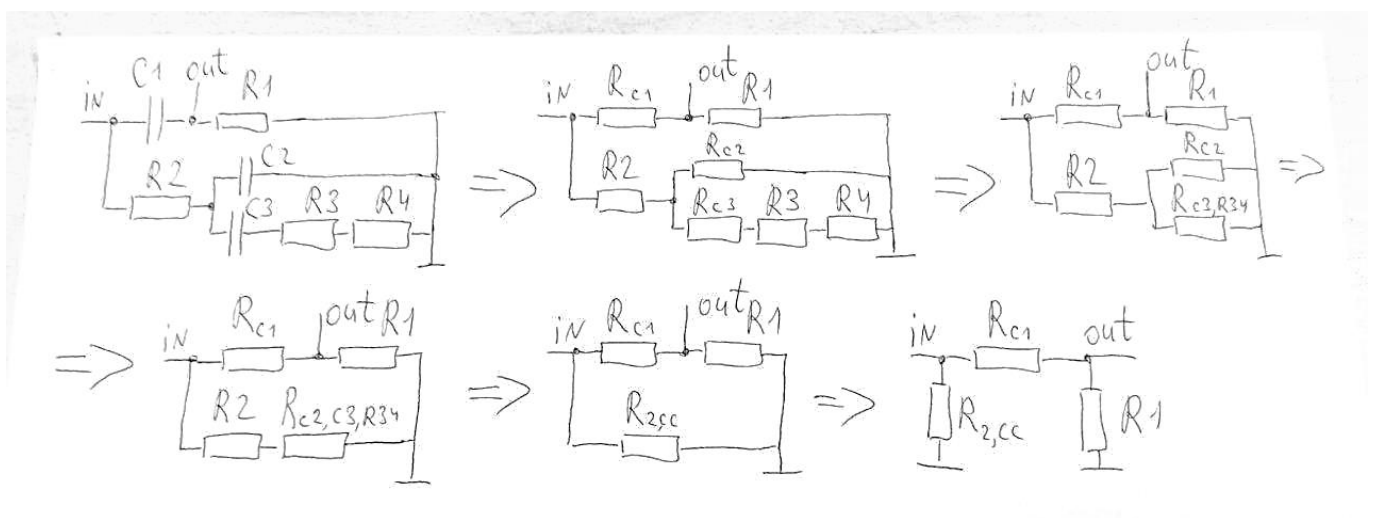
Знаючи, що у нас фільтр високих частот можемо припустити що:

$$U_{out} = U * \left(\frac{X_C}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} \right)$$

Для звірення результатів заміряємо АЧХ на частоті $f_1 = 100 \text{ Hz}$ і $f_2 = 200 \text{ Hz}$



Замістивши ємності реактивними опорам, спрощуємо схему для отримання опору дільника, та робимо розрахунок. Всі ємності однакові, тому реактивний опір не змінюється (*позначення застосовуються лише для розрахунку і не входять до головної схеми*).



$$X_{cf1} = \frac{1}{2\pi * 100 * 22 * 10^{-9}} = 72.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{C3,R23} = 50 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega + 72.3 \text{ k}\Omega = 172.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{C2,C3,R23} = \frac{172.3 \text{ k}\Omega * 72.3 \text{ k}\Omega}{172.3 \text{ k}\Omega + 72.3 \text{ k}\Omega} = 50.9 \text{ k}\Omega = R_{cc}$$

$$R_{2,cc} = 100 \text{ k}\Omega + 50.9 \text{ k}\Omega = 150.9 \text{ k}\Omega$$

Спростивши схему отримали дільник напруги. В ході моделювання я визначив, що опір $R_{2,cc}$ не впливає на вихідний сигнал, тому залишається два номінали які не були заміщення і з цього можемо стверджувати, що фільтр має перший порядок.

Закінчимо розрахунок і повторимо для більшої частоти (*не враховуючи попередні розрахунки*). Напруга на вході $U = 1 \text{ V}$.

$$U_{out f1} = 1 \text{ V} * \left(\frac{50 * 10^3}{\sqrt{(72.3 * 10^3)^2 + (50 * 10^3)^2}} \right) = 0,568 \text{ V}$$

$$X_{cf2} = \frac{1}{2\pi * 200 * 22 * 10^{-9}} = 36.1 \text{ k}\Omega$$

$$U_{out f2} = 1 \text{ V} * \left(\frac{50 * 10^3}{\sqrt{(36.1 * 10^3)^2 + (50 * 10^3)^2}} \right) = 0,81 \text{ V}$$

Порівнявши результати бачимо, що теоретичний розрахунок є вірним.

2.3. Розрахунок мікшера

ОП включений у режимі сумуючого підсилювача, тобто вихідний сигнал має величину пропорційну двом вхідним напругам з блоку перевантаження та темброблоку. Так як вхідні опори однакові, то коефіцієнти підсилення рівні:

$$K = \frac{R_{12}}{R_{10} \& R_{11}} = \frac{10^6 \Omega}{4,7 * 10^3 \Omega} \approx 212,7$$

На виході маємо RC фільтр, він виконує таку ж роль як і в схемі перевантаження, зменшує амплітуди непотрібних високих частот.

$$f_{R4 \ C5} = \frac{1}{2 * \pi * R4 * C5} = \frac{1}{2 * \pi * 10^4 * 0,001 * 10^{-6}} \approx 15915,4 \text{ Hz} \approx 15,9 \text{ kHz}$$

Аналогічний розрахунок для конденсаторів :

$$C_{12} \geq \frac{1}{20 * 4700} \approx 10 \text{ uF}$$

$$C_{14} \geq \frac{1}{1 * 10^6} \approx 1 \text{ uF}$$

$$C_{13} \geq \frac{1}{1 * 10^6} \approx 1 \text{ uF}$$

РОЗДІЛ III

Моделювання роботи приладу

3.1. Моделювання роботи схеми перевантаження

На просторах інтернету зумів знайти модель змінного резистора, в середині це дільник напруги який від параметру `wiper` може змінювати внутрішні опори. Таким чином підвищилась швидкість обробки результатів, змінюючи лише один параметр мені не потрібно розраховувати новий дільник для конкретного режиму.

На вхід схеми подається сигнал який запозичений із звукового файлу розширення `wav`. На осцилографі зображений вхідний та вихідний сигнал схеми і як впливає зміна параметрів потенціометрів на вихід.

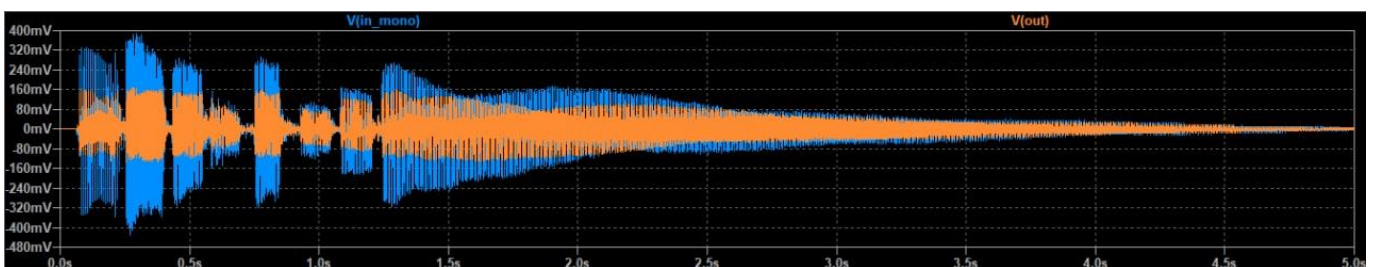


Рис.3.7 Вхідний і вихідний сигнал $RP1 \text{ wiper}=0.1$, $RP2 \text{ wiper}=0.5$

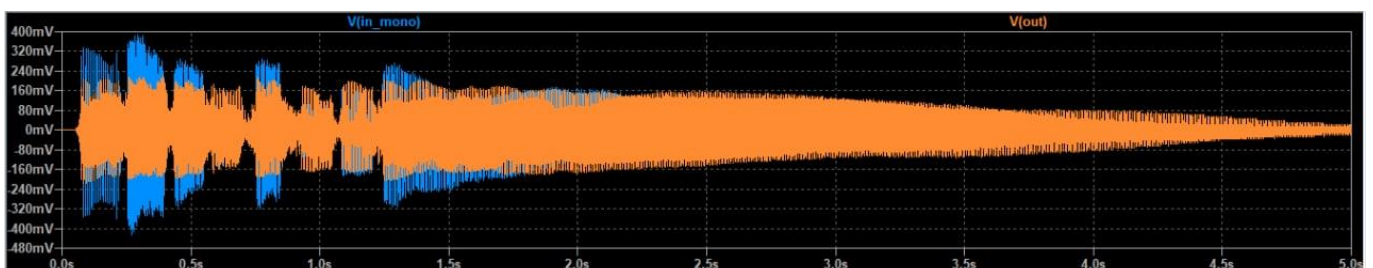


Рис.3.8 Вхідний і вихідний сигнал $RP1 \text{ wiper}=0.9$, $RP2 \text{ wiper}=0.5$

Перевантаження виникає через те, що є різниця на входах ОП, яка регулюється потенціометром $RP1$. Вихідний сигнал налаштовується за допомогою потенціометра $RP2$.

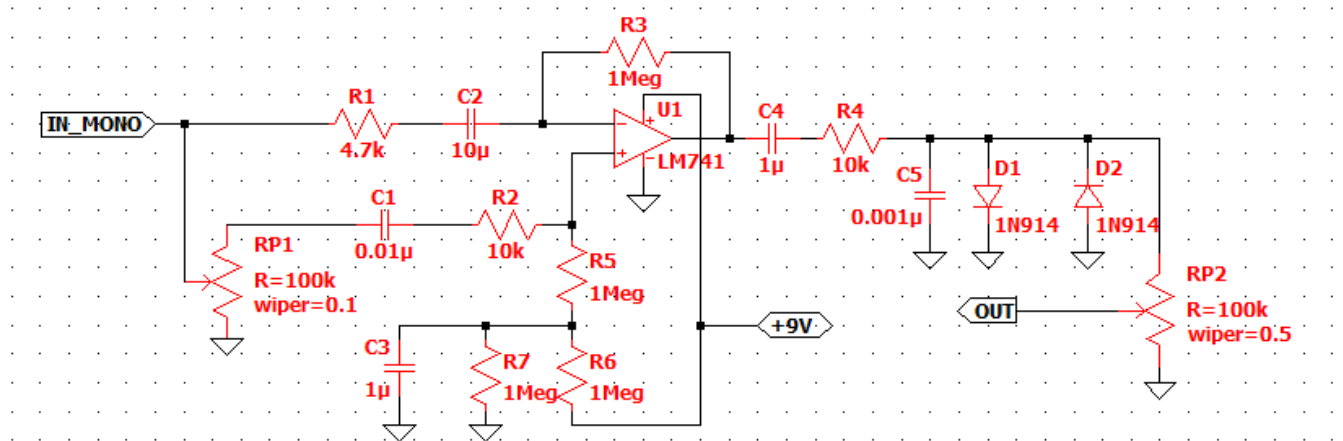


Рис.3.9. Моделювання схеми перевантаження

Моделювання проводиться за часом, вихідний сигнал за допомогою директиви (.wave OUT.wav 16 44100 OUT) записується з мітки OUT в звуковий файл який можна прослухати. Для зручності я зробив декілька записів в основних режимах роботи, які можна завантажити з GitHub де знаходиться розрахункова робота, також там є файли моделювання в LTSpice.

3.2. Моделювання роботи темброблоку

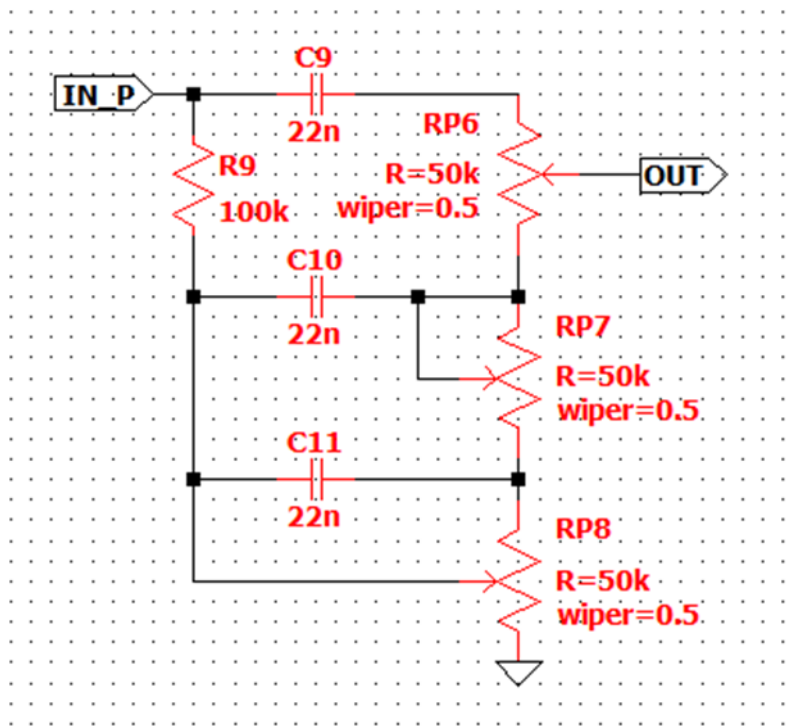


Рис.3.10. Моделювання темброблоку

Зміна опорів відбувається таким же чином як і в схемі перевантаження. Нижче наведені два графіки вихідних сигналів в режимі вибраних користувачем. В першому режимі є мале продавлення сигналу, пов'язано це з тим, що перший потенціометр впливає лише на половину АЧХ, змінивши положення на максимум ми отримуємо суттєве спотворення по низьким частотам. Нижче наведені всі можливі режими включення темброблоку і їх графіки АЧХ. По графіку видно де змінюється порядок фільтру

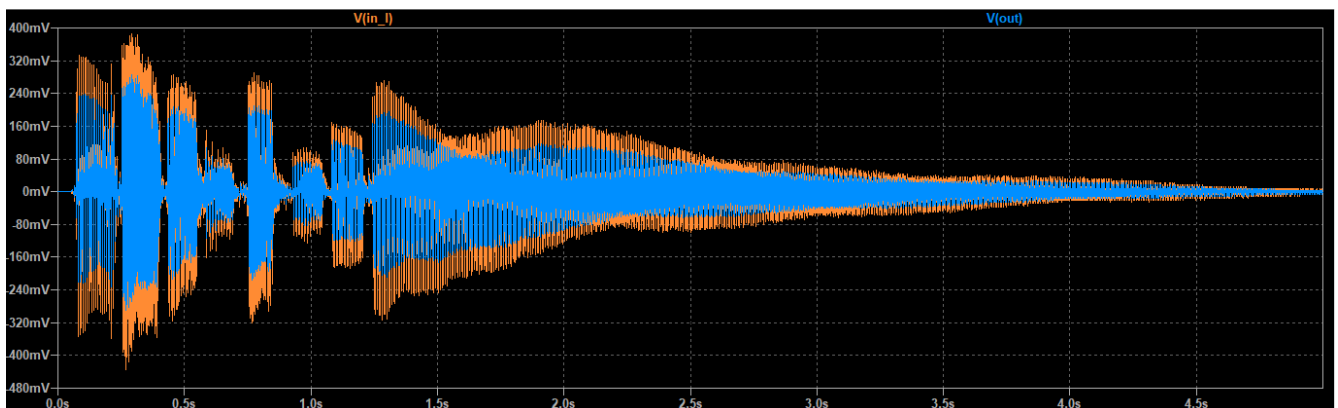


Рис.3.11. Вхідний і вихідний сигнал RP6 wiper=0.5, RP7 wiper=0.5, RP8 wiper=0.5

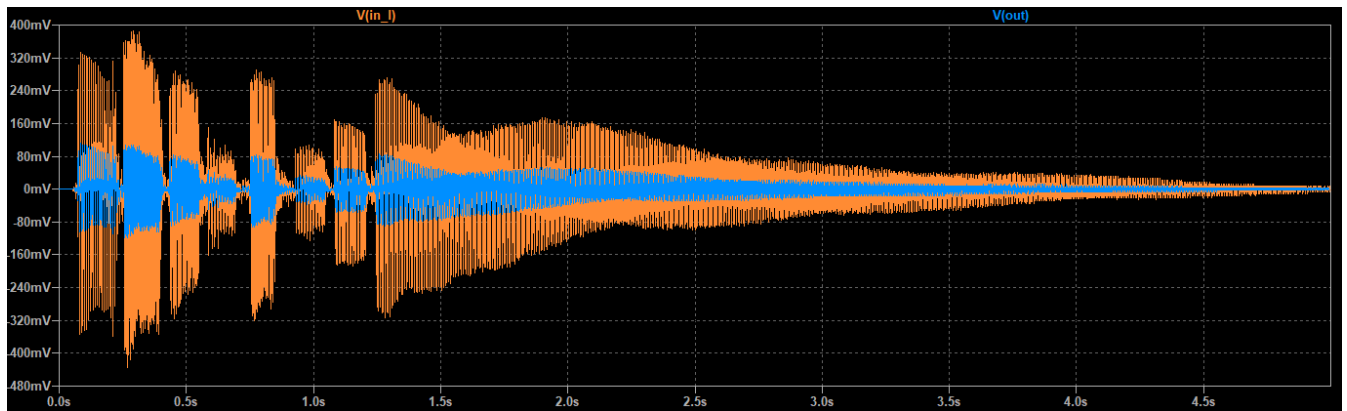


Рис.3.12. Вхідний і вихідний сигнал RP6 wiper=0.1, RP7 wiper=0.1, RP8 wiper=0.1

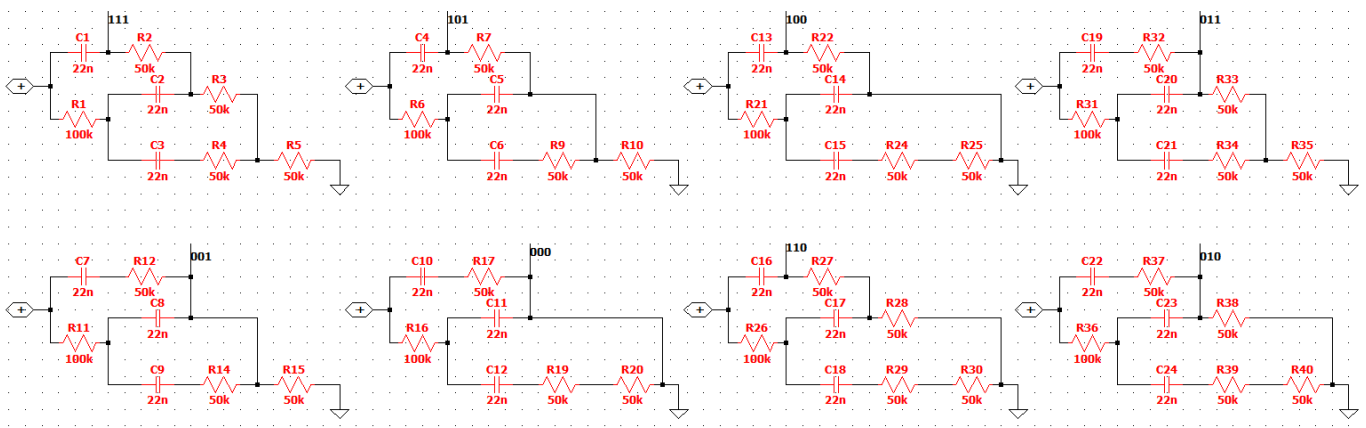


Рис.3.13. Можливі варіанти включення темброблоку

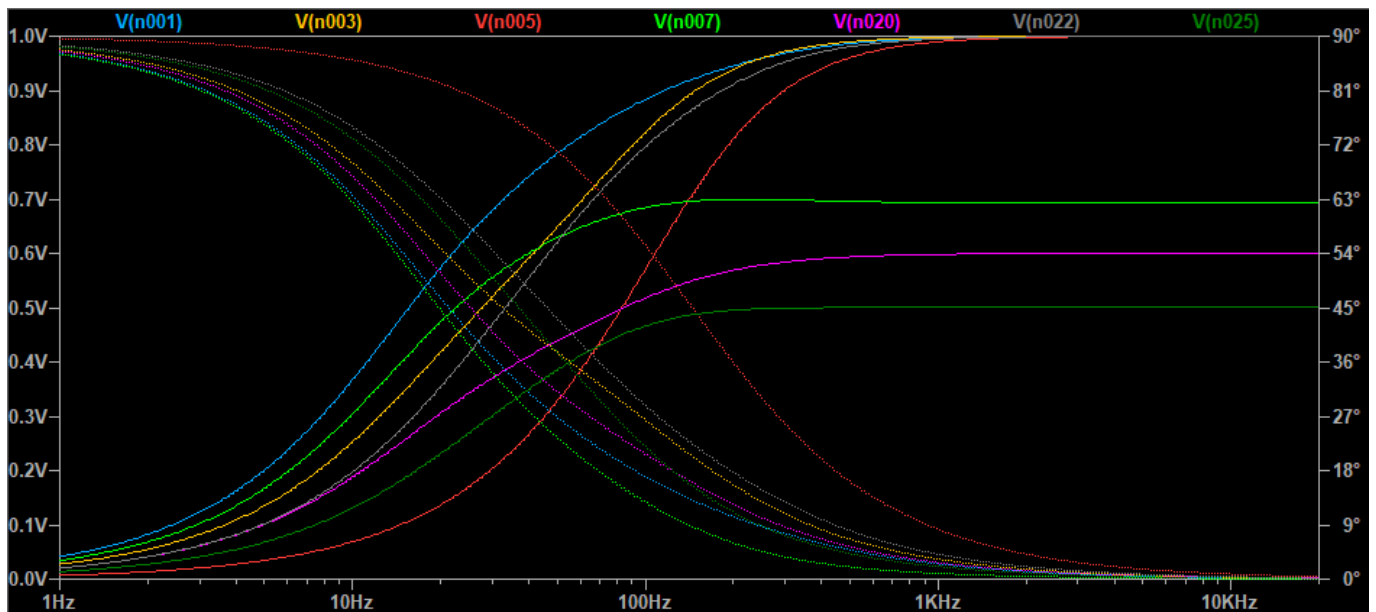


Рис.3.14. Варіанти АЧХ темброблоку

3.3. Моделювання вихідного сигналу схеми

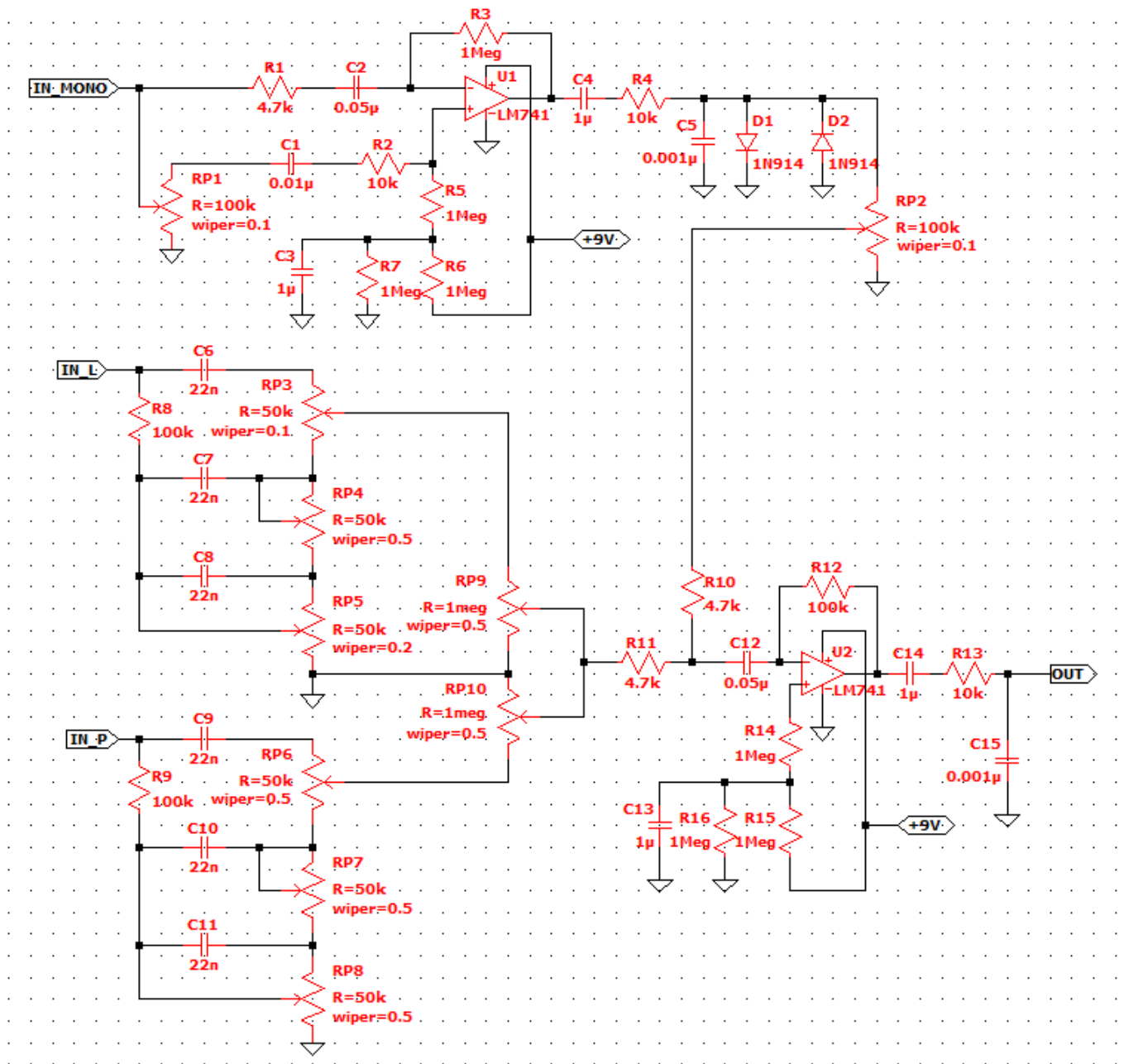


Рис.3.15. Загальна схема пристрою

На виходи схеми поступає три сигнали IN_MONO, IN_L, IN_P. Ці сигнали після деяких змін в первинних блоках міксуються у вихідному каскаді та підсилюються. Для зручності можна додати вихідний потанціометр.

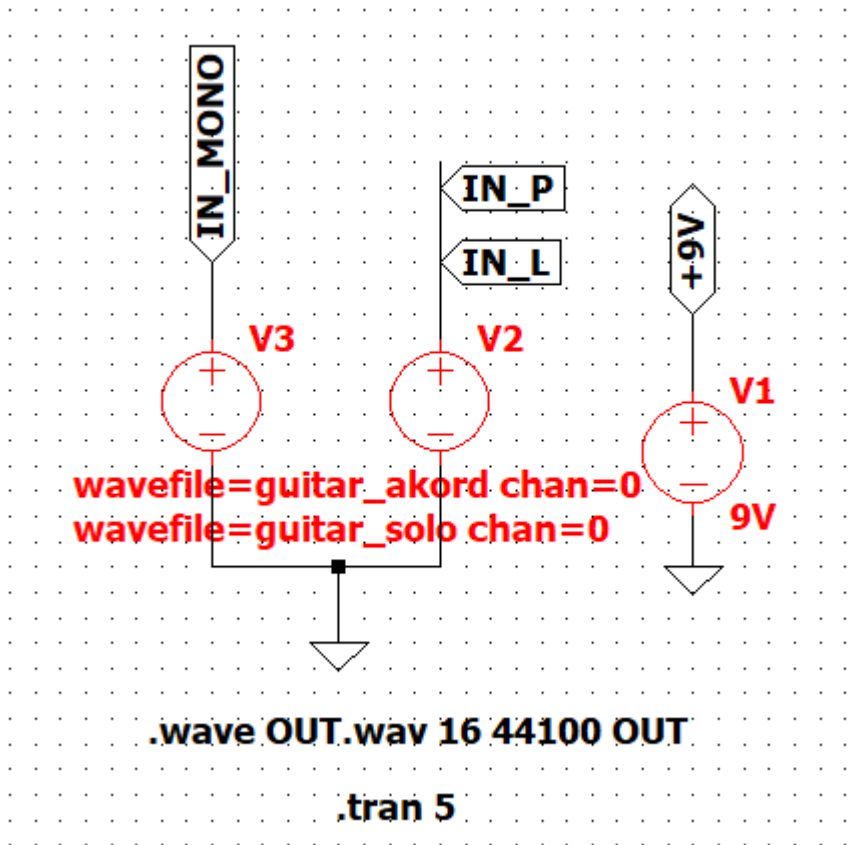


Рис.3.16. Параметри та джерела для моделювання

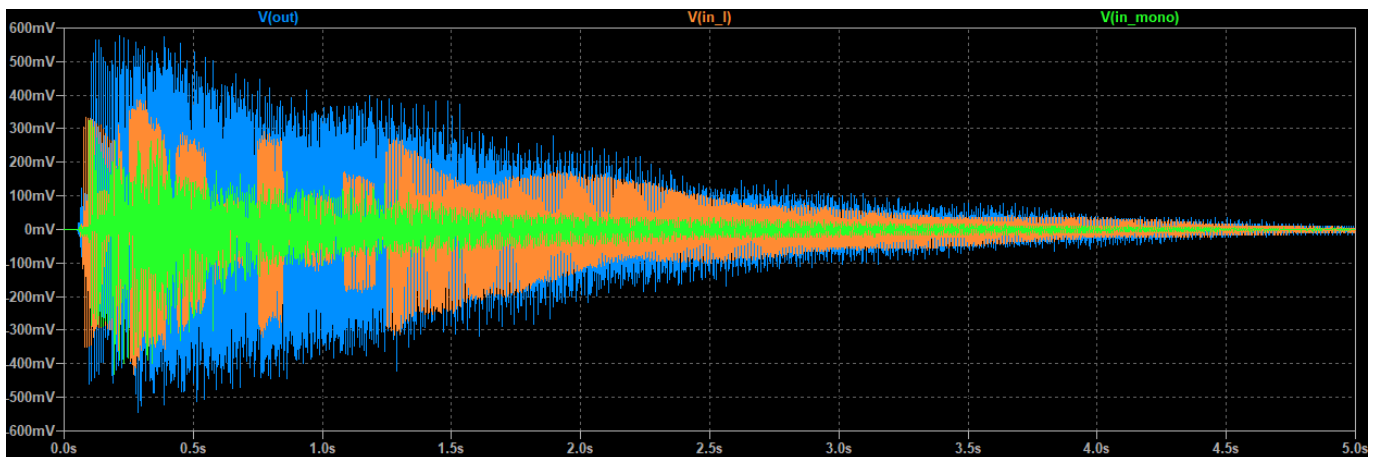


Рис.3.17. Вихідний та два вхідних сигнали

Бачимо що синій сигнал є сумую спотворених сигналів, що надходять в схему.

ВИСНОВОК

Підсумовуючи зроблену роботу, можна виділити такі моменти. В першому розділі я описав основні характеристики операційного підсилювача LM741, крім того сформулював призначення кожного блоку і його ціль в схемі. Потім я математично обгрунтував певні характеристики схеми, з розрахунку не дуже зрозуміло чому вибрані номінали є дійсними, але поглядаючи на дані з симуляції третього розділу можна прогледіти основні тонкості роботи схеми.

Самим витратним по часу був розрахунок темброблоку, так як схема має змінні опори і велику кількість еквівалентних схем, АЧХ яких, можна розрахувати лише для конкретного режиму. Для зручності в третьому розділі промодельована окрема схема з можливими варіантами графіків АЧХ та ФЧХ.

Наступним кроком є фінальна симуляція повної схеми, дуже зручним інструментом виявився запис вихідного сигналу у звуковий файл. Таким чином на початку розробки принципової схеми я зміг відрегулювати деякі номінали так, щоб вихідний сигнал відповідав поставленим задачам у вступі.

Далі я створив робочий прототип пристрою і провів деякі тести з ним. Результатом я втішений, але в замітку хочу сказати, що схема має як на мій погляд малий функціонал, додатковим блоком для розробки можна взяти схему реверберації на цифровій мікросхемі.

Трасування для прототипу я виконував у програмі SprintLayout, так як мав навички користуватися нею. До основної роботи схема трасування не ввійшла, так як має лише умовні позначення елементів для зручного розміщення їх на макетній платі, але файл можна знайти за посиланням на [GitHub](#).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даташит на ОП LM741

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

2. Теоретичні відомості про LM741

<http://www.texnic.ru/data/ims1554/ims067.html>

3. Принцип роботи ОП

http://zpostbox.ru/operatsionny_usilitel.html

<http://radiolubitel.net/index.php/elektronika/306-operatsionnyj-usilitel>

4. Схеми включення ОП

<https://habr.com/ru/post/508530/>

5. Розрахунок схем ОП

<https://cxem.net/beginner/beginner96.php>

6. Теорія і розрахунок RC фільтрів

<https://radioprogram.ru/post/749>

7. Приклад двохсмугового темброблоку

<https://sdelaysam-svoimirukami.ru/4398-dvuhpolosnyy-tembroblok.html>

8. Теоретичні відомості про темброблок

<https://radioskot.ru/publ/unch/tembroblok/6-1-0-845>

9. Приклади пасивного мікшера

<https://tehnika.expert/cifrovaya/prochaya-cifrovaya/mikshernyj-pult-svoimi-rukami.html>

<https://diodov.net/usilitel-zvuka-na-tranzistorah-1/>

10. Посилання на GitHub з додатковими файлами.

https://github.com/YegorBodak/Analog_electronics/tree/main/RGR