

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. І. СІКОРСЬКОГО»
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

КУРСОВА РОБОТА

з дисципліни Аналогова електроніка
на тему: ефект дисторшн для електротітари

Студента 2 курсу групи ДК-61

Напряму підготовки: Радіоелектронні апарати

Спеціальності: Радіоелектронні апарати та засоби

Гордієнка Я.О.

доцент , к.т.н. Короткий Є.В

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна оцінка: _____

Кількість балів: ____ Оцінка: ECTS ____

Члени комісії: _____

(підпис)

доцент , к.т.н. Короткий Є.В.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Київ - 2017 рік

ЗМІСТ

Вступ.....	3
РОЗДІЛ 1 – Вибір та дослідження принципової схеми приладу.....	5
1.1 Основа роботи ефекту жорсткого кліпінгу	5
1.2 Вибір конструкції ефекту.....	6
1.3 Елементна база.....	7
1.4 Вибір схеми ефекту.....	8
1.5 Блок схема.....	10
1.5.1 Вхідний каскад.....	10
1.5.2 Основні каскади підсилення.....	11
1.5.3 Темброблок.....	12
РОЗДІЛ 2 – Розрахунок АЧХ темброблоку.....	13
2.1 Перший варіант положень повзунків потенціометрів.....	13
2.2 Другий варіант положень повзунків потенціометрів.....	19
РОЗДІЛ 3 – Моделювання роботи приладу.....	25
3.1 Моделювання темброблоку в LTspice.....	25
3.2 Моделювання темброблоку в сторонньому ПЗ.....	27
3.3 Загальне моделювання схеми ефекту в LTspice.....	29
РОЗДІЛ 4 – Створення та дослідження робочого прототипу пристрою.....	31
4.1 Створення готового прототипу.....	31
4.2 Дослідження готового прототипу.....	34
Висновки.....	36
Перелік джерел.....	37

ВСТУП

Рівень культури споживання музики впав. Але це не означає, що ентузіасти в музичному світі вимерли. Гітарні педалі – досить поширені сьогодні, адже чистий сигнал електрогітари не є основою для створення мелодії. Сигнал потрібно «розфарбувати», щоб він став приємний для слухача. Основою для створення мелодій з рокового жанру, та його напрямків, є ефект перевантаження (clipping) . Гітарні педалі цього ефекту поширені і є в арсеналі майже кожного гітариста.

Вони діляться на 2 типи:

«Soft clipping» (*м'який кліппінг*), ще відомий в музиці як *овердрайв*, який згладжує піки високих сигналів

«Hard clipping» (*жосткий кліппінг*) — ефект, коли сильний сигнал просто зрізається по амплітуді, що породжує жорстке звучання і шум та має назву дисторшн.

Будь-які гітарні ефекти мають захмарну вартість. Це пояснюється тим, що на цьому ринку панують кілька компаній, що поділили свої напрямки розвитку і мають певний монополізм на той чи інший ефект.

Але є ентузіасти, що власноруч роблять такі ефекти, на замовлення, і мають високий попит на цьому ринку.

Моєю метою було створення гітарної педалі з ефектом дисторшн, що задовольнятиме такі вимоги.

1. Тільки аналогова схемотехніка, адже цифровий звуковий процесор створити власноруч майже нереально;
2. Проста конструкція;
3. Дешеві елементи;
4. Максимальна варіативність зміни сигналу.

Основною ціллю реалізації моєї мети – створити педаль, що не буде, жодним чином, поступатись комерційним варіантам цього ефекту

Для досягнення поставлених цілей необхідно:

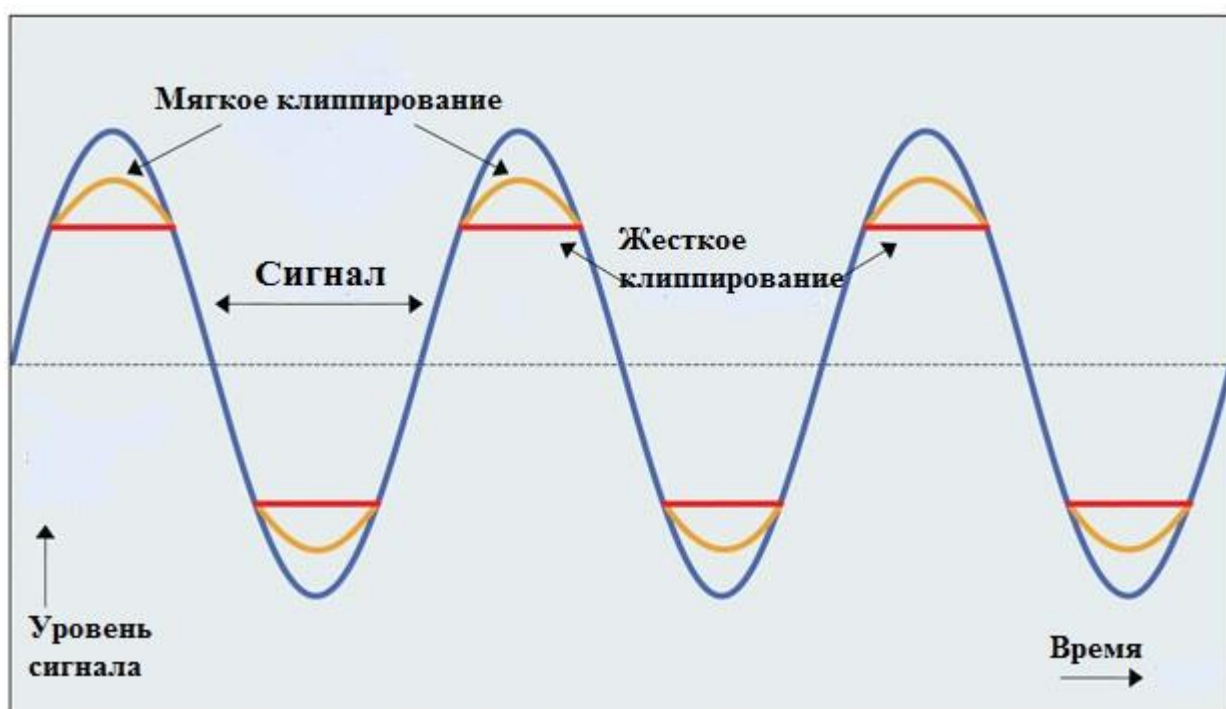
1. Розробити принципову схему пристрою з урахуванням заданих параметрів.
2. Провести математичне обґрунтування окремих вузлів схеми.
3. Провести моделювання роботи пристрою у SPICE-системі.
4. Створити робочий прототип пристрою.

РОЗДІЛ 1

ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ

1.1 Основа роботи ефекту жорсткого кліпінгу.

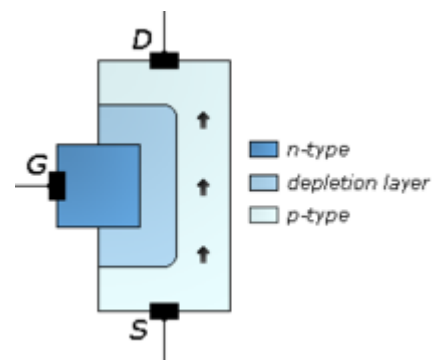
Цей ефект був відкритий гітаристами при грі в підсилювачі на основі радіоламп і досягався він за допомогою виведення вихідного каскаду підсилення в нелінійний режим, що спотворював сигнал, а саме обмежував його амплітуду (мал 1.1.1).



Мал 1.1.1

Використовувати радіолампи сьогодні немає сенсу, адже це дорого та громіздко. Тому, маючи мету зробити конструкцію педалі простою, було вирішено використовувати JFET – польові транзистори з керованим р-п переходом.

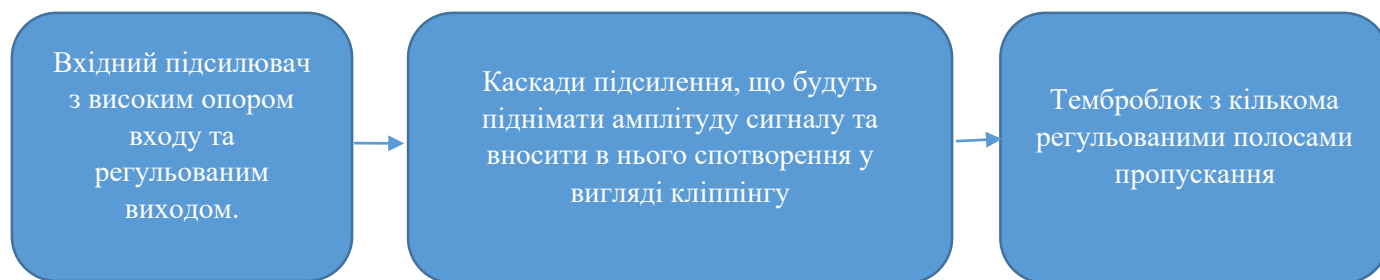
Саме цей вид транзисторів зараз витісняє радіолампи в у всіх каскадах звукового тракту музиканта. Сучасні реалії досить жорсткі по відношенню до ціни готового приладу, а радіолампи складні у своєму конструктиві. Тому сьогодні транзистори витіснили лампи майже всюди. Починаючи від передачі сигналу в різних діапазонах КВ, УКВ і т.п до аудіопідсилювачів та музичних ефектів. Залишилась, звісно, певна кількість прихильників «лампового» звуку, але це професіонали своєї справи, а для кінцевого слухача немає різниці, записана мелодія на лампах чи транзисторах.



1.2 Вибір конструкції ефекту

Схемотехнічних рішень реалізації цього ефекту досить багато. Тому, зважаючи на нашу мету, потрібно було визначити основну конструкцію (блок схему) нашої педалі.

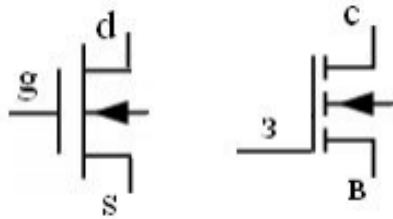
Оскільки нашою метою була простота конструкції – рішення прийшло досить швидко і мало такий вигляд (мал 1.2.1):



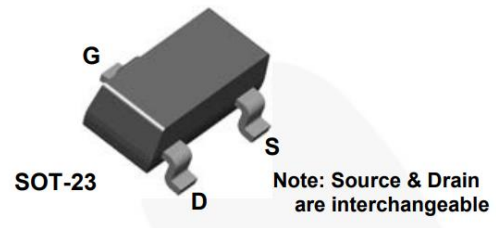
Мал 1.2.1

1.3 Елементна база

Переглядаючи форум[1], я для себе зроби висновок, що JFET транзистори ідеально підходять для створення гітарних ефектів. Тому було прийняте рішення використання саме їх для основних каскадів підсилення, а саме J201[2] та 2N5485[3] :



Принциповий рисунок ПТ



Корпус використаних транзисторів

Параметр	Значення
Максимальна напруга затвор-стік	40 В
Затвор-витік	-40 В
Прямий струм затвору	50 мА
Максимальна потужність	350 мВт

Згадуючи лекції з 1 курсу метрології було прийнято рішення використовувати лише плівкові конденсатори, як між каскадами підсилення, так і в темброблоці.

Таке рішення було прийняте в результаті перегляду досліджень ТКЕ (Температурний Коефіцієнт Ємності) та «мікрофонного ефекту» в керамічних конденсаторах. Оскільки педаль створюється для гри з великим гітарним стендом, то вібрації одразу будуть заважати нормальній роботі керамічних конденсаторів. Тому, слідкуючи за нашою метою, було одразу визначено.

Вже маємо певні погляди в створенні ефекту не маючи схеми.

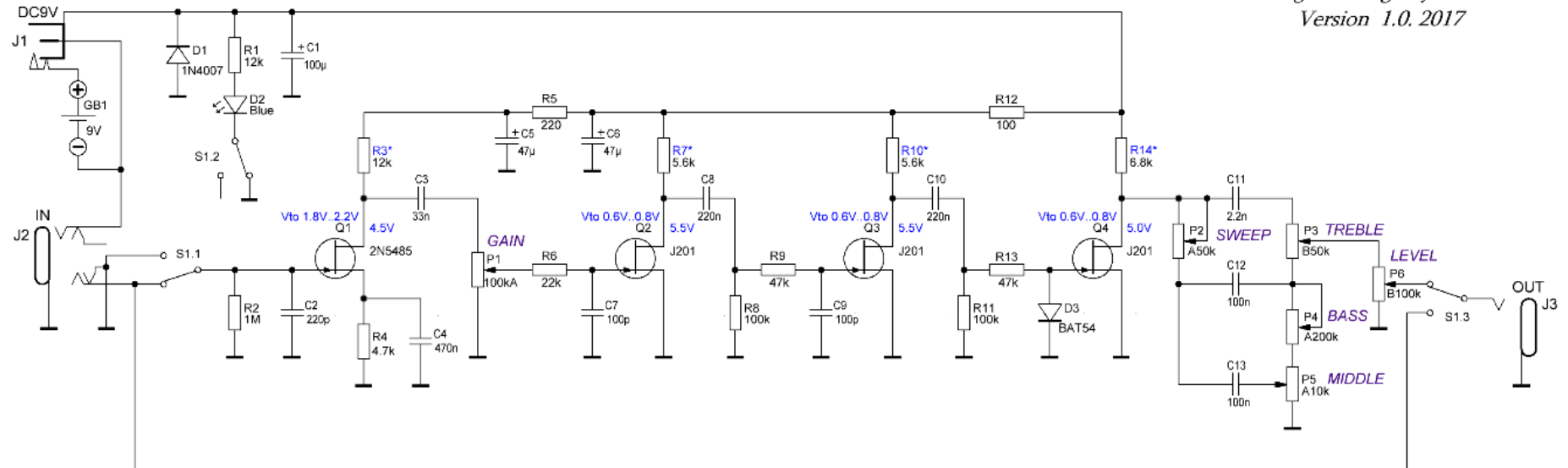
1.4 Вибір схеми ефекту.

Маючи певний погляд на вигляд конструкції було прийнято рішення розглянути схеми відомих інженерів-конструкторів у цій справі. В результаті довгих пошуків та дискусій було знайдено ось таку схему на форумі [1]

Krank Krankenbox

Original design by VAL

Version 1.0. 2017



1.5 Блок схема.

Ми бачимо, що нашу схему можна уявно розділити на кілька блоків, що ми описували вище.

1.5.1 Вхідний каскад (Рис 1.5.1.1)

На вході ми бачимо підсилювач, що має високоомний вхід, автоматичне зміщення та потенціометр, що регулює амплітуду на виході цього блоку.

Параметри робочої точки:

$$I_{\text{стік}} = 357 \text{ мкА}$$

$$U_{\text{витік-стік}} = 7.8 \text{ В}$$

Для обрахування коефіцієнту

підсилення було обрахована максимальна амплітуда на вході та виході (вихід міжкаскадного конденсатора), яку ми можемо побачити на осцилограмі входу та виходу даного каскаду (Рис 1.5.1.2)

$$K_u = U_{\text{вихід}} / U_{\text{вхід}} = 639/197 = 3.2$$

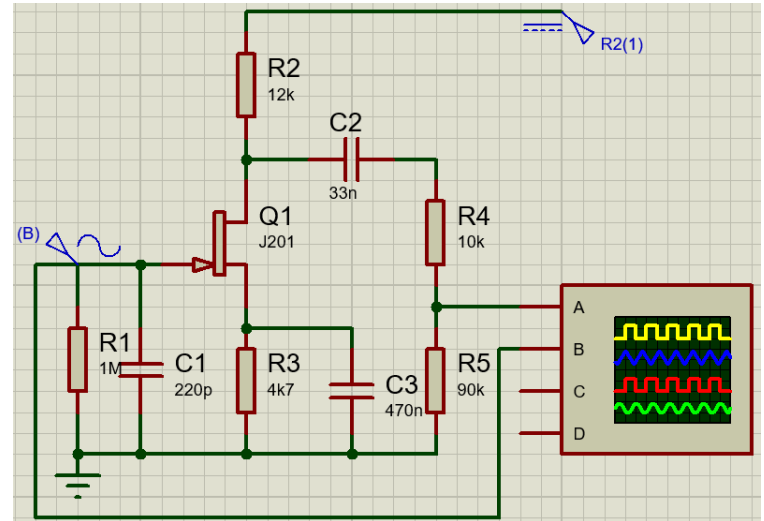


Рис 1.5.1.1

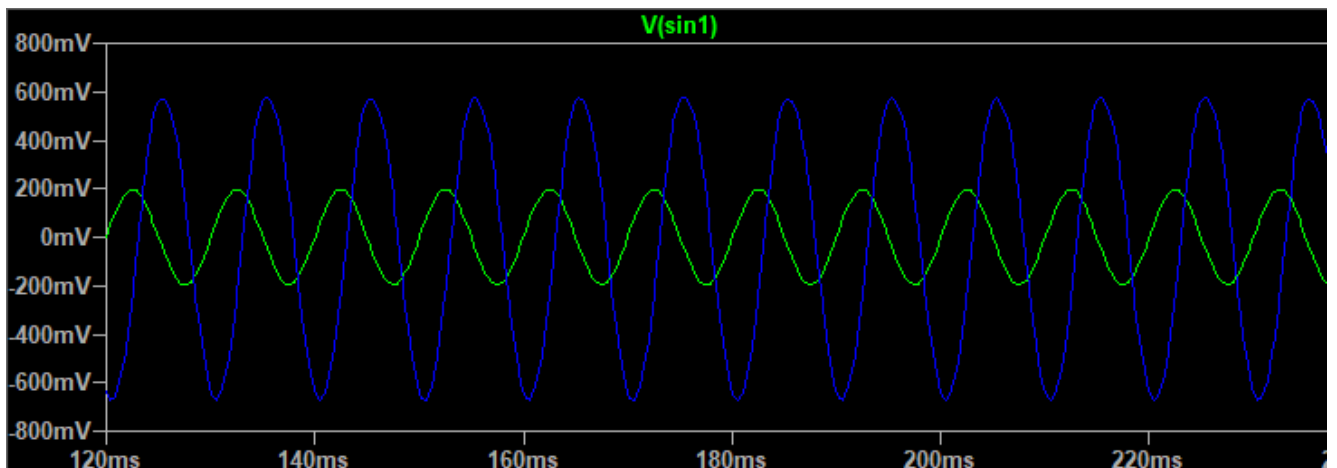


Рис 1.5.1.2

1.5.2 Основні каскади підсилення

(Рис1.5.2.1)

Розглядаючи цей каскад ми одразу бачимо підсилювач з нульовим зміщенням.

Розглянемо робочу точку одного з цих каскадів:

$$I_{\text{стік}} = 589 \text{ мкА}$$

$$U_{\text{витік-стік}} = 5.1 \text{ В}$$

Саме завдяки перевантаженню кожного наступного каскаду тим, що напруга на вході кожного наступного збільшується на

K_u попереднього каскаду, і ми отримуємо

ось таку форму сигналу, де $V(n009)$ – сигнал з виходу C8, $V(n014)$ – сигнал на затворі j2, $V(n011)$ – сигнал на виході C10.

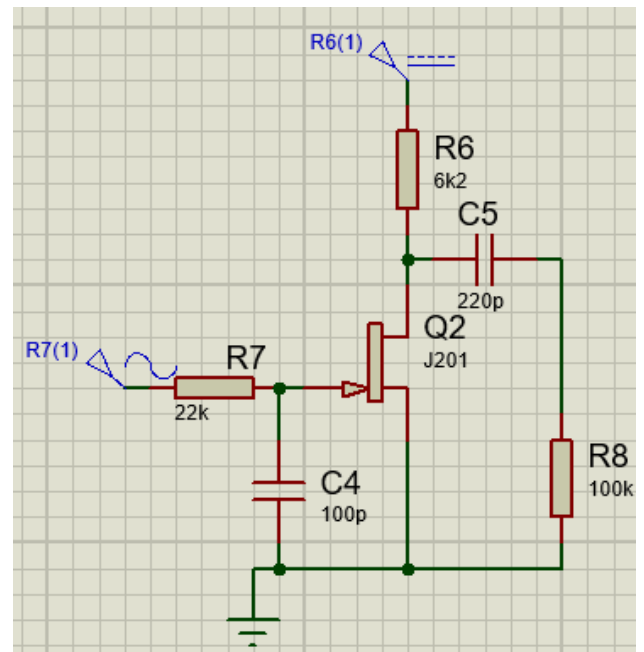


Рис 1.5.2.1

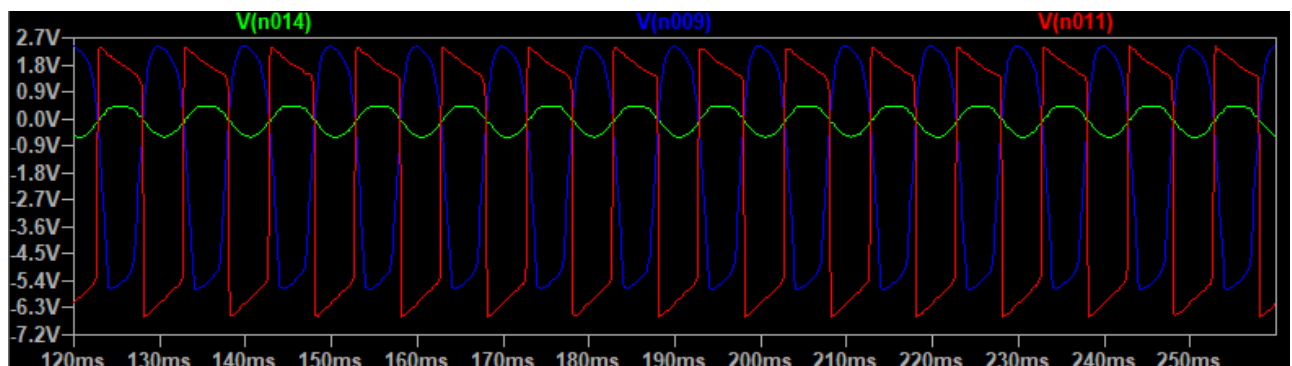


Рис 1.5.2.2

1.5.3 Темброблок

Схемотехнічне рішення даного темброблоку є стандартним для дисторшн педальей даного типу (Рис 1.5.3.1).

В нашій схемі використаний темброблок, що був створений компанією Marshall в 1950-1960 роках. Робота над ним велась в результаті створення лампового преампу в гітарних «головах», що створювала ця компанія.

Основним недоліком даного схемотехнічного

рішення є те, що регулювання зрізу частот

певним потенціометром, буде впливати на зріз досить великого частотного діапазону, а не малого виділеного діапазону типу «Високі частоти», «Середні частоти», «Низькі частоти» (Відного діапазону гітарного звуку, що лежить в межах від 10Гц до 10 КГц)

Оскільки наша педаль створюється для гри важкого металу, то вибір саме цього конструктиву не піддається сумніву. Є дві основні конструкції темброблоків, а саме їх реалізації компаніями Fender (Рис 1.5.3.2) та Marshall (Рис 1.5.3.3) в своїй продукції.

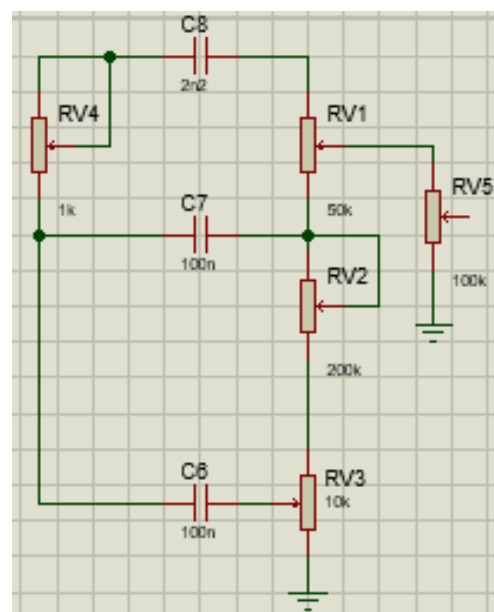


Рис 1.5.3.1

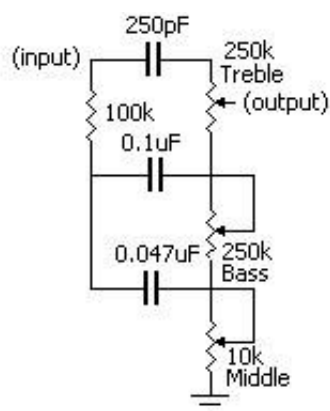


Рис 1.5.3.2

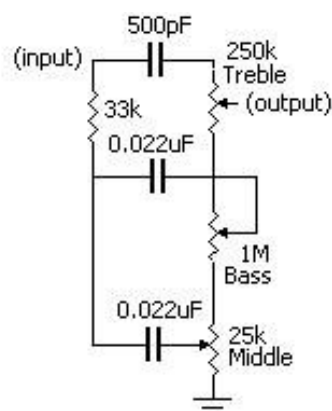


Рис 1.5.3.3

РОЗДІЛ 2

Розрахунок АЧХ темброблоку

Розглянемо темброблок як чотириполюсник з постійними резисторами, змінивши на них плечі потенціометрів.

Розрахуємо 2 ситуації положень повзунків потенціометрів.

2.1 Перша ситуація положення повзунків потенціометрів:

Параметри схеми:

$$\begin{aligned} r_2 &= 50(\text{k}\Omega) & C_{11} &= 2.2(\text{нФ}) \\ r_3 &= 50(\text{k}\Omega) & C_{12} &= 100(\text{нФ}) \\ r_4 &= 200(\text{k}\Omega) & C_{13} &= 100(\text{нФ}) \\ r_5 &= 10(\text{k}\Omega) \end{aligned}$$

Положення повзунків будемо розглядати у вигляді коефіцієнтів

$$k_2 = 1 \quad k_3 = 1 \quad k_4 = 1 \quad k_5 = 1$$

Знаходження операторної передавальної функції схеми

Складемо Y-матрицю вузлових і міжвузлових провідностей за методом вузлових потенціалів для схеми (Рис 2.1.1).

$$Y_{11}(p) = \frac{1}{k_2 r_2} + \frac{1}{(1-k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} = 2.2p + \frac{1}{50}$$

$$Y_{22}(p) = p C_{13} + p C_{12} + \frac{1}{k_2 r_2} = 200p + \frac{1}{50}$$

$$Y_{33}(p) = p C_{13} + \frac{1}{(1-k_5)r_5 + k_4 r_4} + \frac{1}{k_5 r_5} = 100p + \frac{21}{200}$$

$$Y_{44}(p) = p C_{12} + \frac{1}{k_3 r_3} + \frac{1}{(1-k_5)r_5 + k_4 r_4} = 100p + \frac{1}{40}$$

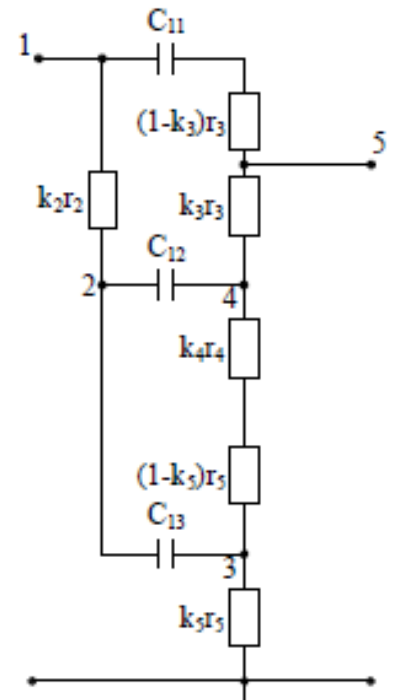


Рис 2.1.1

$$Y_{55}(p) = \frac{1}{(1 - k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} + \frac{1}{k_3 r_3} = 2.2p + \frac{1}{50}$$

$$Y_{12}(p) = \frac{1}{k_2 r_2} = \frac{1}{50}$$

$$Y_{13}(p) = 0$$

$$Y_{14}(p) = 0$$

$$Y_{15}(p) = \frac{1}{(1 - k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} = 2.2p$$

$$Y_{23}(p) = p C_{13} = 100p$$

$$Y_{24}(p) = p C_{12} = 100p$$

$$Y_{25}(p) = 0$$

$$Y_{34}(p) = \frac{1}{(1 - k_5)r_5 + k_4 r_4} = \frac{1}{200}$$

$$Y_{35}(p) = 0$$

$$Y_{45}(p) = \frac{1}{k_3 r_3} = \frac{1}{50}$$

Матриця провідностей схеми (Рис 2.1.1) буде мати вигляд:

$$Y(p) = \begin{pmatrix} Y_{11}(p) & -Y_{12}(p) & -Y_{13}(p) & -Y_{14}(p) & -Y_{15}(p) \\ -Y_{12}(p) & Y_{22}(p) & -Y_{23}(p) & -Y_{24}(p) & -Y_{25}(p) \\ -Y_{13}(p) & -Y_{23}(p) & Y_{33}(p) & -Y_{34}(p) & -Y_{35}(p) \\ -Y_{14}(p) & -Y_{24}(p) & -Y_{34}(p) & Y_{44}(p) & -Y_{45}(p) \\ -Y_{15}(p) & -Y_{25}(p) & -Y_{35}(p) & -Y_{45}(p) & Y_{55}(p) \end{pmatrix}$$

$$Y(p) = \begin{pmatrix} 2.2p + 0.02 & -0.02 & 0 & 0 & -2.2p \\ -0.02 & 200p + 0.02 & -100p & -100p & 0 \\ 0 & -100p & 100p + 0.105 & -5 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & -100p & -5 \times 10^{-3} & 100p + 0.025 & -0.02 \\ -2.2p & 0 & 0 & -0.02 & 2.2p + 0.02 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_Y(p) = p(0.418p + 88p^2 + 4.04 \times 10^{-5})$$

$$\Delta_{15}(p) = \begin{vmatrix} -\frac{1}{50} & 200p + \frac{1}{50} & -100p & -100p \\ 0 & -100p & 100p + \frac{21}{200} & -\frac{1}{200} \\ 0 & -100p & -\frac{1}{200} & 100p + \frac{1}{40} \\ -2.2p & 0 & 0 & -\frac{1}{50} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{15}(p) = p(5.716p + 3.08 \times 10^3 p^2 + 4.514 \times 10^{-3})$$

$$\Delta_{11}(p) = \begin{vmatrix} 200p + \frac{1}{50} & -100p & -100p & 0 \\ -100p & 100p + \frac{21}{200} & -\frac{1}{200} & 0 \\ -100p & -\frac{1}{200} & 100p + \frac{1}{40} & -\frac{1}{50} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{50} & 2.2p + \frac{1}{50} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{11}(p) = 6.514 \times 10^{-3} p + 25.716 p^2 + 3.08 \times 10^3 p^3 + 2 \times 10^{-7}$$

$$k_u(p) = \frac{\Delta_{15}(p)}{\Delta_{11}(p)} = \frac{2.257 \times 10^4 p + 2.86 \times 10^7 p^2 + 154 \times 10^{10} p^3}{3.257 \times 10^4 p + 129 \times 10^8 p^2 + 154 \times 10^{10} p^3 + 1}$$

Із урахуванням позначень, комплексна функція кола буде мати вигляд

$$k_u(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} = \frac{1.857 \times 10^{-3} p^2 + 1.466 \times 10^{-6} p + p^3}{2.115 \times 10^{-6} p + 8.377 \times 10^{-3} p^2 + p^3 + 6.494 \times 10^{-11}}$$

В якій:

$$\begin{aligned} b_3 &= 1 & a_3 &= 1 \\ b_2 &= 8.377 \times 10^{-3} & a_2 &= 1.857 \times 10^{-3} \\ b_1 &= 2.115 \times 10^{-6} & a_1 &= 1.466 \times 10^{-6} \\ b_0 &= 6.494 \times 10^{-11} & a_0 &= 0 \end{aligned}$$

Вхідний опір:

$$Z_{\text{вх}}(p) = \frac{\Delta_Y(p)}{\Delta_{11}(p)} = \frac{(d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0)}{p(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)} = \frac{131 \times 10^{-8} p + 136 \times 10^{-4} p^2 + 0.029 p^3 + 0}{p(2.12 \times 10^{-6} p + 8.35 \times 10^{-3} p^2 + p^3 + 6.49 \times 10^{-11})}$$

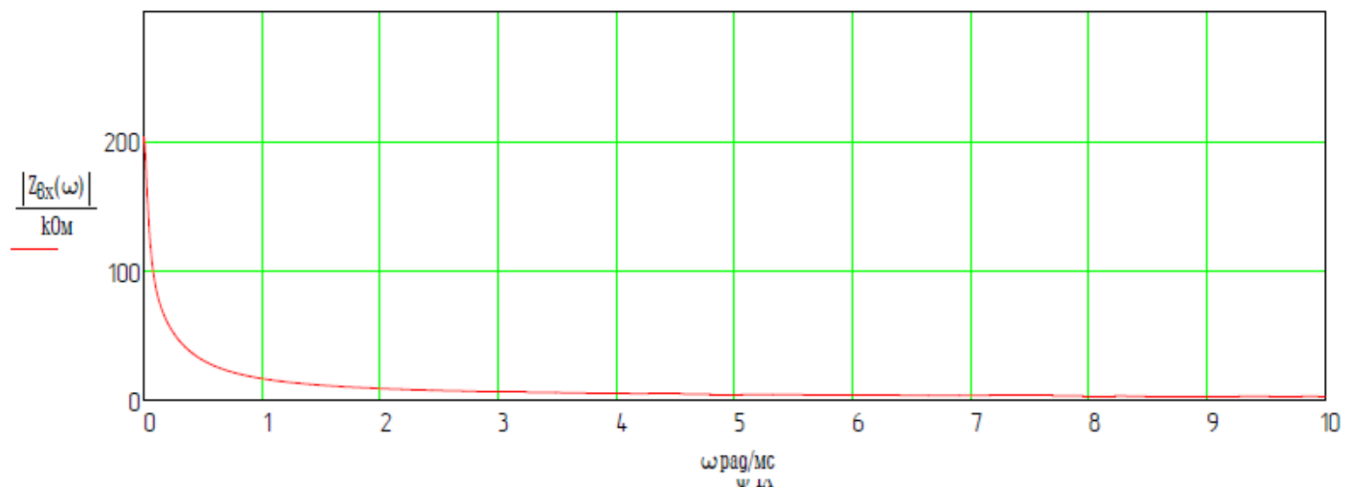
Визначення АЧХ та ФЧХ характеристик схеми, перейдемо до комплексної передаточної функції, замінивши $p=j\omega$:

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}}(\omega) &= \frac{d_3 (j\omega)^3 + d_2 (j\omega)^2 + d_1 j\omega + d_0}{j\omega [b_3 (j\omega)^3 + b_2 (j\omega)^2 + b_1 j\omega + b_0]} = -\frac{[(131j \times 10^{-8})\omega + -1356 \times 10^{-4} \omega^2 - (0.029j)\omega^3 + 0]j}{\omega [(2.115j \times 10^{-6})\omega + -8.349 \times 10^{-3} \omega^2 - (j)\omega^3 + 6.494 \times 10^{-11}]} \\ |Z_{\text{вх}}|(\omega) &= \sqrt{\frac{[d_0 - d_2 \omega^2]^2 + [d_3 \omega^3 - d_1 \omega]^2}{\omega [(b_2 \omega^2 - b_0)^2 + (b_3 \omega^3 - b_1 \omega)^2]}} = \sqrt{\frac{(-1356 \times 10^{-4} \omega^2 + 0)^2 + (-1313 \times 10^{-8} \omega + 0.029 \omega^3)^2}{\omega [(8.349 \times 10^{-3} \omega^2 - 6.494 \times 10^{-11})^2 + (-2.115 \times 10^{-6} \omega + \omega^3)^2]}} \\ \psi_{\text{вх}}(\omega) &= \text{atan} \left[\frac{(d_3 \omega^3 - d_1 \omega)^2}{d_0 - d_2 \omega^2} \right] - \text{atan} \left[\frac{\omega (b_2 \omega^2 - b_0)}{b_3 \omega^3 - b_1 \omega} \right] = -1 \text{atan} \left[\frac{(131 \times 10^{-8} \omega + -0.029 \omega^3)^2}{136 \times 10^{-4} \omega^2 - 0} \right] + -1 \text{atan} \left(\frac{3.34 \times 10^{23} \omega^2 - 2.6 \times 10^1}{4 \times 10^{25} \omega^2 - 8.46 \times 10^1} \right) \end{aligned}$$

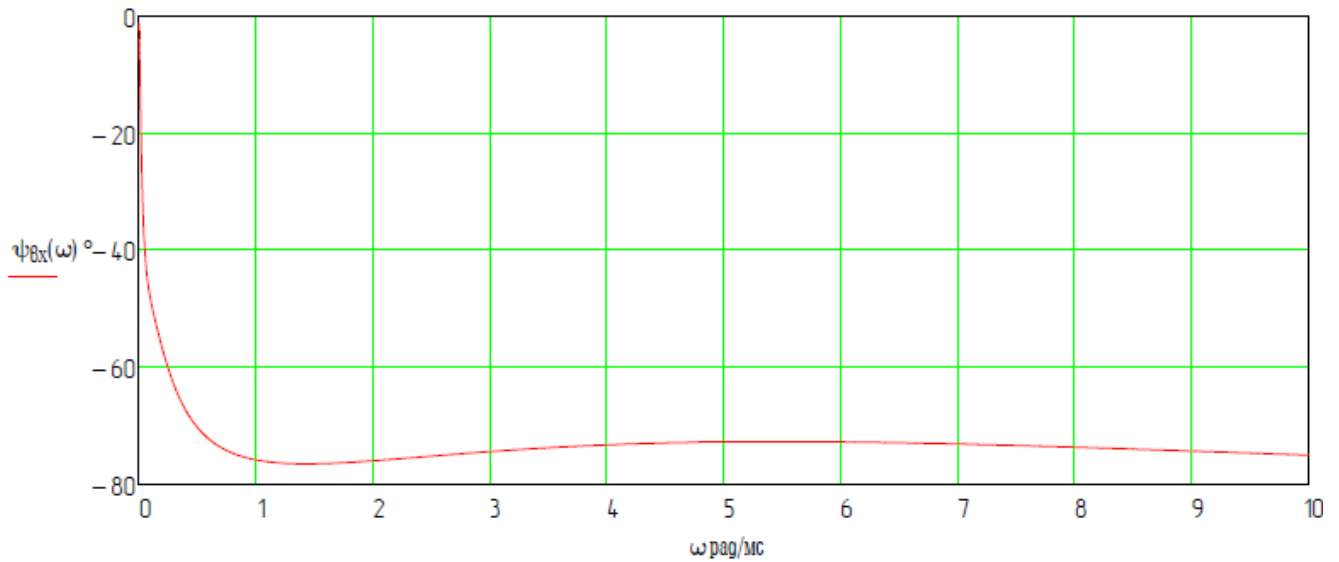
$$\text{Im}(Z_{\text{вх}}(j\omega)) = |Z_{\text{вх}}(j\omega)| \sin(\psi_{\text{вх}}(\omega))$$

$$\text{Re}(Z_{\text{вх}}(j\omega)) = |Z_{\text{вх}}(j\omega)| \cos(\psi_{\text{вх}}(\omega))$$

АЧХ



ФЧХ

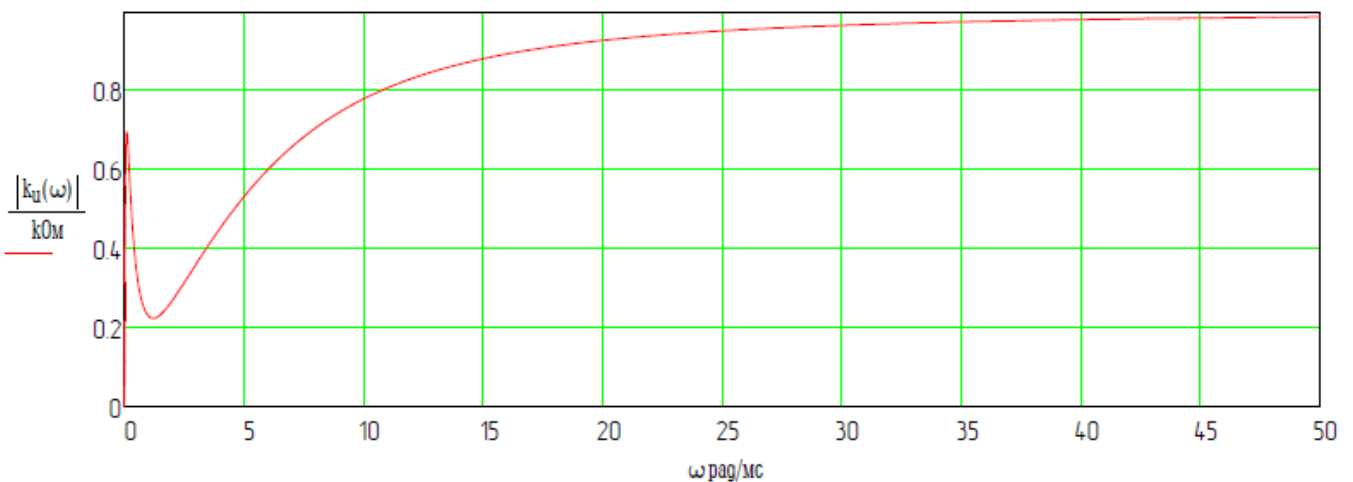


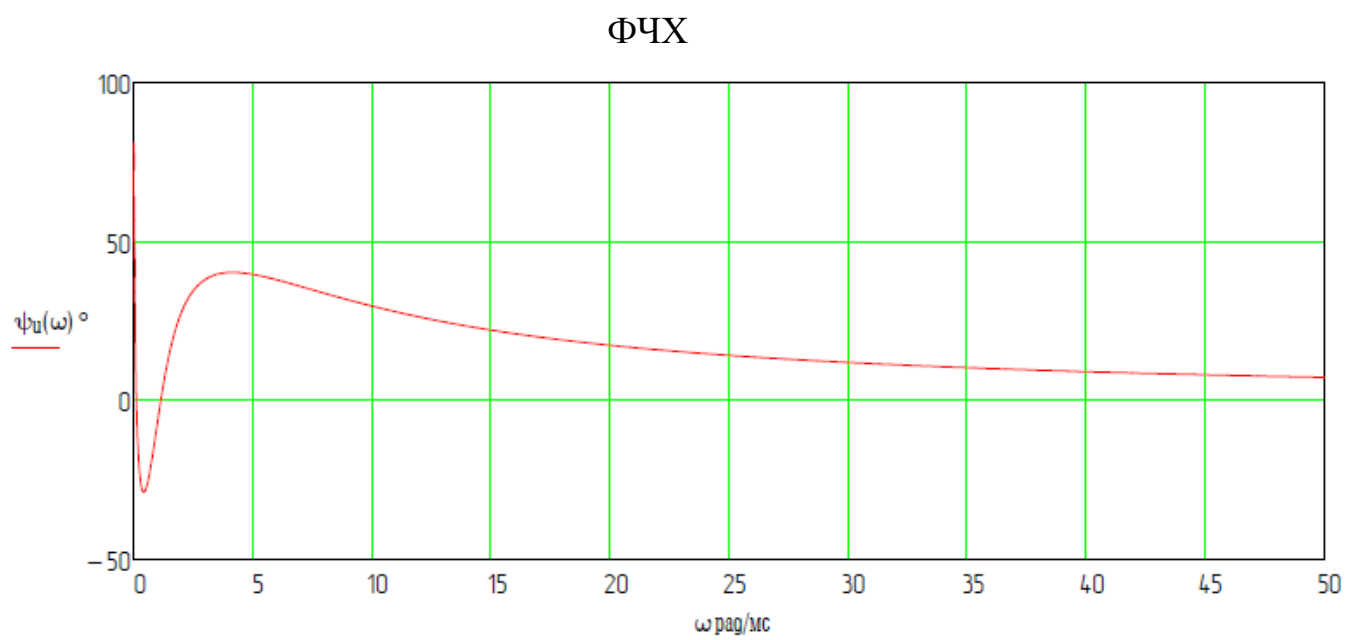
Знайдемо амплітудно-частотну характеристику кола (АЧХ) як модуль комплексної частотної функції, тому (із урахуванням числових значень параметрів елементів)

$$k_u(\omega) = \frac{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1j\omega + a_0}{b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1j\omega + b_0} = \frac{(1.466j \times 10^{-6})\omega + -1.857 \times 10^{-3}\omega^2 - \omega^3j}{(2.115j \times 10^{-6})\omega + -8.349 \times 10^{-3}\omega^2 - (j)\omega^3 + 6.494 \times 10^{-11}}$$

$$k_u(\omega) = \sqrt{\frac{(a_0 - a_2\omega^2)^2 + (a_3\omega^3 - a_1\omega)^2}{(b_2\omega^2 - b_0)^2 + (b_3\omega^3 - b_1\omega)^2}} = \sqrt{\frac{(-1.466 \times 10^{-6}\omega + \omega^3)^2 + 3.449 \times 10^{-6}\omega^4}{(8.349 \times 10^{-3}\omega^2 - 6.494 \times 10^{-11})^2 + (-2.115 \times 10^{-6}\omega + \omega^3)^2}}$$

АЧХ





2.2 Друга ситуація положення повзунків потенціометрів:

Параметри електричного кола та схема (Рис 2.1.1) розглядаємо в пункті 2.1, а коефіцієнти, що визначають положення включення потенціометра, виглядають так:

$$k_2 = 1 \quad k_3 = 0.5 \quad k_4 = 1 \quad k_5 = 1$$

Знаходження операторної передавальної функції схеми

Складемо Y-матрицю вузлових і міжвузлових провідностей за методом вузлових потенціалів для схеми (Рис 2.1.1).

$$Y_{12}(p) = \frac{1}{k_2 r_2} = \frac{1}{50}$$

$$Y_{13}(p) = 0$$

$$Y_{14}(p) = 0$$

$$Y_{15}(p) = \frac{1}{(1 - k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} = \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25}$$

$$Y_{23}(p) = p C_{13} = 100p$$

$$Y_{11}(p) = \frac{1}{k_2 r_2} + \frac{1}{(1 - k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} = \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} + \frac{1}{50}$$

$$Y_{22}(p) = p C_{13} + p C_{12} + \frac{1}{k_2 r_2} = 200p + \frac{1}{50}$$

$$Y_{33}(p) = p C_{13} + \frac{1}{(1 - k_5)r_5 + k_4 r_4} + \frac{1}{k_5 r_5} = 100p + \frac{21}{200}$$

$$Y_{44}(p) = p C_{12} + \frac{1}{k_3 r_3} + \frac{1}{(1 - k_5)r_5 + k_4 r_4} = 100p + 0.045$$

$$Y_{55}(p) = \frac{1}{(1 - k_3)r_3 + \frac{1}{p C_{11}}} + \frac{1}{k_3 r_3} = \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} + 0.04$$

$$Y_{24}(p) = p C_{12} = 100p$$

$$Y_{25}(p) = 0$$

$$Y_{34}(p) = \frac{1}{(1 - k_5)r_5 + k_4 r_4} = \frac{1}{200}$$

$$Y_{35}(p) = 0$$

$$Y_{45}(p) = \frac{1}{k_3 r_3} = 0.04$$

Матриця провідностей схеми (Рис 2.1.1) буде мати вигляд:

$$Y(p) = \begin{pmatrix} Y_{11}(p) & -Y_{12}(p) & -Y_{13}(p) & -Y_{14}(p) & -Y_{15}(p) \\ -Y_{12}(p) & Y_{22}(p) & -Y_{23}(p) & -Y_{24}(p) & -Y_{25}(p) \\ -Y_{13}(p) & -Y_{23}(p) & Y_{33}(p) & -Y_{34}(p) & -Y_{35}(p) \\ -Y_{14}(p) & -Y_{24}(p) & -Y_{34}(p) & Y_{44}(p) & -Y_{45}(p) \\ -Y_{15}(p) & -Y_{25}(p) & -Y_{35}(p) & -Y_{45}(p) & Y_{55}(p) \end{pmatrix}$$

$$Y(p) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} + 0.02 & -0.02 & 0 & 0 & -\frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} \\ -0.02 & 200p + 0.02 & -100p & -100p & 0 \\ 0 & -100p & 100p + 0.105 & -0.005 & 0 \\ 0 & -100p & -0.005 & 100p + 0.045 & -0.04 \\ \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} & 0 & 0 & -0.04 & \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} + 0.04 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_Y(p) = \frac{4.86 \times 10^{-10} p + 5.07 \times 10^{-6} p^2 + 0.002p^3 + 0.132p^4 + 3.2p^5 - 0}{(p + 0.018)(0.036p + p^2 + 3.31 \times 10^{-4})}$$

$$\Delta_{15}(p) = \begin{vmatrix} -\frac{1}{50} & 200p + \frac{1}{50} & -100p & -100p \\ 0 & -100p & 100p + \frac{21}{200} & -\frac{1}{200} \\ 0 & -100p & -\frac{1}{200} & 100p + 0.045 \\ -\frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} & 0 & 0 & -0.04 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{15}(p) = \frac{1.638 \times 10^{-4} p + 0.204 p^2 + 72 p^3}{p + 0.018}$$

$$\Delta_{11}(p) = \begin{vmatrix} 200p + \frac{1}{50} & -100p & -100p & 0 \\ -100p & 100p + \frac{21}{200} & -\frac{1}{200} & 0 \\ -100p & -\frac{1}{200} & 100p + 0.045 & -0.04 \\ 0 & 0 & -0.04 & \frac{1}{\frac{0.455}{p} + 25} + 0.04 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{11}(p) = -1.101p + 112p^2 - \frac{3.683 \times 10^{-4}}{p + 0.018} + 0.02$$

$$k_u(p) = \frac{\Delta_{15}(p)}{\Delta_{11}(p)} = \frac{2.05 \times 10^7 p + 2.55 \times 10^{10} p^2 + 9 \times 10^{12} p^3}{2.96 \times 10^7 p + 1.17 \times 10^{11} p^2 + 1.4 \times 10^{13} p^3 + 909}$$

Із урахуванням позначень, комплексна функція кола буде мати вигляд:

$$k_u(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} = \frac{1.464 \times 10^{-6} p + 0.643 p^3 + 0.002 p^2}{2.114 \times 10^{-6} p + 0.008 p^2 + p^3 + 6.493 \times 10^{-11}}$$

В якій:

$$\begin{aligned} b_3 &= 1 & a_3 &= 0.643 \\ b_2 &= 0.008 & a_2 &= 0.002 \\ b_1 &= 2.114 \times 10^{-6} & a_1 &= 1.464 \times 10^{-6} \\ b_0 &= 3.903 \times 10^{-16} & a_0 &= 0 \end{aligned}$$

Вхідний опір

$$Z_{\text{вх}}(p) = \frac{\Delta_Y(p)}{\Delta_{11}(p)} = \frac{(d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0)}{p(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)} =$$

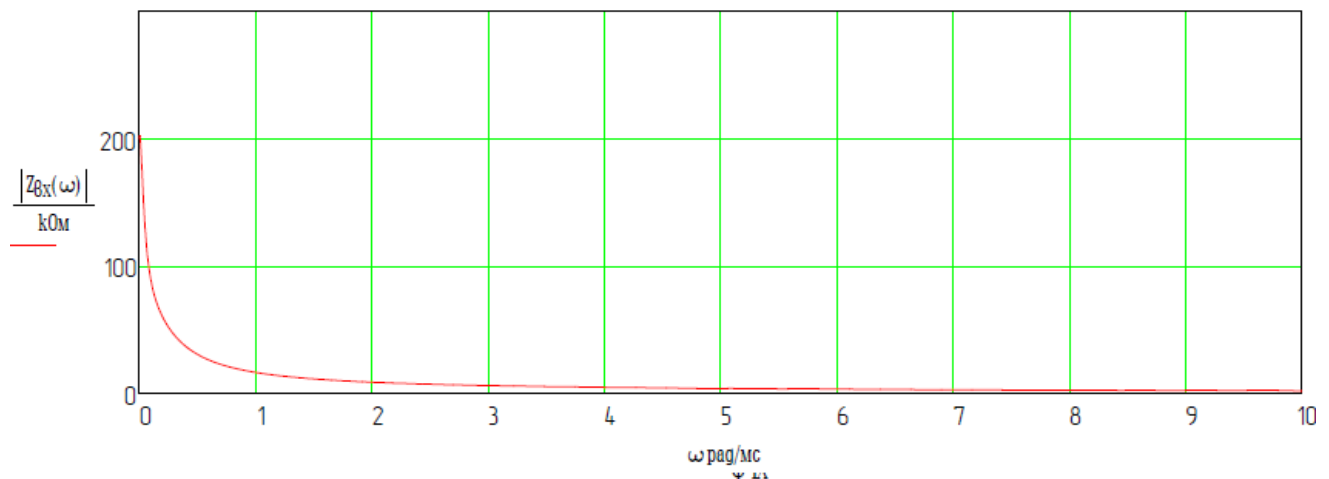
$$= \frac{7.89 \times 10^{-14} p + 8.28 \times 10^{-10} p^2 + 3.07 \times 10^{-7} p^3 - 0}{p(1.28 \times 10^{-11} p + 5.23 \times 10^{-8} p^2 + 1.44 \times 10^{-5} p^3 + 3.9 \times 10^{-16})}$$

$$Z_{\text{вх}}(\omega) = \frac{d_3 (j \omega)^3 + d_2 (j \omega)^2 + d_1 j \omega + d_0}{j \omega [b_3 (j \omega)^3 + b_2 (j \omega)^2 + b_1 (j \omega) + b_0]} = \frac{[(7.892j \times 10^{-14})\omega + -8.28 \times 10^{-10} \omega^2 - (3.069j \times 10^{-7})\omega^3 - 0]j}{\omega [(1.278j \times 10^{-11})\omega + -5.229 \times 10^{-8} \omega^2 - (1.441j \times 10^{-5})\omega^3 + 3.903 \times 10^{-16}]}$$

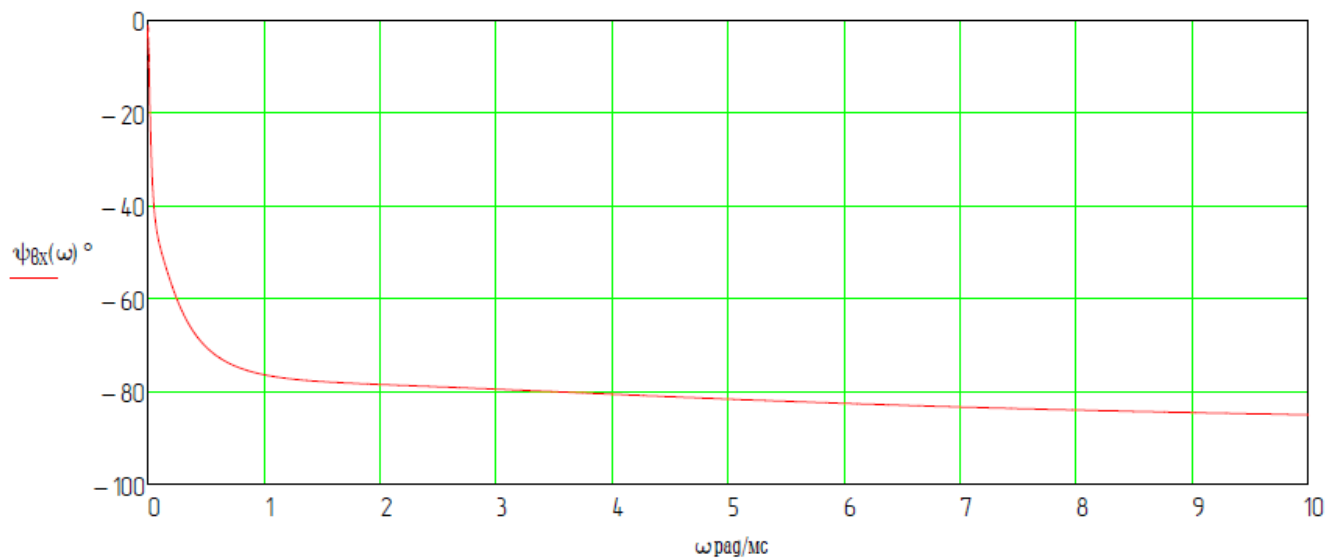
$$|Z_{\text{вх}}|(\omega) = \sqrt{\frac{[d_0 - d_2 \omega^2]^2 + [d_3 \omega^3 - d_1 \omega]^2}{\omega [(b_2 \omega^2 - b_0)^2 + (b_3 \omega^3 - b_1 \omega)^2]}} = \sqrt{\frac{(-7.892 \times 10^{-14} \omega + 3.069 \times 10^{-7} \omega^3)^2 + (-8.28 \times 10^{-10} \omega^2 - 0)^2}{\omega [(-1.278 \times 10^{-11} \omega + 1.441 \times 10^{-5} \omega^3)^2 + (5.229 \times 10^{-8} \omega^2 - 3.903 \times 10^{-16})^2]}}$$

$$\psi_{\text{вх}}(\omega) = \text{atan} \left[\frac{(d_3 \omega^3 - d_1 \omega)^2}{d_0 - d_2 \omega^2} \right] - \text{atan} \left[\frac{\omega (b_2 \omega^2 - b_0)}{b_3 \omega^3 - b_1 \omega} \right]$$

АЧХ



ФЧХ

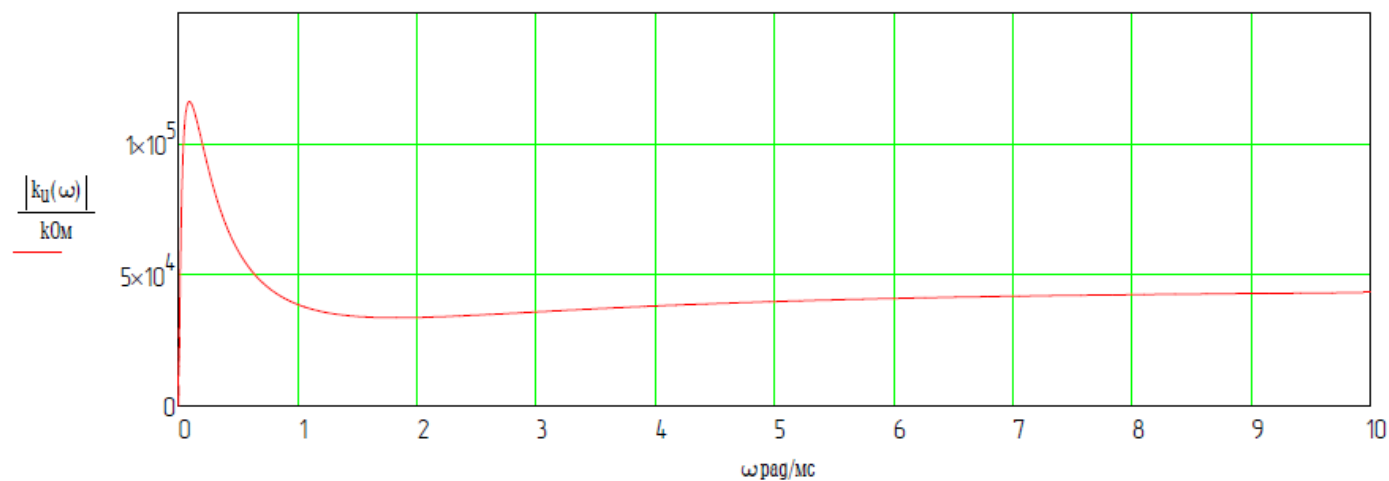


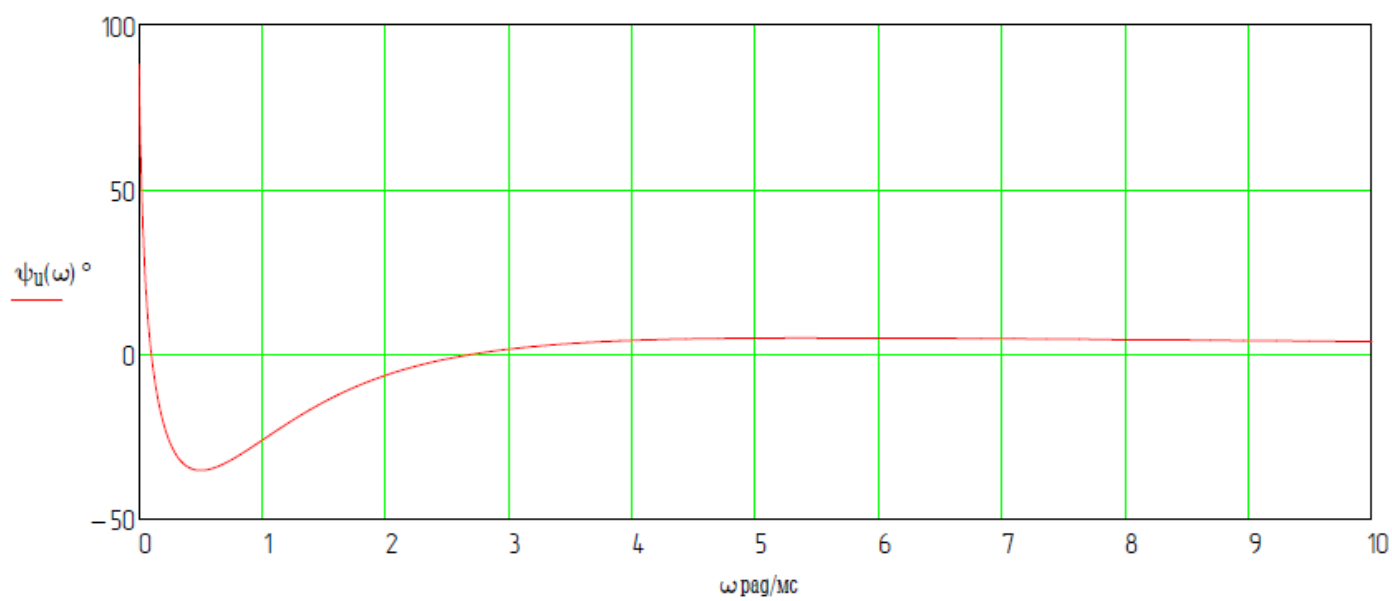
Знайдемо амплітудно-частотну характеристику кола (АЧХ) як модуль комплексної частотної функції, тому (із урахуванням числових значень параметрів елементів)

$$k_u(\omega) = \frac{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1j\omega + a_0}{b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0} = \frac{(1.464j \times 10^{-6})\omega - (0.643j)\omega^3 + -0.002\omega^2}{(1.278j \times 10^{-11})\omega + -5.229 \times 10^{-8}\omega^2 - (1.441j \times 10^{-5})\omega^3 + 3.903 \times 10^{-16}}$$

$$k_u(\omega) = \sqrt{\frac{(a_0 - a_2\omega^2)^2 + (a_3\omega^3 - a_1\omega)^2}{(b_2\omega^2 - b_0)^2 + (b_3\omega^3 - b_1\omega)^2}} = \sqrt{\frac{(-1.464 \times 10^{-6}\omega + 0.643\omega^3)^2 + 3.318 \times 10^{-6}\omega^4}{(-1.278 \times 10^{-11}\omega + 1.441 \times 10^{-5}\omega^3)^2 + (5.229 \times 10^{-8}\omega^2 - 3.903 \times 10^{-16})^2}}$$

АЧХ



$\Phi\chi$ 

РОЗДІЛ 3

Моделювання роботи приладу

3.1 Моделювання темброблоку в LTspice[4]:

Для створення моделі темброблоку в даній програмі, я замінив всі потенціометри на звичайні постійні резистори, як і в математичному розрахунку в розділі 3, за прикладом схеми в ній (Рис 2.1.1).

Ось так виглядає схема, яку я досліджував в цьому ПЗ (Рис 3.1.1).

Оскільки моделювати лінійні та логарифмічні потенціометри досить складно – було прийняте рішення проводити моделювання тільки з врахуванням того, що я використав всі потенціометри лінійної характеристики.

Для побудови АЧХ в даному ПЗ я використав функцію AC Analysis. Вона дозволяє нам створити графік провідності в залежності від потрібних початкової та кінцевої частот.

Вигляд налаштувань для отримання АЧХ схеми виглядає так (Рис 3.1.2)

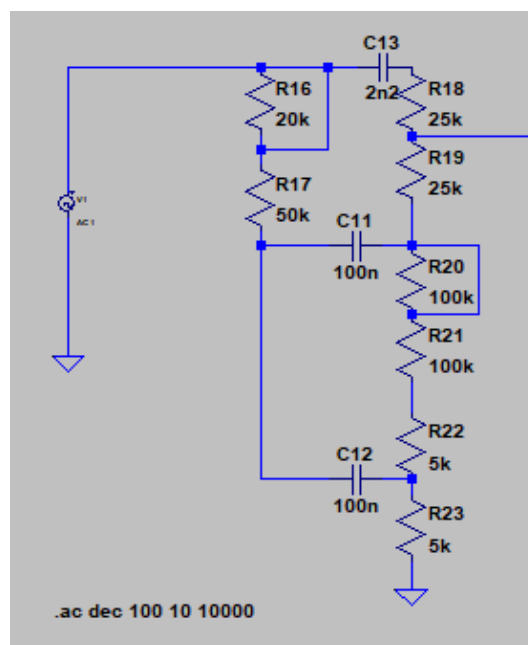


Рис 3.1.1

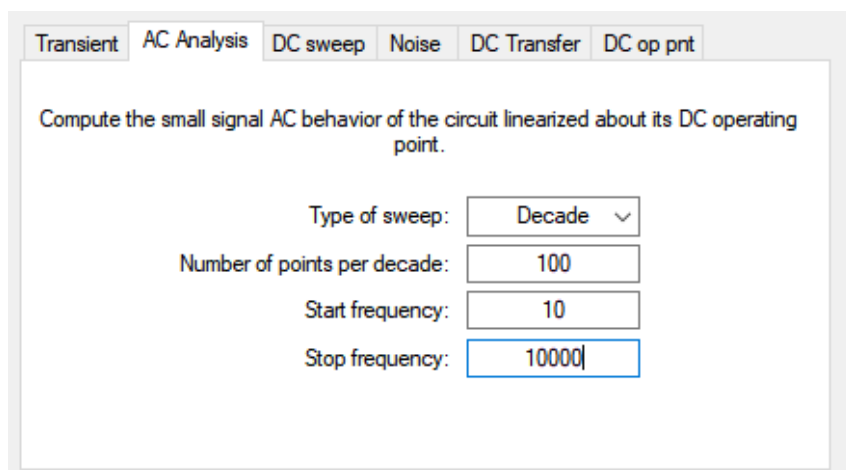
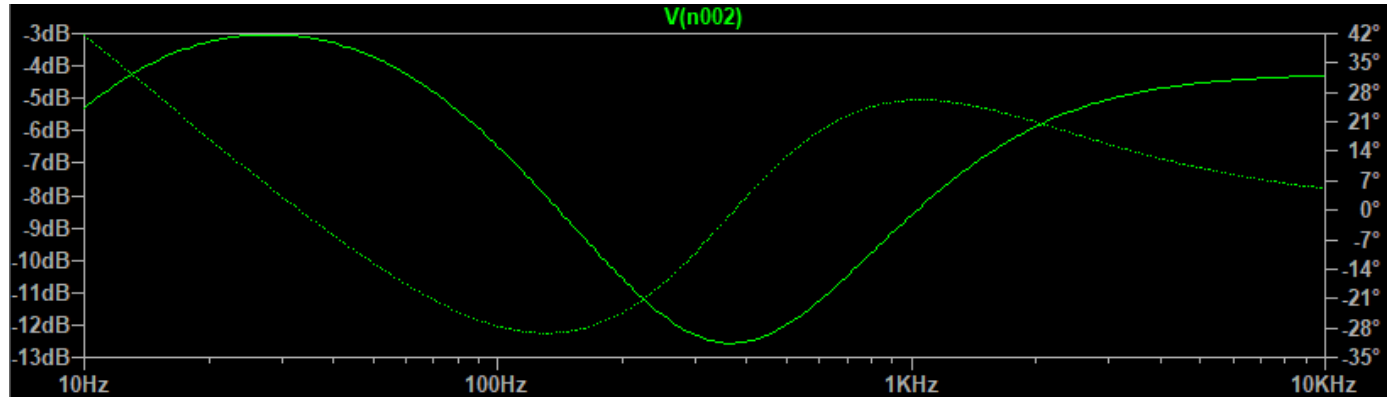


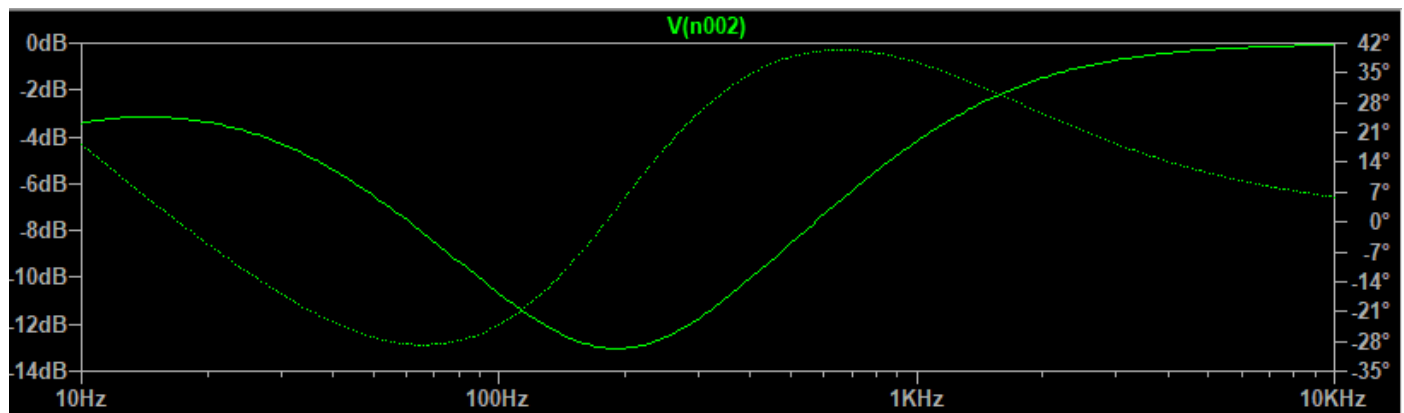
Рис 3.1.2

Маючи таке ПО ми можемо отримати АЧХ темброблоку в залежності від будь-яких значень опорів потенціометрів.

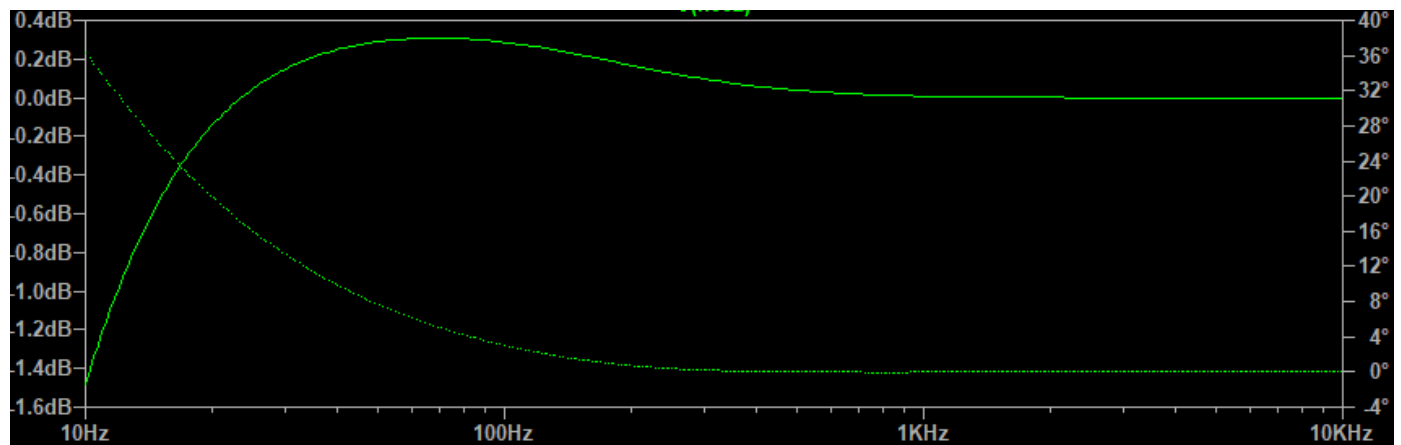
Кілька прикладів АЧХ, змодельованих з схеми описаної в LTspice[4] (Рис



$R17 = 25\text{ КОМ}; R21=100\text{ КОМ}; R22=R23=5\text{ КОМ}; R18=R19=25\text{ КОМ}$



$R17 = 50\text{ КОМ}; R21=200\text{ КОМ}; R22=0; R23=10\text{ КОМ}; R18=0; R19=50\text{ КОМ}$



$R17 = 0; R21=200\text{ КОМ}; R22=0; R23=10\text{ КОМ}; R18=0; R19=50\text{ КОМ}$

3.1.1):

3.2 Моделювання темброблоку в сторонньому ПЗ:

В пошуках додатку для моделювання саме темброблоків, було знайдено програму Tonestack Calculator [5].

Вона дозволяє розрахувати АЧХ нашого темброблоку в залежності від будь-якого значення опорів та ємностей нашої схеми, але має суттєвий недолік – розрахунок можна проводити тільки на моделях темброблоків, що вже є в даному ПЗ.

Цей недолік для нашого темброблоку не є суттєвим, адже наше схемотехнічне рішення є традиційним (1.5.3).

Його вигляд в Tonestack Calculator[5] виглядає так (Рис 3.2.1)

За допомогою зміни значень елементів на схемі ми можемо отримувати АЧХ, що буде реалізовано, саме за даних значень.

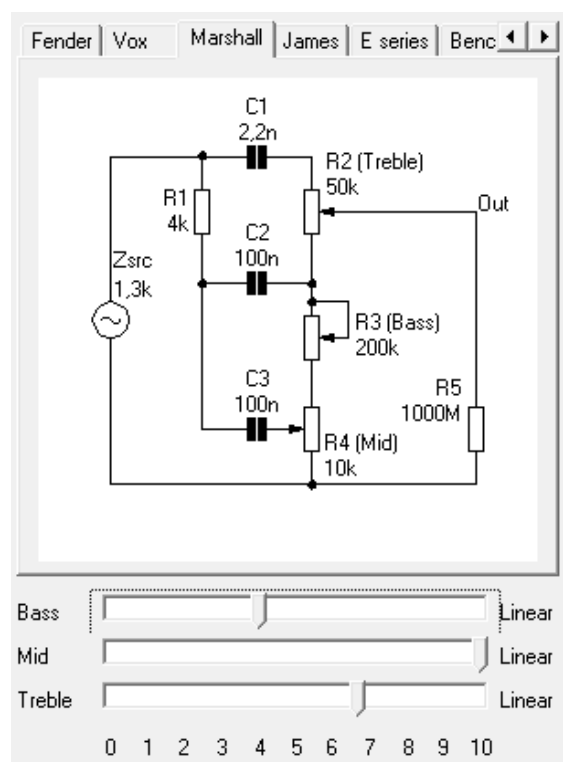


Рис 3.2.1

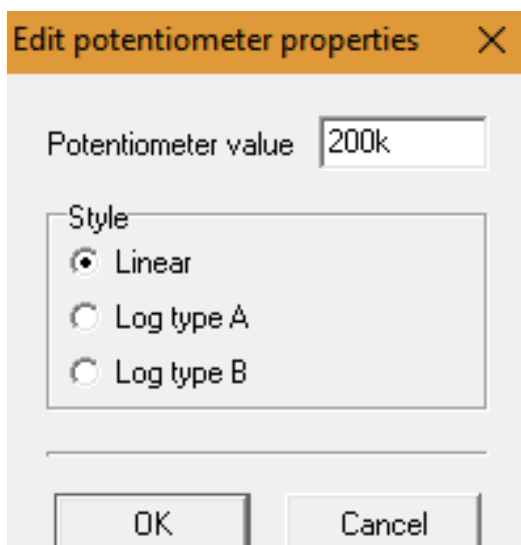
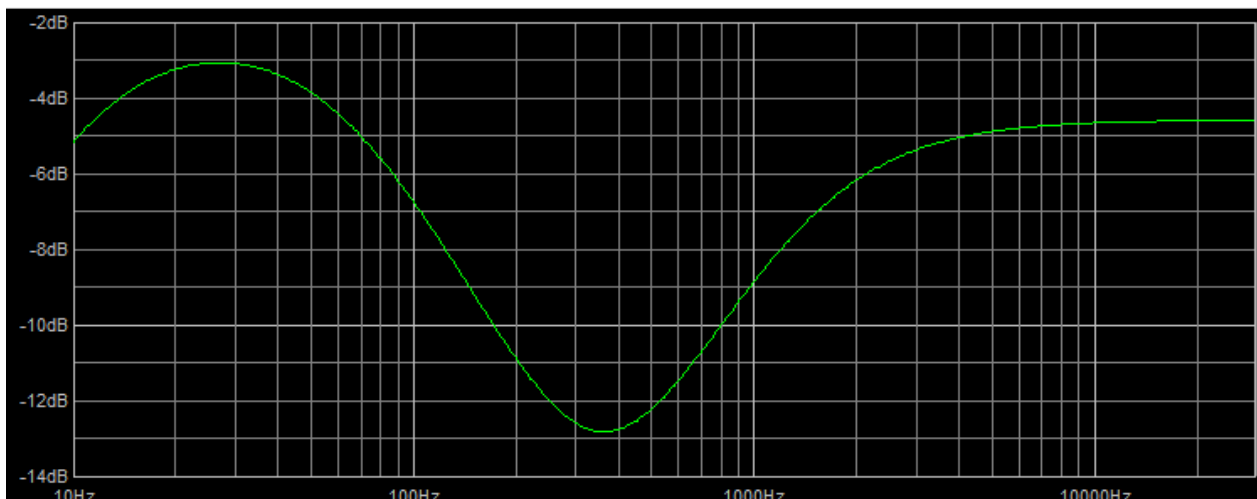


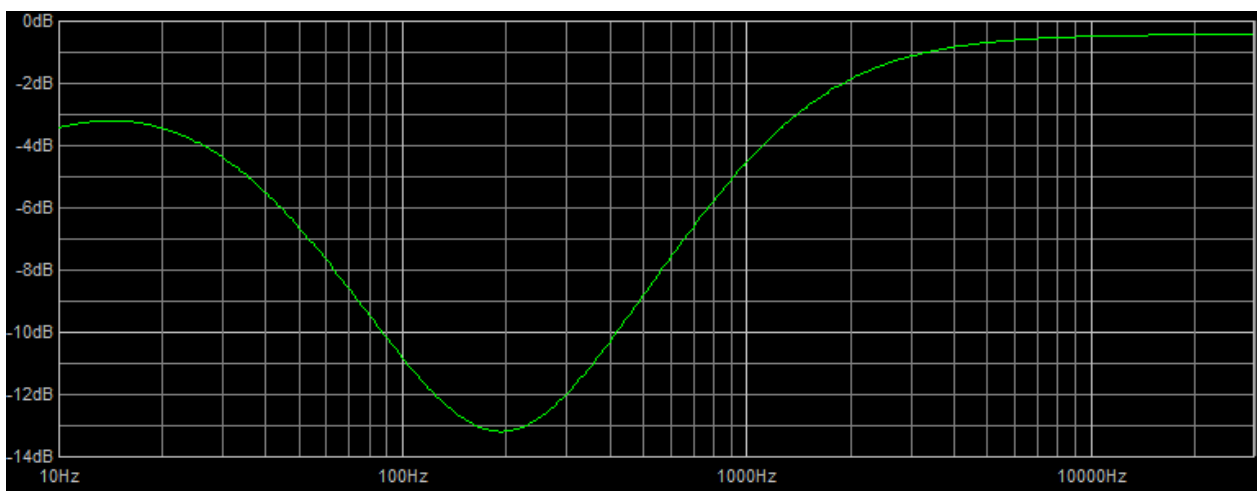
Рис 3.2.2

Вікно зміни значень елементів виглядає так (Рис 3.2.2)

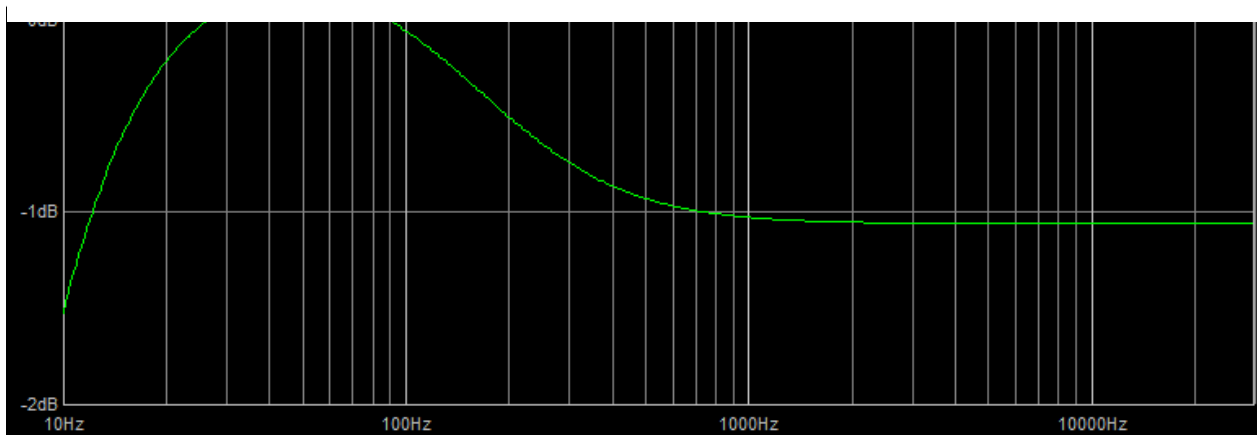
Кілька прикладів АЧХ, змодельованих з схеми описаної вище (Рис 3.1.1):



$$R17 = 25k\Omega; R21=100 k\Omega; R22=R23=5 k\Omega; R18=R19=25 k\Omega$$



$$R17 = 50 k\Omega; R21=200 k\Omega; R22=0; R23=10 k\Omega; R18=0; R19=50 k\Omega$$



$$R17 = 0; R21=200 k\Omega; R22=0; R23=10 k\Omega; R18=0; R19=50 k\Omega$$

3.3 Загальне моделювання схеми в LTspice[4]:

Схему було зібрано та протестовано (на прототипі) майже на максимально ідентичних елементах. Це обумовлено тим, що Spice моделі не можуть повторити матеріальні елементи схеми, хоч і відтворюють їх досить точно.

Для моделювання схеми ми побудували схему в LTspice[4] (Рис3.3.1):

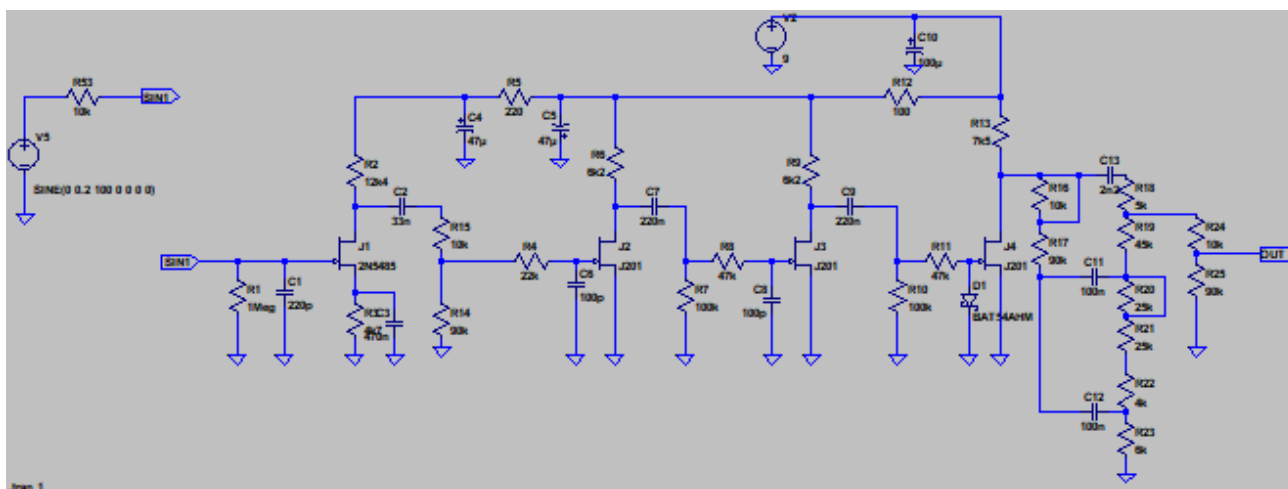


Рис3.3.1

Сигнал на виході даної схеми (Рис 3.3.2), відносно вхідного сигналу був очікуваним тому, що був описаний в першому розділі:

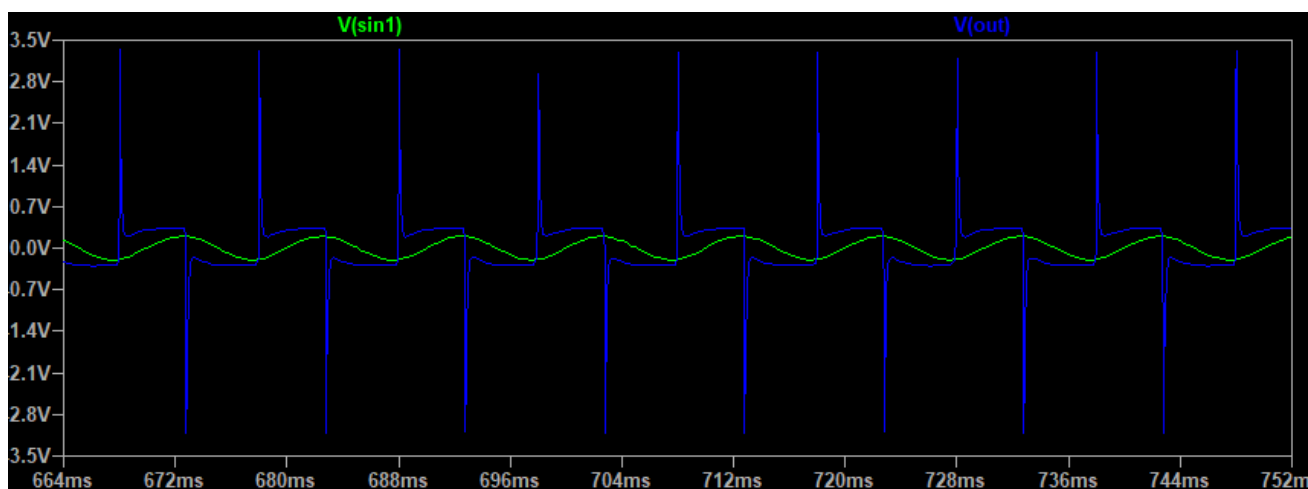
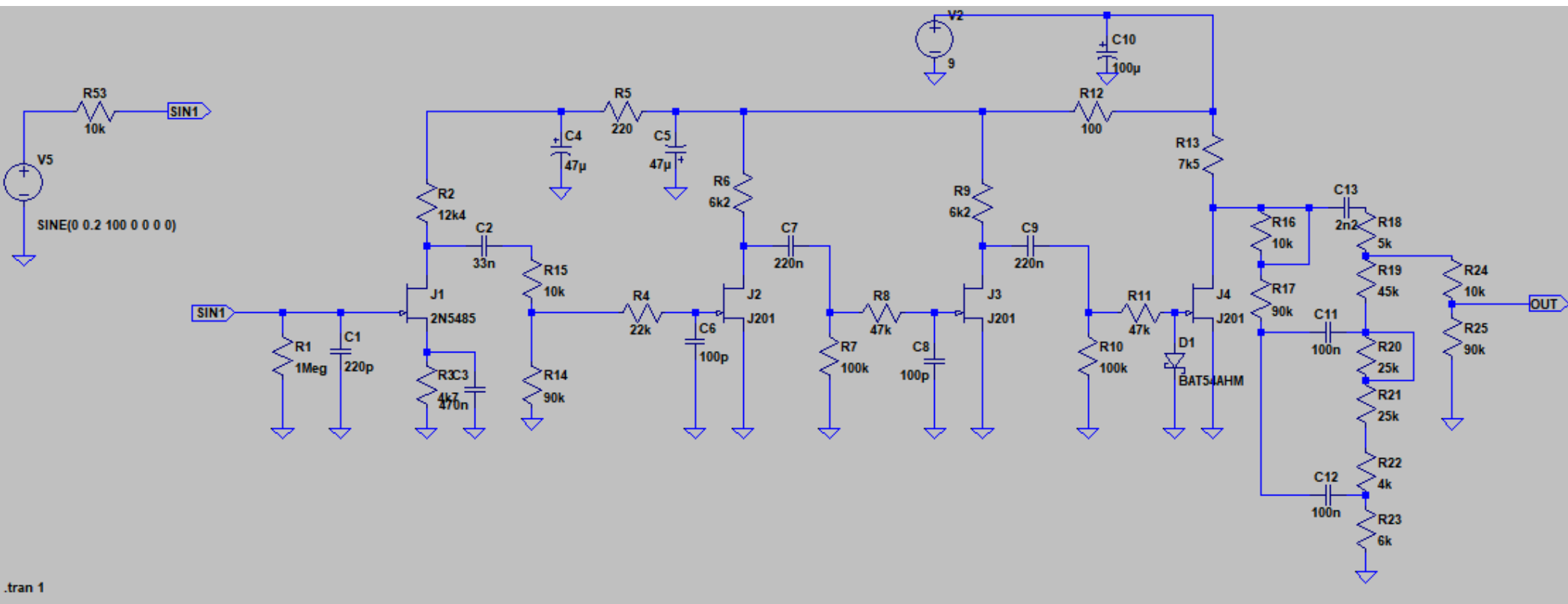


Рис 3.3.2



Puc3.3.1

РОЗДІЛ 4

Створення та дослідження робочого прототипу пристрою

4.1 Створення готового прототипу:

Після моделювання схеми в LTspice, одразу було прийняте рішення створювати друкований вузол. Його розробка пройшла в програмі Sprint Layot[6], і кінцевий результат мав такий вигляд (Рис 4.1.1)

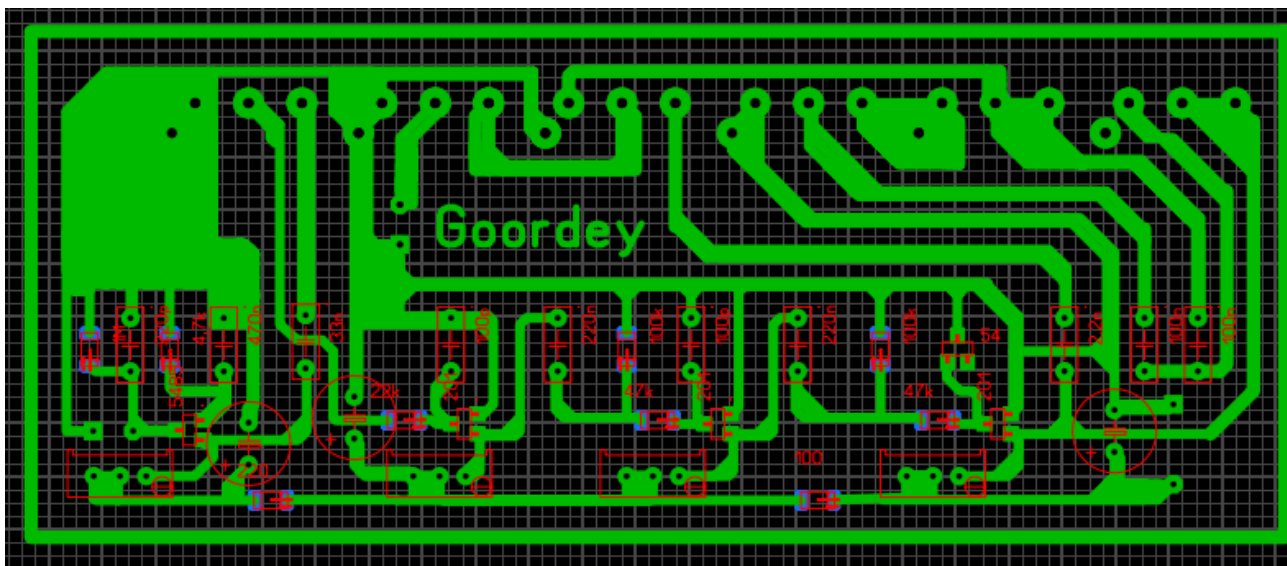
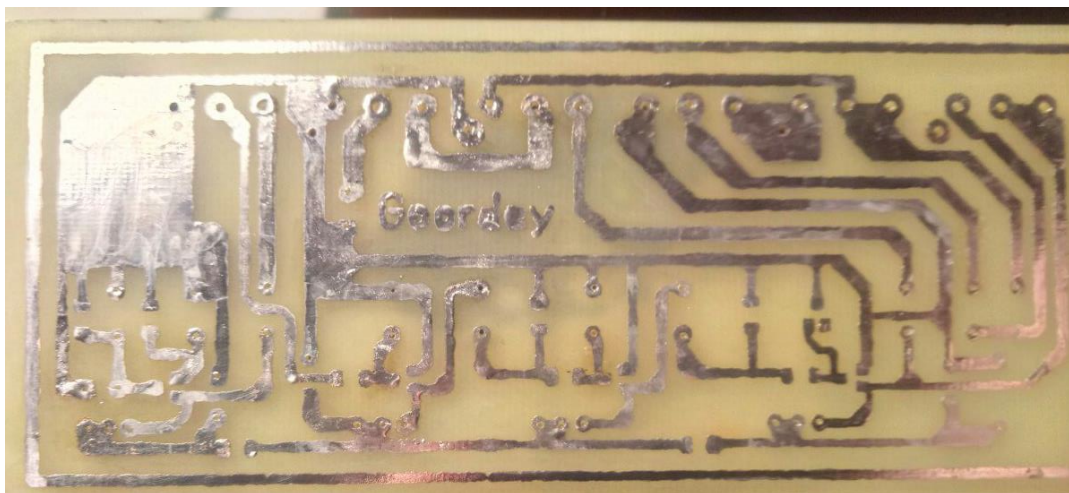


Рис 4.1.1

Для реалізації цього вузла, я використав метод ЛУТ[7]. Після створення друкованої плати та її лудіння сплавом , я отримав такий результат (Рис 4.1.2):



Puc 4.1.2

Потім, на друковану плату, були припаяні всі елементи. Ось такий результат я отримав (Рис 4.1.3):



Рис 4.1.3

Коли було прийняте рішення використовувати корпус для прототипу – потенціометри були зняті з плати та з'єднувались за допомогою провідників.

Оскільки транзистори я використовував в SMD корпусі – вони знаходяться на іншій стороні друкованої плати (Рис 4.1.4) :

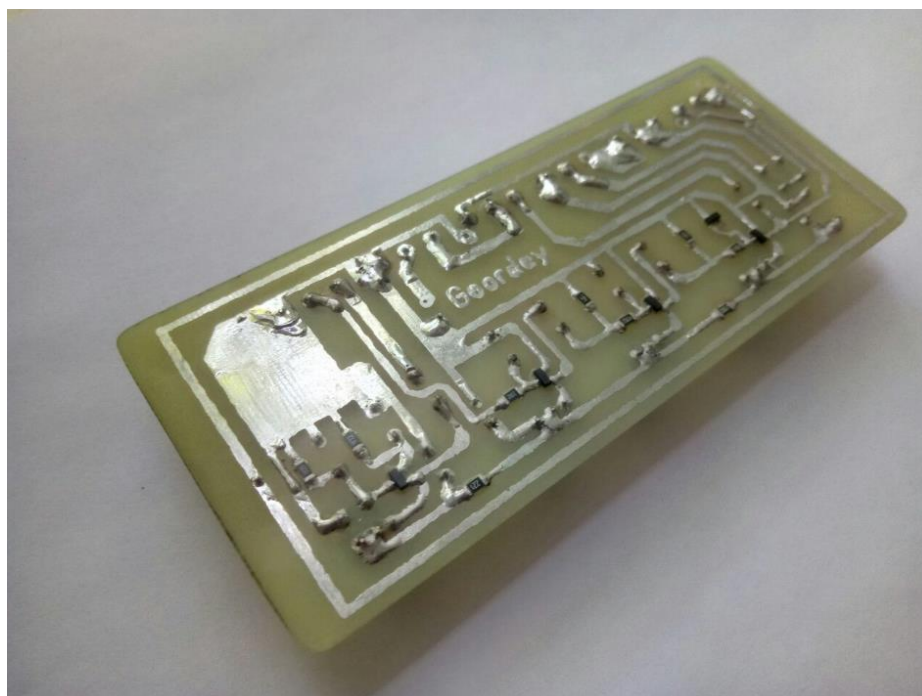


Рис 4.1.4

Кінцевий результат був отриманий, коли прототип був встановлений в корпус (Рис 4.1.5) та протестований



Рис 4.1.5

4.2 Дослідження готового прототипу:

Початок дослідження готового прототипу почалось із зняття сигналу з виходу схеми. При входній амплітуді в 200 мВ та частоті в 200 Гц, ми отримуємо такі форми сигналів (Рис 4.2.1), де синій – вхідний сигнал, жовтий – вихідний:

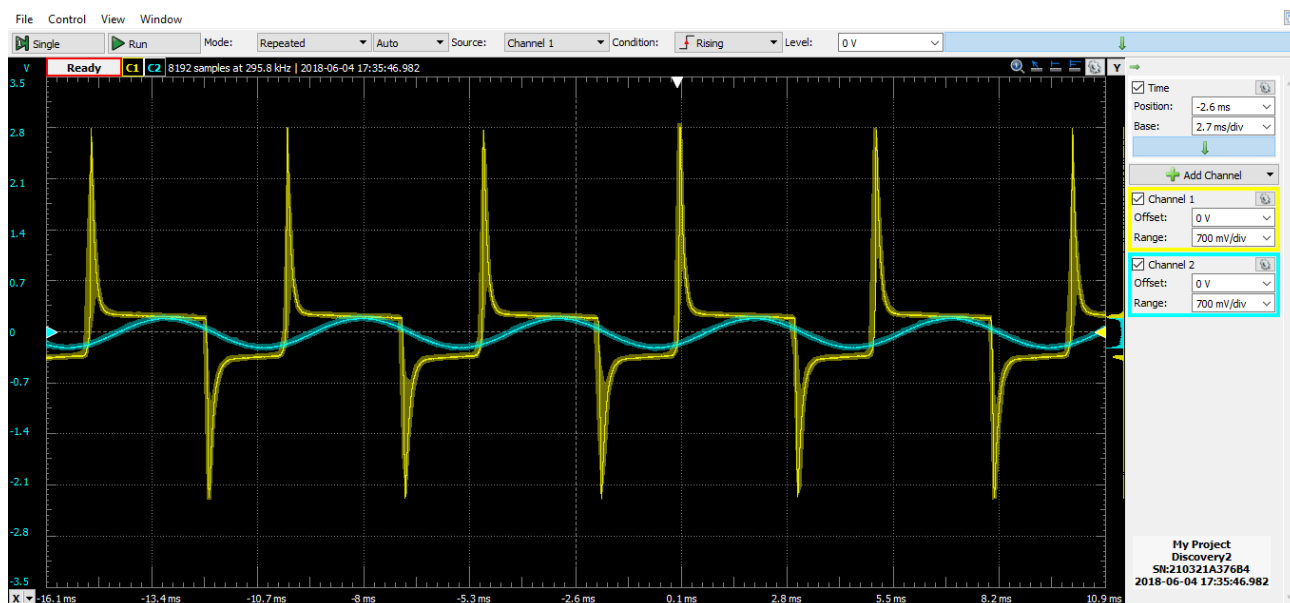


Рис 4.2.1

Сигнали ми знімали за допомогою осцилографа Analog Discovery 2[8]. Отриманий сигнал є ідеальним, і саме такого результату ми очікували.

Важливим пунктом для гітариста, що грає «метал» є те, що темброблок повинен пропускати сигнал майже без зрізу при середньому положенні всіх потенціометрів, але він повинен трішки зрізатись на низьких частотах.

Для зняття АЧХ ми теж використали Analog Discovery 2 [8](Рис4.2.2). Положення потенціометрів, для досягнення саме такого ефекту було виставлено практично

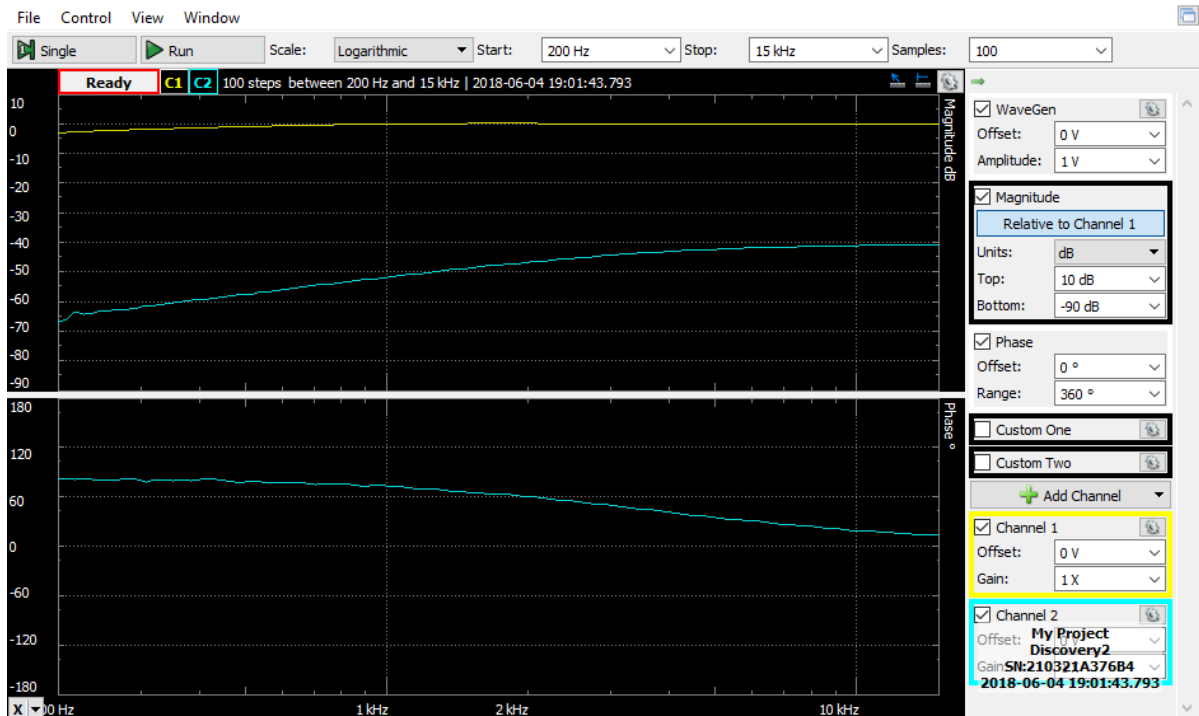
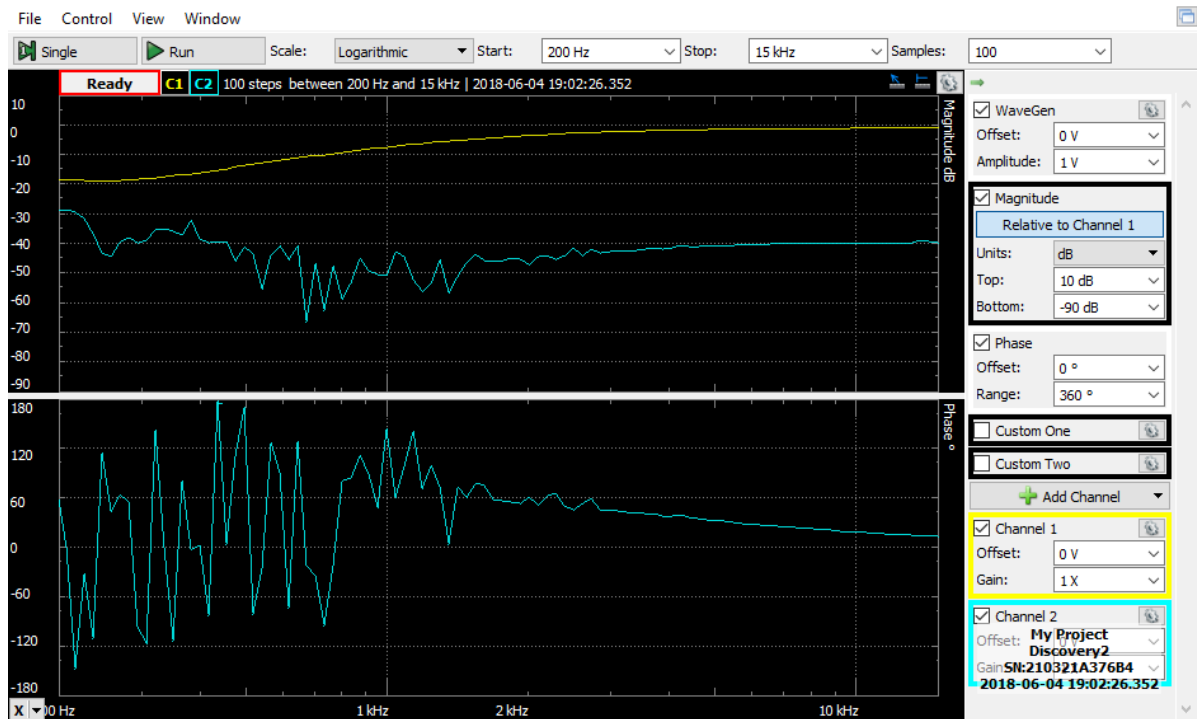


Рис 4.2.2 $R17 = 0$; $R21 = 200 \text{ КОм}$; $R22 = 0$; $R23 = 10 \text{ КОм}$; $R18 = 0$; $R19 = 50 \text{ КОм}$

Значення наведені вище поєднані номіналами з вищезазначеною схемою, яку ми досліджували на різному ПЗ (Рис 3.1.1)



Зріз частот при максимальному значення опорів басу та мінімальних значеннях високих та низьких частот

ВИСНОВОК

Підсумуємо зроблену роботу. Створений ефект повністю відповідає меті нашої роботи. Проведені симуляції та дослідження готового прототипу показало нам це.

Готовий прототип був протестований з електрогітарою та великим гітарним стендом. Тести показали, що ефект чудово працює не тільки в дослідженнях за допомогою генератора та осцилографа, а й високо оцінений музикантами.

В першому розділі я повністю розібрав схему та поділив її по каскадно, прояснивши деякі робочі точки та використання елементів.

В другому розділі я провів теоретичні розрахунки темброблоку. Розрахунки проводились за допомогою стандартних методів, що були вивчені при проходженні курсу Теорії Основ Електричних Кіл.

В третьому розділі я провів симуляцію в LTspice та Tone Stack calculator. Отримані графіки будувались в діапазоні гітарних частот 10Гц-10КГц. При проведенні симуляції легко було побачити, що значення, отримані теоретично, співпадають з отриманими в ПЗ, яке ми використовували.

В четвертому розділі було створено готовий прототип, що своїм створенням повністю підтверджує мету та бажання при його розробці. Осцилограми та тести, що були проведені з студійним обладнанням, показали, що прототип працює та повністю відповідає вимогам, описаним в першому розділі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. . Форум розробників електроніки для гітаристів /[Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://guitar-gear.ru/forum/topic/5907-krankenbox/> (дата звернення 29.05.2018)
2. Даташит на транзистор J201 /[Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.experimentalistsanonymous.com/diy/Datasheets/J201.pdf> (дата звернення 29.05.2018)
3. Даташит на транзистор 2N5485 /[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mouser.com/ds/2/68/2n5484-5486-51207.pdf> (дата звернення 29.05.2018)
4. LTspice XVIII / Linear Technology/Analog Devices / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice> (дата звернення 29.05.2018)
5. Tone Stack calculator / [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.duncanamps.com/tsc/> (дата звернення 29.05.2018)
6. Sprint Layout / [Електронний ресурс] – Режим доступу обмежений: <https://www.electronic-software-shop.com/sprint-layout60.html?language=en> (дата звернення 29.05.2018)
7. Технологія ЛУТ/[Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://chem.net/master/45.php> (дата звернення 29.05.2018)
8. Analog Discovery 2 / Digilent / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://store.digilentinc.com/analog-discovery-2-100msps-usboscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply/pdf> (дата звернення 29.05.2018)