

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«СМУГОВИЙ ФІЛЬТР БАТТЕРВОРТА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ ЗВУКОВІДТВОРЕННЯ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-196
спеціальності 172 - Телекомунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

М. В. Кобренюк М. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н. проф., професор каф. ІРТС
Семенов А. О.

(прізвище та ініціали)

«15» 06 2023 р.

Рецензент: к.т.н. доц., каф. ІКСТ

Стальченко О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 06 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н. проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 06 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

Олександр ОСАДЧУК

21.03.2023 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кобренюку Михайлу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення»

керівник роботи Семенов Андрій Олександрович, д.т.н., проф., каф. ІРТС

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "20"03 2023 року № 67





2. Строк подання студентом роботи 19 06 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Смуга пропускання 0÷3,4кГц. Перехідна смуга 3,4÷5,4кГц. Амплітудно-частотні спотворення в смузі пропускання 3дБ. Ослаблення в смузі затримування не менше 30дБ. Коефіцієнт підсилення в смузі пропускання не менше 8. Джерело живлення двополярне ±15В. Тип фільтра – аналоговий RC – фільтр звукових частот з характеристиками Баттерворта. Опір навантаження – 2кОм. Структурна фільтра - каскадна.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Огляд літературних джерел. Основи теорії активних фільтрів. Розроблення та дослідження фільтра баттерворта четвертого порядку. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Огляд літературних джерел. Структурна схема фільтра Баттерворта 4-го порядку. Результати електричних розрахунків фільтра Баттерворта 4-го порядку. Схема електрична принципова фільтра Баттерворта 4-го порядку. Схема фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах в пакеті програм Electronics Workbench. АЧХ і ФЧХ фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах в пакеті програм Electronics Workbench.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., проф., професор Семенов А. О.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 22.03.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2023-28.02.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2023-23.03.2023	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	20.03.2023-31.03.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.04.2023-06.05.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2023-18.05.2023	
6.	Розробка графічної частини БДР	19.05.2023-22.05.2023	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2023-28.05.2023	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	29.05.2023-06.06.2023	
9.	Нормоконтроль	07.06.2023-09.06.2023	
10.	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	10.06.2023-20.06.2023	
11.	Захист БДР ЕК	21.06.2023-22.06.2023	

Студент



(підпис)

Кобренюк М. В.

Керівник роботи



(підпис)

Семенов А. О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Кобренюк М.В. Смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення. Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 79 с. На українській мові. Бібліогр.: 32 назв; Табл.: 10; Рис.: 26.

Метою даної бакалаврської дипломної роботи є розрахунок та дослідження аналогового RC-фільтра звукових частот з характеристиками Баттерворта. В даній роботі проводиться розрахунок фільтру звукових частот виходячи з заданих технічних параметрів, таких як смуга пропускання, ширини перехідної смуги, амплітудно-частотних спотворень, мінімального ослаблення в смузі затримування, мінімального коефіцієнта передачі в смузі пропускання, опору навантаження. Також проводиться моделювання розрахованого фільтру з використанням моделюючого пакету Electronics Workbench.

У роботі розроблено та досліджено електричну схему смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення.

Ключові слова: активний фільтр, операційний підсилювач, амплітудно-частотна характеристика, фільтр Баттерворта, звуковий сигнал.

ABSTRACT

Kobrenyuk M.V. Fourth-order Butterworth bandpass filter on operational amplifiers for audio reproduction equipment. Bachelor qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2023. – 96 p. In Ukrainian language. Bibliography: 32 titles; Table: 10; Fig.: 26.

The purpose of this bachelor's thesis is the calculation and research of an analog RC-filter of sound frequencies with Butterworth characteristics. In this paper, the calculation of the audio frequency filter is carried out based on the specified technical parameters, such as bandwidth, transition bandwidth, amplitude-frequency distortion, minimum attenuation in the delay band, minimum transmission coefficient in the transmission band, load resistance. The calculated filter is also simulated using the Electronics Workbench simulation package.

The electrical circuit of the fourth-order Butterworth bandpass filter on operational amplifiers for sound reproduction equipment was developed and investigated in the paper.

Key words: active filter, operational amplifier, amplitude-frequency characteristic, Butterworth filter, sound signal.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1 Загальні відомості про електричні фільтри.....	9
1.2 Аналіз сучасного стану електричних фільтрів	13
1.3 Характеристики фільтрів звукових частот і вимоги до них	14
1.4 Каскадне проектування активних фільтрів	17
1.5 Чутливість характеристик і параметрів фільтра до змін параметрів компонентів	21
2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ	24
2.1 Основні відомості та визначення.....	24
2.2 Активні фільтри на операційних підсилювачах.....	25
2.3 Методика розрахунку активного ФНЧ другого порядку	32
2.4 Методика розрахунку активного ФВЧ другого порядку.....	33
2.5 Методика розрахунку активного смугового фільтра	35
3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРА БАТТЕРВОРТА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ	37
3.1 Вибір структурної схеми фільтра	37
3.2 Вибір електричної схеми каскадів фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах	38
3.3 Розрахунок параметрів пасивних елементів фільтрів низьких частот другого порядку.....	39
3.4 Вибір операційного підсилювача.....	43
3.5 Моделювання електричної схеми фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	54
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	54
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	57
4.3 Пожежна безпека	63

ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
Додаток А (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) дипломної роботи	71
Додаток Б (обов'язковий). Ілюстративний матеріал	73

ВСТУП

Актуальність

На сучасному етапі розвитку електротехніки з'явилась нагальна потреба розробки пристроїв які мали б широкі можливості при незначних габаритах та вартості. Така необхідність пов'язана з високою конкуренцією на ринку електронної техніки. При використанні традиційних схемних рішень можливості застосування мікромініатюризації обмежені, що пов'язано з неможливістю зменшення розмірів деяких елементів схем для низького діапазону частот.

На даний час існує велика кількість різних типів фільтрів, які використовують різноманітні принципи і фізичні явища, і знаходять використання в різних діапазонах частот.

Вирішення питання реалізації фільтра планується провести за рахунок використання найбільш оптимального схемного рішення, та сучасної елементної бази. На даний момент існують схемні реалізації, які дозволяють виконати поставлену задачу, при використанні невеликої кількості елементів, та низький матеріалоємності.

Мета роботи полягає в розробці та дослідженні аналогового RC-фільтра звукових частот з характеристиками Баттерворта.

Об'єкт дослідження

Процес перетворення енергії коливань амплітудо-частотного спектру вихідного сигналу згідно заданих частотних характеристик фільтра.

Предмет дослідження

Амплітудо-частотні та фазо-частотні характеристики смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах.

Вирішення поставленої мети в бакалаврській кваліфікаційній роботі можлива за рахунок розв'язання наступних задач:

1. Провести аналіз методів та засобів розроблення аналогових активних фільтрів на операційних підсилювачах для обладнання високоякісного звуковідтворення.

2. Розглянути методи та засоби дослідження частотних параметрів і характеристик аналогових активних фільтрів на операційних підсилювачах для обладнання високоякісного звуковідтворення.

3. Розробити та дослідити Смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення.

4. Виконати комп'ютерне схемотехнічне моделювання смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення.

5. Розробити розділ Охорони праці.

Новизна отриманих результатів.

У роботі запропонована нове схемотехнічне рішення смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення та отримані нові практичні результати з дослідження його амплітудно-частотних характеристик.

Особистий внесок здобувача

Результати бакалаврської дипломної роботи отримані автором практично самостійно.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Загальні відомості про електричні фільтри

В даний час існує велика кількість різних типів фільтрів, які використовують різні принципи і фізичні явища і знаходять застосування в різних діапазонах частот.

Одним із видів фільтрів є механічний. Основними елементами механічного фільтра є механічні диски, кожен з яких є механічним еквівалентом паралельного резонансного контуру. Завдяки правильному вибору структури магнітного диска можна отримати резонансну систему з більшою добротністю. Оскільки диски з'єднані в єдину структуру, вхідний сигнал змінюється відповідно до реакції кожного диска, коли він проходить між вхідним і вихідним перетворювачами. Частотний діапазон цього фільтра становить від десятків кілогерц до приблизно 600 кГц. Механічний фільтр має ККД 1000. Основними недоліками цього фільтра є складність виготовлення, висока вартість, обмежений частотний діапазон і значне загасання в смузі пропускання. Це зумовлене низькою ефективністю вхідного й вихідного перетворювачів.

Останнім часом широко застосовуються фільтри поверхневих акустичних хвиль, в основному завдяки можливості взаємодії з плоскими структурами на поверхні акустичних трубок, тобто можливе виготовлення таких фільтрів у мініатюрних конструкціях в діапазоні частот від мегагерц до гігагерц. Недоліками такого типу фільтрів є низька швидкість і досить складна технологія виготовлення.

Інший вид фільтрів - це кварцовий фільтр, основним компонентом якого є кварцовий резонатор. Кварцові резонатори мають добротність до 10⁵, що робить кварц чудовим компонентом для використання у фільтрах. Крім того, кварцові фільтри надзвичайно стійкі. Діапазон роботи кварцових резонаторів обмежений частотами від кількох кілогерц до 100 МГц. На

низьких частотах кварцова складова стає неприйнятно великою, а на 100 МГц або вище вона стає занадто малою, щоб контролювати її розмір під час виготовлення. Тому у випадку, коли необхідно гарантувати високу якість і стабільність фільтра у відносно вузькій смузі пропускання, як фільтруючий елемент використовується кристал кварцу.

Для обробки цифрових сигналів використовуються цифрові фільтри, які реалізовані програмними методами на ЕОМ або апаратними засобами у вигляді схем регістрів, помножувачів і суматорів. Перевагами цих цифрових фільтрів є їх універсальність, простота формування АЧХ, можливість оперативного налаштування фільтра в процесі роботи, висока часова і кліматична стабільність, відсутність реактивних компонентів і можливість досягнення лінійної АЧХ. Недоліком цифрового фільтра є те, що виникають шуми квантування, а схема схеми досить складна.

Одним із найпоширеніших типів фільтрів у діапазоні низьких і субнизьких частот є активний фільтр. Основна перевага активних фільтрів полягає в тому, що вони виготовляються за комплексною технологією, що дозволяє автоматизувати виробництво, значно знизити трудомісткість і матеріаломісткість при виробництві компонентів РЕА, підвищити їх надійність, зменшити масу і габаритні розміри. Застосування активних фільтрів дозволяє виключити використання намотувальних вузлів, виготовлення яких вимагає низької автоматизації виробництва. Активні фільтри дозволяють поєднувати функції фільтрації та підсилення, а крім того, на даний момент вони є єдиними базовими фільтрами, які відрізняються високою селективністю в діапазоні суббасів, завдяки компенсації втрат в пасивних компонентах.

Зі сказаного вище можна зробити висновок, що для даного діапазону робочих частот найбільш прийнятним є використання звукового фільтра з характеристикою Баттерворта.

Фільтр низьких частот — це пристрій, який пропускає низькочастотні сигнали та затримує високочастотні сигнали. Фільтри Баттерворта

забезпечують плоску характеристику в смузі пропускання. Найпростішою амплітудно-частотною характеристикою фільтра низьких частот є фільтр Баттерворта. Ця характеристика фільтра рівномірно зменшується зі збільшенням частоти. Збільшення порядку також покращує продуктивність. Фільтри або електричні фільтри – це частотно-селективні схеми, призначені для «пропуску» або пропускання синусоїдальних сигналів в одній або кількох суміжних частотних смугах і «зупинки» або блокування їх у додаткових частотних смугах. За смугою частот, через яку проходить сигнал, фільтри з однією смугою пропускання поділяються на фільтри низьких частот, фільтри високих частот і смугові фільтри. Існують інші типи фільтрів, такі як: всепрохідний, частотно-селективний (вузькосмуговий) і частотно-затриманий (режекторний). Інша класифікація фільтрів - це положення, засновані на теорії кіл, згідно з якою вони розраховуються. Він містить фільтр параметрів функції та фільтр параметрів роботи.

Фільтр характерних параметрів складається з чотирьохполюсних зв'язків, розташованих каскадом, і характерний опір збігається при послідовному з'єднанні. Якщо в той же час фільтр узгодити з навантаженням на прилад, «характеристичне загасання» в смузі пропускання буде дорівнювати нулю. Однак через характеристичного опору і частотної залежності резистивного навантаження фільтр на його затискачі узгоджується не на всіх частотах, що призводить до ненульових значень загасання в смузі пропускання.

Інший спосіб розрахунку фільтра заснований на робочому параметрі загасання. Однією з переваг теорії робочих параметрів є те, що специфічний вплив неідеальності компонентів компенсується методом попередніх спотворень, однак це дає постійне значення затухання в смузі пропускання. Загалом, для тієї самої (як у фільтрах функцій) структури, фільтри результатів, обчислені з робочих параметрів, забезпечують (з такою ж кількістю посилянь) кращі характеристики. Це вдосконалення відбулося ціною значного ускладнення обчислень, яке досі було головним обмежуючим

фактором, оскільки комп'ютери стали повсюдними. З розширенням обчислювальної потужності проектування фільтрів відповідно до робочих параметрів з'явилося у вигляді таблиць фільтрів, розміщених у книгах.

Як активний пристрій, операційний підсилювач широко використовується завдяки чудовій продуктивності, розумній вартості та швидкому терміну доставки. Термін «активний фільтр» включає багато різних схемних структур і методів проектування, найважливіші з яких можна розділити на наступні три категорії.

1) Каскадна конструкція фільтрів. Це стосується ізольованих ланцюгів фільтрів другого порядку (часто званих біквадратичними схемами або «біквадрами»), які з'єднані в каскад для досягнення необхідних передаточних функцій вищого порядку. Окремі вузли, що утворюють фільтр, можуть мати другий або третій порядок і включати один або більше операційних підсилювачів.

2) Моделювання RC фільтра. Відправною точкою є структура RC-фільтра. Потім це досягається модернізацією оригінальної схеми фільтра, щоб її можна було реалізувати за допомогою узагальненого резистивного перетворювача (наприклад, частотно-залежного негативного опору). І гіратори, і частотно-залежні негативні опори засновані на операційних підсилювачах.

3) Фільтр посилян. Загалом, початковою точкою тут є каскад активних фільтрів першого та другого порядку (головним чином вузли загальної функції), які потім охоплюються додатковою петлею негативного зворотного зв'язку. Останнє введено для того, щоб кінцева каскадна структура активного фільтра мала таку ж стабільність, як і аналогова схема RC-фільтра.

Каскади фільтрів другого порядку, або просто «дизайн каскаду фільтрів», є найпоширенішим методом розрахунку помірно вимогливих активних фільтрів. Розрахунки, описані в цій статті, базуються на цьому методі.

1.2 Аналіз сучасного стану електричних фільтрів

Історично першими в техніці, провідного зв'язку, а пізніше в радіотехніці, знайшли застосування пасивні RC – і LC – фільтри, з допомогою яких вирішувались більшість задач фільтрації електричних сигналів. Але незважаючи на безсумнівні позитивні властивості таких фільтрів (великий динамічний діапазон, прості схемні рішення, можливість отримувати різноманітні частотні характеристики) їм притаманна низка недоліків – велика маса і габаритні розміри (особливо на низьких частотах) котушок індуктивності, складність і несумісність технології виготовлення з технологією інтегральних мікросхем, низька завадозахищеність від електромагнітних полів, неможливість отримання фільтрів з комплексними полюсами на базі пасивних RC – кіл. [2]

Другими за хронологією використання були електромеханічні фільтри, які застосовуються в частотному діапазоні від 1Гц до приблизно 600кГц [3].

Головний недолік електромеханічних фільтрів полягає в порівняно великих габаритних розмірах і вазі, не технологічності виготовлення і високій собівартості.

В проміжку частот від приблизно 5кГц до 100МГц використовуються п'єзоелектричні (кристалічні) фільтри виготовлені на основі кварцу і кераміки, на більш низьких частотах п'єзоелектричні фільтри мають неприйнятні розміри і вагу [4].

В останні десятиріччя минулого століття і в наш час інтенсивно розвивається фільтрація на поверхневих акустичних хвилях, яка охоплює частотні діапазони від 10 МГц до десятків ГГц [5]

Таким чином існує ніша, яка охоплює низькі діапазони частот, де властивості вищезгаданих фільтрів за різних причин не задовольняють сучасним вимогам фільтрації електричних сигналів. Це ніша заповнюється RC – фільтрами, в яких для отримання комплексних полюсів включаються

підсилювачі і ці фільтри отримали назву активних RC – фільтрів (скорочено ARC – фільтрів). [6]

Перші відомості про ARC – фільтри, відносяться до 30-х років минулосторіччя, що пов'язано з засвоєнням діапазонів низьких і інфранизьких частот і побудовою вимірювальних систем, які функціонують в сильних магнітних полях.[7]

В наш час ARC – фільтри використовуються на частотах від 0 до приблизно 500 кГц і верхня границя має тенденцію до зростання, що обумовлено появою швидкодіючих ОП. [8]

Застосування ARC – фільтрів в радіоапаратурі поки що обмежене трактами звукової частоти а саме: в стереодекодерах, в фільтрах надтональних частот декодерів, в коректорах передпідсилювачів магнітного звукознімача, в фільтрах обмежувачах діапазону відтворюваних частот, блоках регулювання тембру, тощо. [9]

В даній бакалаврській роботі досліджується аналоговий RC-фільтр низьких частот, що може використовуватись в найрізноманітнішій радіотехнічній апаратурі.

1.3 Характеристики фільтрів звукових частот і вимоги до них

Фільтр нижніх частот представляє собою пристрій, що пропускає сигнали низьких частот і придушує сигнали високих частот. На рисунку 1.1 зображені ідеальна й реальна амплітудно-частотні характеристики. Отже, функція фільтрів нижніх частот Батерворта буде містити наступні співмножники другого порядку:

$$H = \frac{V_2}{V_1} = \frac{P(s)}{s^2 + Bs + C}, \quad (1.1)$$

де $P(s)$ – поліном другого порядку; B і C - являють собою наведені в додатку А [10] нормовані коефіцієнти ланки фільтра нижніх частот другого порядку.

Фільтр нижніх частот Батерворта має монотонну характеристику, подібну до характеристики на рисунку 1.1. Для ілюстрації цього випадку на рисунку 1.2 наведена характеристика реального фільтра нижніх частот Батерворта шостого порядку.

Коефіцієнт підсилення фільтра нижніх частот представляє собою значення його передаточної функції при $S=0$.

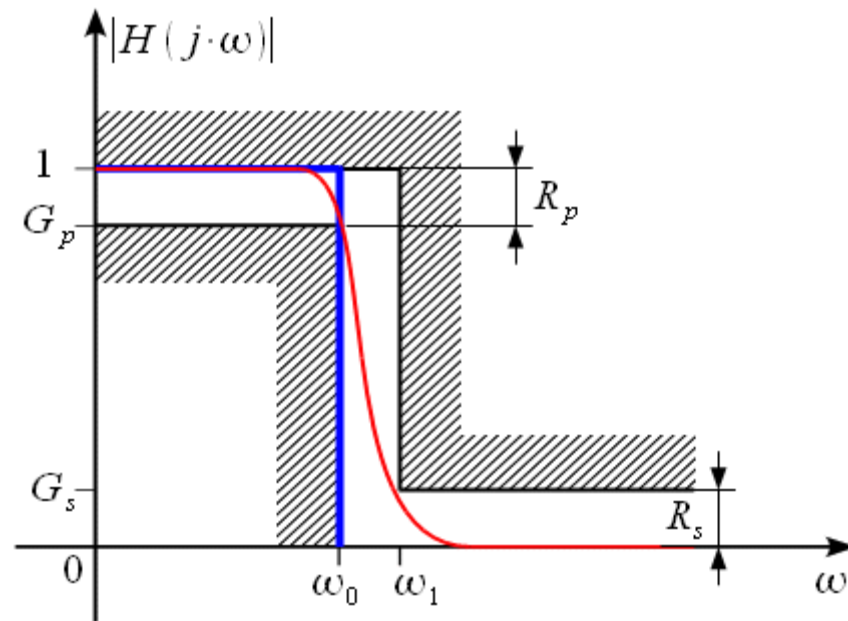


Рисунок 1.1 - Ідеальна й реальна амплітудно-частотні характеристики фільтра нижніх частот

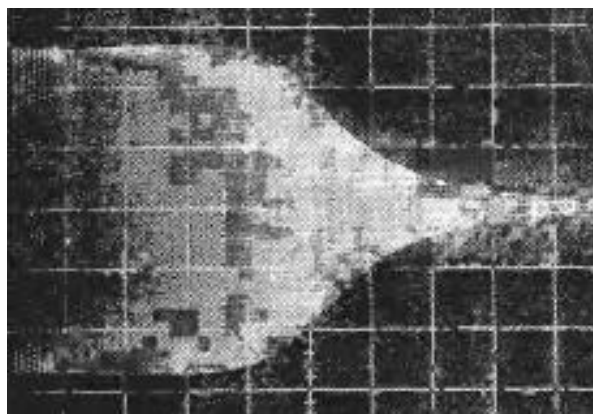


Рисунок 1.2 - Амплітудно-частотна характеристика реального фільтра Батерворта

Якщо при проектуванні крутість наростання загасання, особливо в районі частоти зрізу, є більш важливим параметром, чим прямолінійність характеристики в смузі пропускання, то часто використовується фільтр із характеристикою Чебишева. Фільтр Чебишева характеризується зростаючою тривалістю перехідного процесу при впливі на нього сходинкового сигналу й проектується із заздалегідь певним розмахом коливань коефіцієнта передачі (тобто рівнохвильовим) у смузі пропускання, наприклад від 0,01 до 3 дБ. Відсутність гладкої характеристики в смузі пропускання дасть певні переваги, а саме забезпечується висока швидкість наростання загасання поблизу краю смуги пропускання. За винятком діапазону частот, поблизу смуги пропускання характеристична крива поза нею йде паралельно кривій характеристики фільтра Батерворта еквівалентного порядку.

Як фільтри Батерворта, так і фільтри Чебишева нижніх частот забезпечують нескінченне загасання тільки на нескінченній частоті, тобто всі нулі передачі розташовані в нескінченності. На будь-якій іншій частоті деякі сигнали будуть проходити через фільтр, тобто навіть у смузі затримування. Якщо ж на певній частоті в смузі затримування вимагається нескінченне придушення, то можна використовувати характеристику інверсного фільтра Чебишева. У смузі пропускання коливання коефіцієнта передачі відсутні, але вони існують у смузі затримування, і загасання на певних частотах (так званих полюсах загасання) стає нескінченним.

Знаючи величини, ми можемо легко визначити порядок фільтра. Порядок ФНЧ визначається виразом (1.2)

$$n \geq \frac{\lg \left[(10^{0,1A_{\min}} - 1) / (10^{0,1A_{\max}} - 1) \right]}{2 \lg w_{zm}}. \quad (1.2)$$

Оскільки проектування фільтрів здійснюється за умов ідеалізації властивостей існуючої елементної бази, то виникають відхилення характеристик фільтра від запланованих. Тому при проектуванні фільтра

використовують метод „перед спотворень” [9] тобто до фільтра висувають більш жорсткі вимоги порівняно з заданими в технічному завданні, обов’язкова настройка фільтра з метою отримання заданої смуги пропускання.

1.4 Каскадне проектування активних фільтрів

У вступі вказано причини вибору каскадного підходу до проектування фільтрів, а в цьому підрозділі ми розкриваємо його суть.

Перший етап каскадного методу полягає у вираженні передатної функції фільтра n -го порядку як добутку передаточних функцій нижчого порядку, зазвичай не вище третього порядку.

$$H(p) = H_1(P) \cdot H_2(P) \cdot \dots \cdot H_m(P), \quad (1.3)$$

де $m=n/2$, якщо n парне, то всі мають другий порядок, якщо n непарне, але одне з них має перший порядок.

Реалізація передавальної функції $H(P)$ згідно з виразом (1.3) здійснюється за схемою, наведеною на рис. 1.3, за відсутності взаємного впливу між ступенями, що є ОР попередніх ступенів, що забезпечується низькою вихідний опір.

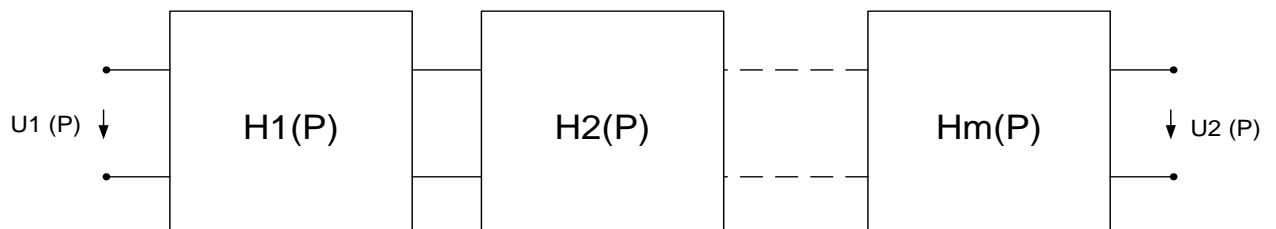


Рисунок 1.3 - Каскадне з’єднання ланок фільтра

Для ланок першого порядку передаточна функція має вигляд [16].

$$H(P) = \frac{M(P)}{P + \omega_p}, \quad (1.4)$$

де ω_p – це є полюс передаточної характеристики;

$M(P)$ – це є поліном нульового або першого порядку.

Для каскадів другого порядку

$$H(P) = \frac{N(P)}{P^2 + \frac{\omega_p}{q_p} P + \omega_p^2}, \quad (1.5)$$

де ω_p - це є частота полюсу;

q_p - це є добротність полюсу;

$M(P)$ - це є поліном другого або меншого порядку.

У таблиці 1.1. Також наведено поліноміальні вирази для фільтрів НЧ, ВЧ і НЧ без послаблюючих стрибків у контурі затримки [1], де H_0 і H_∞ – коефіцієнти пропускання.

Таблиця 1.1 - Поліноміальні вирази різних типів фільтрів на нульовій і нескінченній частотах і - на полюсних частотах

Тип фільтра	$M(P)$	$N(P)$
ФНЧ	$H_0 \omega_p$	$H_0 \omega_p^2 p$
ФВЧ	$H_\infty p$	$H_\infty p^2$
СФ	-	$H_p \frac{\omega_p}{q_p} p$

На рис.1.4 і рис.1.5 показані типові фільтри низьких частот, які найбільш широко використовуються при проектуванні фільтрів каскадним методом. Під кожною схемою наведені коефіцієнти, що визначають основні

параметри ФНЧ (частоту полюсу ω_p ; добротність полюсу q_p ; коефіцієнт передачі на нульовій частоті H_0).

Передатна функція обох схем ФНЧ однакова і визначається рівнянням

$$H(p) = \frac{H_0 \omega_p^2 p}{p^2 + \frac{\omega_p}{q_p} p + \omega_p^2 p} \quad (1.6)$$

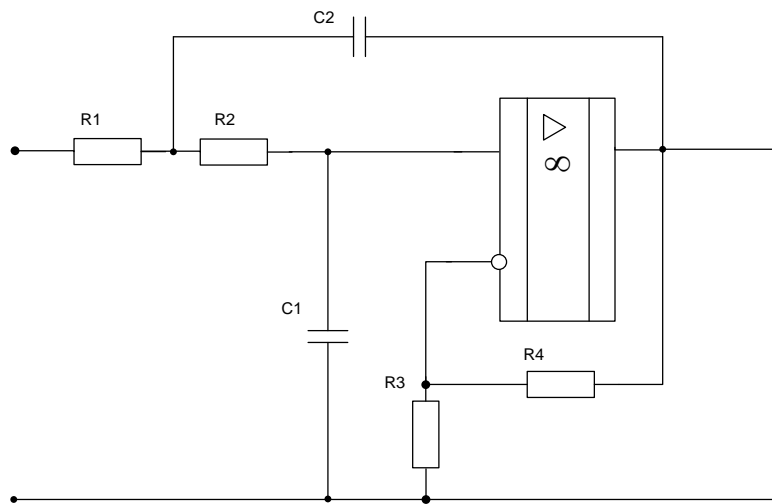


Рисунок 1.4 - Схема ФНЧ на ОП з обмеженим коефіцієнтом підсилення

$$\omega_p^2 = 1/R_1 C_1 R_2 C_2, \quad (1.7)$$

$$q_p = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} / \left(1 + \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4 C_2}{R_3 C_1} \right) \quad (1.8)$$

$$H_0 = 1 + R_4/R_3. \quad (1.9)$$

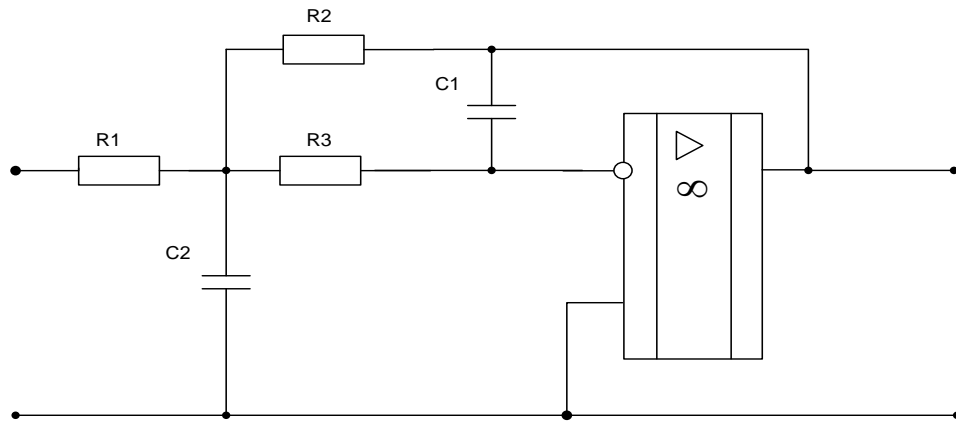


Рисунок 1.5 - Схема ФНЧ з багатопетльовим зворотнім зв'язком

$$\omega_p^2 = 1/C_1 R_2 C_2 R_3 \quad (1.10)$$

$$q_p = \sqrt{\frac{C_2 R_3}{C_1 R_3}} \left/ \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} \right) \right. \quad (1.11)$$

$$H_0 = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (1.12)$$

Співвідношення, які наведені під кожною зі схем, були отримані в припущенні ідеального ОП, що має нескінченно великий вхідний опір ($R_{вх} \rightarrow \infty$), нескінченно малий вихідний опір ($R_{вих} = 0$) і нескінченно великий диференціальний коефіцієнт підсилення $K_0 \rightarrow \infty$. Оскільки реальні ОП мають обмежені $R_{вих}$, K_0 і відмінний від нуля вхідний опір, дане співвідношення є приблизно надійним лише за умови виконання умов реалізації. Для схеми, зображеної на рис. 1.4, умови реалізації задокументовані [17].

$$R_1 + R_2 \ll R_{вх}, \quad \frac{1}{\omega_{зр} C_2} \ll R_{вх}, \quad \frac{1}{\omega_{зр} C_1} \gg R_{вих}. \quad (1.13)$$

Для схеми, що зображена на рисунку 1.5 умови реалізації записуються по-іншому, а саме:

$$R_2 \gg R_{вих}, \frac{1}{\omega_{зр} C_1} \gg R_{вих}, R_1 + R_3 \ll R_{вих}. \quad (1.14)$$

Ознаки неоднакових умов виконання означають, що більша величина повинна перевищувати меншу не менше ніж у десять разів.

Крім того, для обох схем фільтра низьких частот коефіцієнт підсилення ОП із зворотним зв'язком у розімкнутому контурі повинен у 50 разів перевищувати значення частотної характеристики на частоті зрізу.

1.5 Чутливість характеристик і параметрів фільтра до змін параметрів компонентів

При проектуванні будь-якої технічної системи важливо розуміти, як відхилення параметрів елемента від розрахункових параметрів змінюють характеристики та параметри системи порівняно з проектними параметрами.

Відхилення параметрів елементів відбувається за різних причин: через існуючі допуски на параметри елементів, внаслідок зміни температури, вологості, а інколи, тиску оточуючого середовища і старіння. Відхилення робочих характеристик фільтра від проектних викликані зміною параметрів, прийнято оцінювати чутливістю. [18]

Чутливість характеристики або параметра фільтра до змін параметрів компонента визначається виразом

$$S_x^y = \frac{x}{y} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x}, \quad (1.15)$$

де x - параметри опорів, ємностей, коефіцієнт підсилення ОП тощо;

y - передатна характеристика фільтра, його АЧХ, добротність, частота полюсу і т.д.

Якщо характеристики або параметри фільтра складні, чутливість також складна

$$S_x^y = S_x^{|y|} + j \arg y \cdot S_x^{\arg y}, \quad (1.16)$$

де $S_x^{|y|}$ - чутливість модуля;

$S_x^{\arg y}$ - чутливість аргументу.

Таким чином, зручніше оцінювати реальні значення чутливості при роботі з блоками або параметрами, реальними або уявними частинами комплексних значень.

Оскільки характеристики і параметри фільтра залежать від багатьох компонентів, для оцінки зміни параметрів багатьох компонентів при їх одночасній зміні використовується поняття багатопараметричної чутливості, що визначається виразом (1.17) для найгіршого випадку [19]

$$S_{\Sigma}^y = \sum_i |S_{x_i}^y|, \quad (1.17)$$

де додавання виконується для всіх елементів. Відносні характеристики або параметри фільтра, викликані варіацією багатьох елементів, визначаються формулою (1.18)

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \sum_i S_{x_i}^y \frac{\Delta x_i}{x_i} \leq \sum_i |S_{x_i}^y| \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right|. \quad (1.18)$$

Якщо відносна зміна параметрів компонента не перевищує певного значення, тобто $|\Delta x_i|/x_i \leq h$, тоді відносна зміна характеристик фільтра в гіршому випадку задовольняє умову (1.19).

$$\frac{\Delta y}{y} \leq h \sum_i |S_{x_i}^y| = h * S_{\Sigma}^y. \quad (1.19)$$

Оцінки відносної зміни характеристик фільтра для найгіршого випадку (1.18) здебільшого є занадто високими та надто вимогливими до допусків компонентів та їх стабільності. Тому в багатьох випадках використовується статистична чутливість параметрів, яка враховує ймовірність відхилення

параметрів елемента від оптимального значення на певну величину [19]. Статистична багатопараметрична чутливість визначається виразом (1.20) (критерій Скофлера).

$$S_k^y = \sqrt{\sum_i (S_{x_i}^y)^2} \quad (1.20)$$

При досить великій кількості фільтруючих елементів і статистично незалежних відхиленнях їх параметрів розподіл відносних відхилень характеристик фільтра наближається до нормального розподілу з нульовою дисперсією.

$$\sigma_{\Delta y/y}^2 = \sum_i (S_{x_i}^y)^2 \sigma_{\Delta x_i/x_i}^2, \quad (1.21)$$

де $\sigma_{\Delta x_i/x_i}^2$ - дисперсія і-го елемента, що для нормального закону розподілу становить $h_i^2/9$ (h_i - допуск на елемент).

Якщо допуск і розподіл усіх елементів однакові, то

$$\sigma_{\Delta y/y} = \sigma_{\Delta x/x} \sqrt{\sum_i (S_{x_i}^y)^2} = \sigma_{\Delta x/x} * S_{\Sigma}^y. \quad (1.22)$$

З властивостей закону регуляризації видно, що в 68% випадків відхилення характеристики фільтра буде в межах $\pm \sigma_{\Delta y/y}$, в 95% випадків - в межах $\pm 2\sigma_{\Delta y/y}$, а в 99,7% випадків – в межах $\pm 3\sigma_{\Delta y/y}$.

Хоча статистична багатопараметрична чутливість знижує вимоги до допусків компонентів, вона не забезпечує 100% гарантії, що характеристики фільтра не перевищуватимуть дозволені межі.

2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

2.1 Основні відомості та визначення

Підсилювачі, які мають вибіркові властивості, умовно поділяють на фільтри низьких та високих частот, а також смугові та режекторні. Фільтри низьких та високих частот відповідно пропускають тільки низькі або тільки високі частоти, а смугові та режекторні забезпечують пропускання або придушення сигналів визначеної смуги частот.

Для отримання у підсилювачах вибіркових властивостей в діапазоні низьких частот (менше 20 кГц) використовують RC – кола інтегрувального або диференціувального типу. Вони включаються на вході або на виході підсилювача і охоплюють його частотно – залежним зворотним зв'язком.

В області високих частот в як фільтри низьких частот широко використовуються високочастотні дроселі, а смугові та режекторні фільтри реалізують на основі котушок індуктивності та конденсаторів (LC – фільтри).

Для окремих випадків використовують електромеханічні фільтри, які відносяться до смугових та мають резонансну частоту, яка дорівнює частоті механічних коливань системи. Добротність таких фільтрів висока (сотні – тисячі одиниць), але перенастроювання частоти є досить складною задачею. Тому електромеханічні фільтри в основному використовують в техніці зв'язку або радіомовленні, де стандартами визначені робочі частоти та піддіпазони.

Під активними фільтрами розуміють електронні підсилювачі, які складаються з RC – кіл, включених таким чином, що у підсилювача з'являються вибіркові властивості. При їх використанні можна обійтись без громіздких, дорогих та нетехнологічних котушок індуктивності та створити низькочастотні фільтри в мікроелектронному виконанні, для яких основні параметри можуть бути змінені за допомогою навісних резисторів та конденсаторів.

2.2 Активні фільтри на операційних підсилювачах

Найпростіші активні фільтри високих та низьких частот наведені на рис.2.1, а, в. В них конденсатор, який визначає форму частотної характеристики, включений в коло зворотного зв'язку.

Для фільтра високих частот, який часто використовується в якості диференціувального пристрою, передаточна функція визначається співвідношенням

$$K(j\omega) = \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{j\omega C_1 R_1}{1 + j\omega C_1 R_1}. \quad (2.1)$$

Перейшовши до операторного запису, отримаємо:

$$K(p) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{p\tau_1}{1 + p\tau_1}, \quad (2.2)$$

де $\tau_1 = R_1 C_1$ – стала часу активного фільтра високих частот.

Логарифмічна АЧХ такого фільтра наведена на рис.2.1, б. Частоту спрягнення асимптот ω_1 знаходять з умови $\omega_1 \tau_1 = 1$, звідки

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}.$$

Для фільтра низьких частот (рис.2.1, в) аналогічно розглянутому маємо

$$K(j\omega) = -\frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \frac{1}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_2}, \quad (2.3)$$

або в операторній формі

$$K(p) = -\frac{R_2}{R_1(1 + p\tau_2)}, \quad (2.4)$$

де $\tau_2 = R_2 C_2$ – стала часу активного фільтра низьких частот.

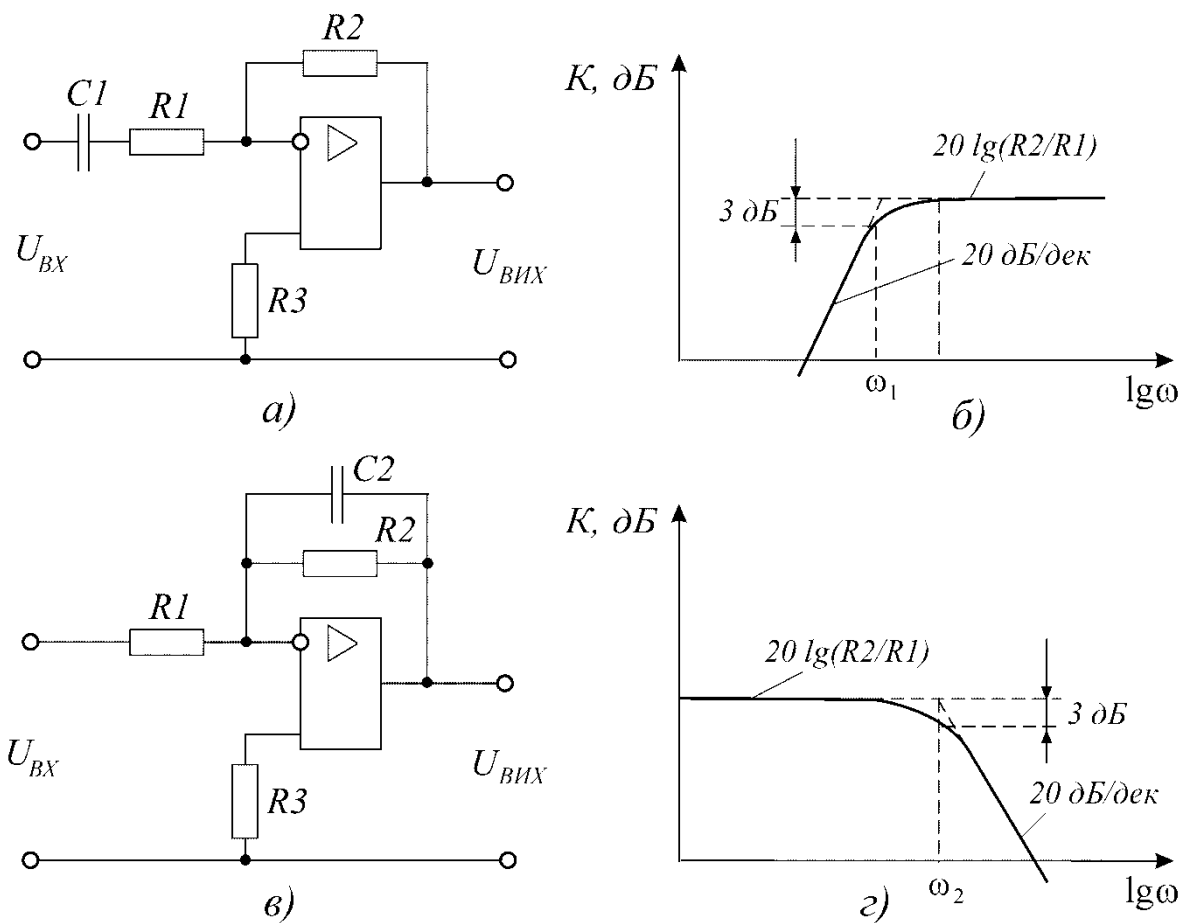


Рисунок 2.1 – Активні фільтри: а – високих частот; б – його ЛАЧХ; в – низьких частот; г – його ЛАЧХ

Логарифмічна АЧХ фільтра низьких частот наведена на рис.2.1, г. Тому, що на частоті спрягнення асимптот виконується умова $\omega_2 \tau_2 = 1$, то частота спрягнення дорівнює $f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$.

Передатні функції наведених найпростіших фільтрів є рівняннями першого порядку, а тому такі фільтри мають назву фільтрів першого порядку. Коефіцієнт підсилення у них зменшується з частотою на 20 dB/дек .

При об'єднанні фільтрів низьких та високих частот (рис.2.1, а, в) отримуємо смуговий фільтр (рис.2.2, а) з логарифмічною АЧХ типу (рис.2.2, б).

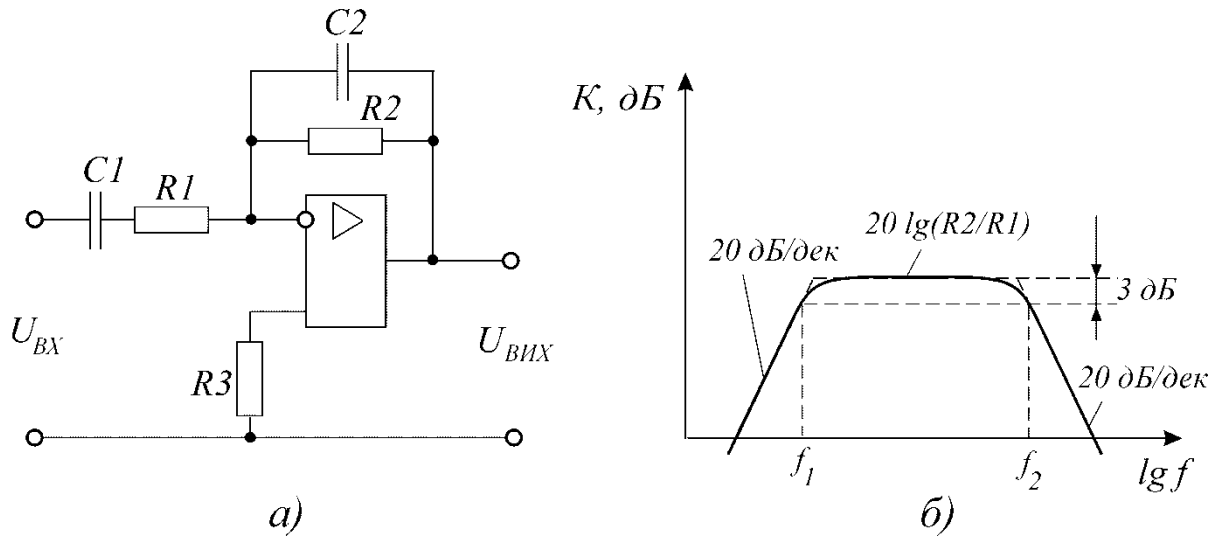


Рисунок 2.2 – Схема найпростішого активного смугового фільтра (а) та його ЛАЧХ (б)

Прості активні фільтри мають малу крутизну спаду ЛАЧХ, що вказує на погані вибіркові властивості. Для покращання вибірковості потрібно збільшувати порядок передаточних функцій за рахунок введення додаткових RC-кіл або послідовного включення ідентичних активних фільтрів. На практиці найбільш часто використовують ОП з колами ЗЗ, робота яких описується рівняннями другого порядку. При необхідності підвищити вибірковість системи окремі фільтри другого порядку включають послідовно.

Схеми активних фільтрів низьких, високих частот та смуговий фільтр другого порядку наведені на рис.2.3, а, б, в. У таких фільтрів при відповідному підборі номіналів резисторів та конденсаторів нахил асимптот дорівнює 40 дБ/дек . При цьому, як видно з рис.2.3, а, б, перехід від фільтра низьких частот до фільтра високих частот реалізується заміною резисторів на відповідні конденсатори та навпаки. В смуговому фільтрі є елементи фільтрів як низьких, так і високих частот. Передаточні функції таких фільтрів визначаються наступними співвідношеннями:

$$K_{нч}(p) = \frac{1}{\frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1 R_2}{R_3} C_2 p + (R_1 + R_2) C_1 p + R_1 R_2 C_1 C_2 p^2}; \quad (2.5)$$

$$K_{вч}(p) = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2}{1 + R_1 (C_1 + C_2 + C_3) p + R_1 R_2 C_1 C_3 p^2}; \quad (2.6)$$

$$K_{см}(p) = \frac{\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C_1 p}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2) p + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2} C_1 C_2 p^2}. \quad (2.7)$$

Для смугового фільтра, наведеного на рис.2.3, в, резонансна частота

$$\omega_o = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}. \quad (2.8)$$

Для фільтрів низьких та високих частот частоти, які характеризують “початок” зрізу або його закінчення (частоти зрізу), відповідно дорівнюють:

$$\omega_{зр.нч} = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}; \quad (2.9)$$

$$\omega_{зр.вч} = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \omega_{зр.нч} \sqrt{\frac{R_3}{R_1}}. \quad (2.10)$$

Вигляд частотних характеристик активних фільтрів залежить від параметрів RC-елементів. Вони можуть монотонно зменшувати свої значення при збільшенні частоти, монотонно збільшувати свої значення при збільшенні частоти або мати немонотонний вигляд та підйом поблизу частоти ω_o .

Як правило, смугові фільтри другого порядку реалізуються за допомогою мостових схем. Найпоширенішими є двотавровий міст (рис. 2.4, а), який «не пропускає» сигнал на резонансній частоті, і міст Віна (рис. 2.4, б), який має найбільший коефіцієнт пропускання на резонансній частоті.

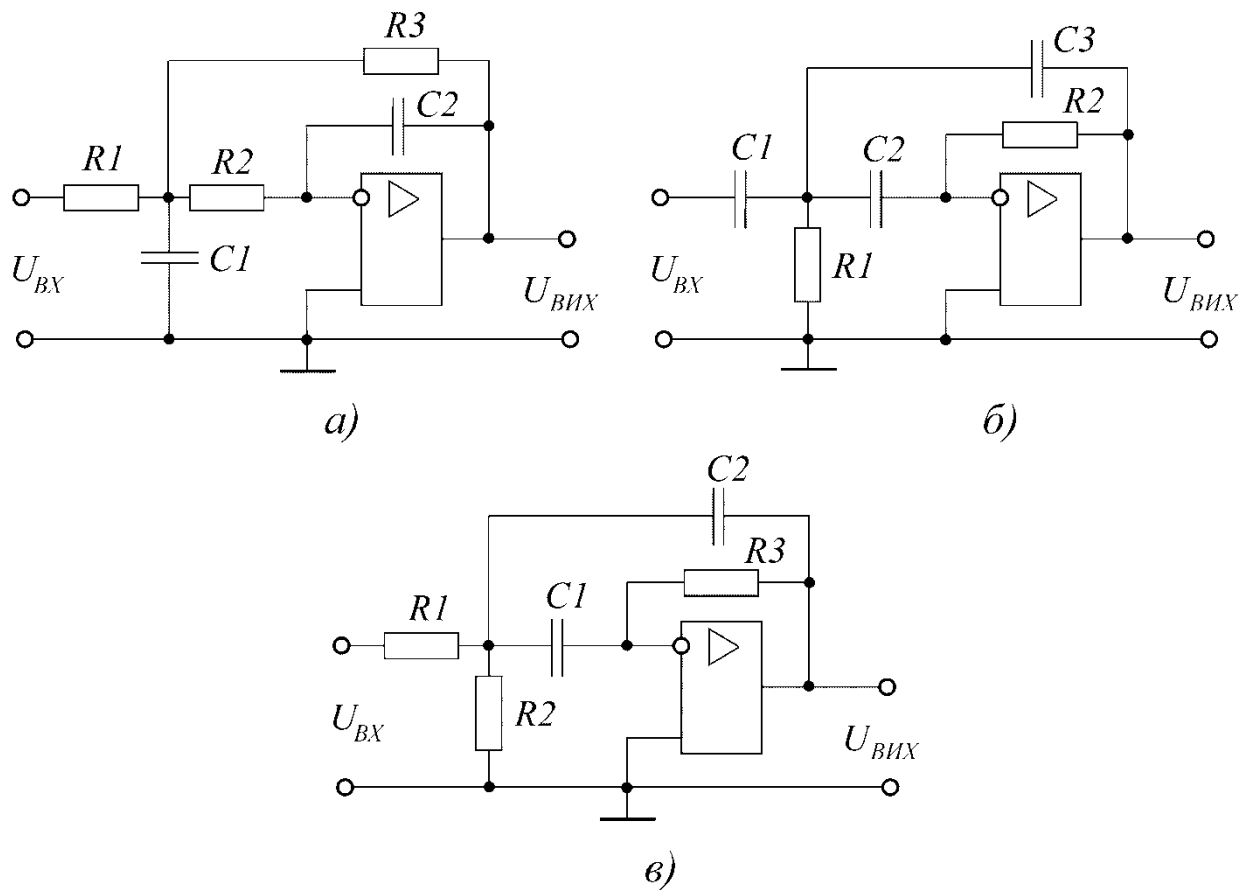


Рисунок 2.3 – Активні фільтри другого порядку: а – низьких частот;
 б – високих частот; в – смуговий

Мостові схеми включають схеми негативного зворотного зв'язку та схеми позитивного зворотного зв'язку. У випадку подвійного Т-образного моста глибина негативного зворотного зв'язку найменша на резонансній частоті. Коефіцієнт підсилення на цій частоті має максимальне значення. При використанні моста Віна на резонансній частоті ми отримаємо найбільшу глибину позитивного зворотного зв'язку і найбільше посилення. У той же час, щоб зберегти стабільність, глибину негативного зворотного зв'язку (визначається резисторами $R1$ і $R2$) слід трохи відкоригувати. Такий активний фільтр може мати еквівалент $Q=2000$, якщо позитивний і негативний коефіцієнти зворотного зв'язку близькі.

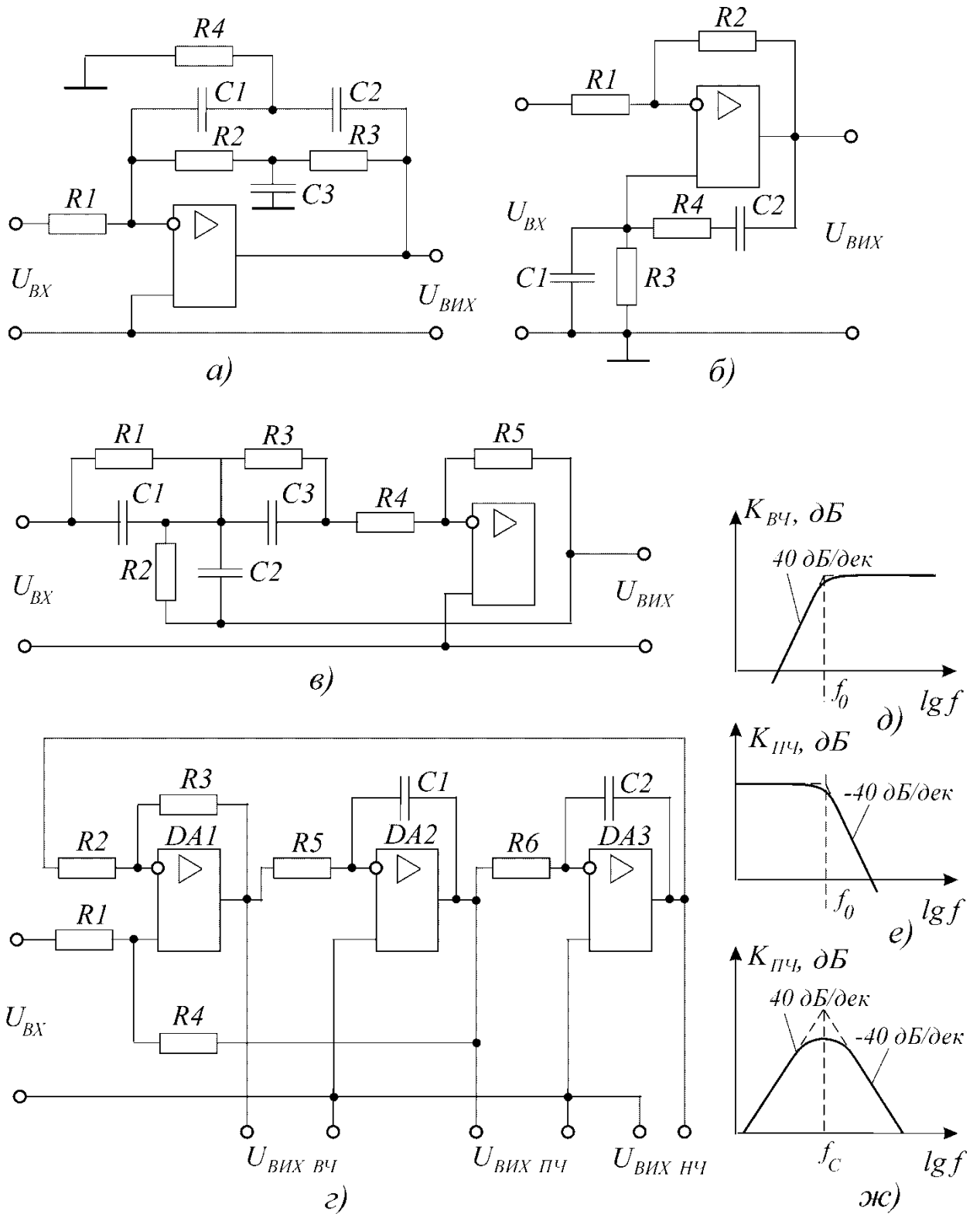


Рисунок 2.4 – Активні смугові фільтри: (а) з подвійним Т – подібним мостом; (б) з мостом Віна; (в) режекторний фільтр; (г) складний активний фільтр та його ЛАЧХ при зніманні сигналу з ВЧ виходу (д), з НЧ виходу (е) та СФ виходу (ж)

Резонансну частоту подвійного Т-подібного моста при $R_2 = R_3 = 0.5R_4 = R$ та $C_1 = C_2 = 2C_3 = C$ і моста Віна при $R_3 = R_4 = R$ та $C_1 = C_2 = C$ вибирають виходячи з умови стійкості, тобто $\frac{R_1 + R_2}{R_1} < 3$, тому що коефіцієнт передачі моста Віна на частоті ω_o дорівнює $1/3$.

Для реалізації режекторного фільтра подвійний Т-подібний міст можна підключити таким чином, як показано на рис.2.4, в, або в коло від'ємного зворотного зв'язку включити міст Віна.

Якщо активний фільтр потрібно перестроювати в широких межах, то краще використовувати міст Віна, у якого резистори R_3 та R_4 виконують у вигляді подвійного змінного резистора.

Об'єднання кількох активних фільтрів нижчого порядку в одну замкнуту систему стало широко використовуватися з випуском кількох ОР в одному корпусі. Приклад будови такого фільтра наведено на рис. 2.4, д. Він містить суматор на ОР DA1 і два фільтри низьких частот першого порядку на ОР DA2 і DA3. Суматори і активні фільтри підключаються послідовно. Якщо ω_o , то спряжена частота визначається як

$$f_o = \frac{1}{2\pi C_1 R_5} = \frac{1}{2\pi C_2 R_6}.$$

Нахил асимптоти становить 40 дБ/дек (рисунок 2.4, г, д, ж). У такому складному фільтрі можуть бути одночасно реалізовані фільтри нижніх і високих частот, а також смуговий фільтр, відносно нечутливий до відхилень параметрів окремих компонентів, що дуже важливо при практичному застосуванні селективних пристроїв. реалізувати. Структура, близька до розглянутої, використовується в мікросхемі 284СС2.

Крім розглянутих активних фільтрів, в електронних системах використовуються також фазові фільтри. Вони мають коефіцієнт передачі, який не залежить від частоти і пропорційний зсуву фази вихідного сигналу. Фазозсувний пристрій можна використовувати як фазовий фільтр. Його

найважливішим параметром є час групової затримки, який розуміється як інтервал часу, протягом якого сигнал затримується фазовим фільтром:

$$t_3 = -\frac{d\varphi}{d\omega}.$$

Час групової затримки змінюється з частотою сигналу і залежить від порядку рівнянь, які характеризують математичну модель фільтра.

2.3 Методика розрахунку активного ФНЧ другого порядку

Розглянемо методику розрахунку параметрів елементів схеми активного ФНЧ другого порядку на основі операційного К1401УД1 (рис.2.5), якщо частота зрізу $f_{зр} = 125$ Гц та коефіцієнт передачі фільтра $K = 2.15$.

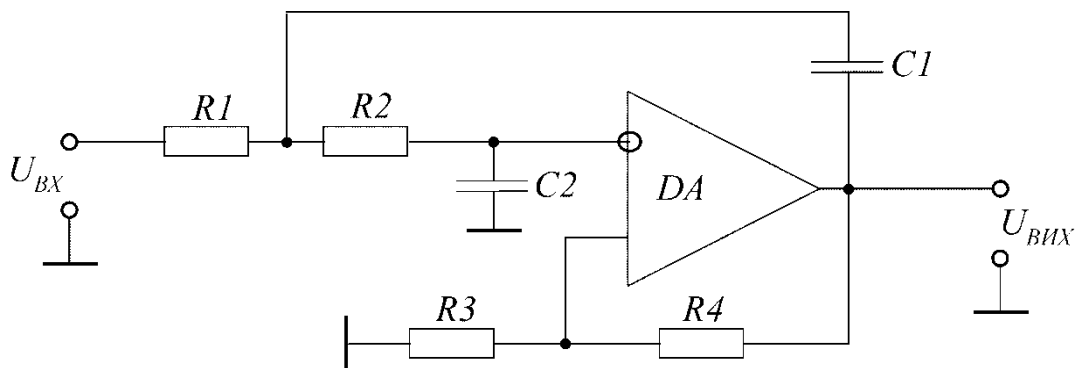


Рисунок 2.5 – Електрична схема активного ФНЧ другого порядку з неінвертувальним підсилювачем

Для активного ФНЧ (рис.2.5) основні параметри визначаються:

– коефіцієнт передачі в смузі пропускання

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3};$$

– частота зрізу

$$\omega_{зр} = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}};$$

– коефіцієнт згашення фільтра

$$\alpha = 2 - \frac{R_4}{R_3} = 3 - K = 2 \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}.$$

Виберемо $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ кОм}$. Тоді інші елементи активного ФНЧ другого порядку будуть мати такі номінали:

$$R_4 = R_3(K - 1) = 10000 \cdot (2.15 - 1) = 11.5 \text{ кОм};$$

$$C_1 = \frac{2}{R_1 \alpha \omega_{зр}} = \frac{1}{\pi f_{зр} R_1 (3 - K)} = \frac{1}{\pi \cdot 125 \cdot 10000 \cdot (3 - 2.15)} = 300 \text{ нФ};$$

$$C_2 = \frac{\alpha}{2R_1 \omega_{зр}} = \frac{3 - K}{2R_1 \cdot 2\pi f_{зр}} = \frac{3 - K}{4\pi f_{зр} R_1} = \frac{3 - 2.15}{4\pi \cdot 125 \cdot 10000} = 54.1 \text{ нФ}.$$

Змінюючи параметр $\xi = \frac{R_4}{R_3}$ такого ФНЧ, можна формувати необхідну АЧХ.

2.4 Методика розрахунку активного ФВЧ другого порядку

Розглянемо методику розрахунку параметрів елементів схеми активного ФВЧ другого порядку на основі операційного підсилювача К1401УД1 (рис.2.6), якщо частота зрізу $f_{зр} = 720 \text{ Гц}$ та коефіцієнт передачі фільтра $K = 1,85$.

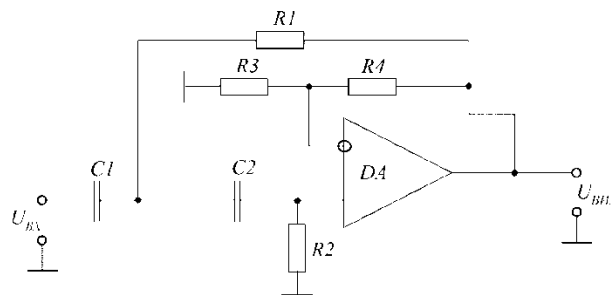


Рисунок 2.6 – Електрична схема активного ФВЧ другого порядку

Для активного ФВЧ основні параметри визначаються таким чином:

– коефіцієнт передачі в смузі пропускання

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_2};$$

– частота зрізу

$$\omega_{зр} = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}};$$

– коефіцієнт загасання фільтра

$$\alpha = 2 - \frac{R_4}{R_2} = 3 - K = 2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}.$$

Виберемо $R_3 = R_4 = 10 \text{ кОм}$, $C_1 = 20 \text{ нФ}$. Тоді інші елементи активного ФВЧ другого порядку будуть мати такі номінали:

$$R_2 = \frac{R_4}{K - 1} = \frac{10000}{1.85 - 1} = 11.76 \text{ кОм};$$

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{(3 - K)^2}{4} = 11760 \cdot \frac{(3 - 1.85)^2}{4} = 3.89 \text{ кОм}$$

$$C_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_{зр}^2 R_1 R_2 C_1} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 720^2 \cdot 3890 \cdot 11760 \cdot 20 \cdot 10^{-9}} = 53.5 \text{ нФ}.$$

Така схема фільтра використовується при побудові ФВЧ n-го порядку, тому що коефіцієнт затухання можна регулювати незалежно від регулювання смуги пропускання.

2.5 Методика розрахунку активного смугового фільтра

Далі розглядається методика розрахунку параметрів елементів схеми активного смугового фільтра багатоконтурного зворотного зв'язку на базі операційного підсилювача КР553УД1А (рисунок 2.7) При центральній частоті $f_0 = 25$ кГц коефіцієнт пропускання фільтра $K = 1,45$.

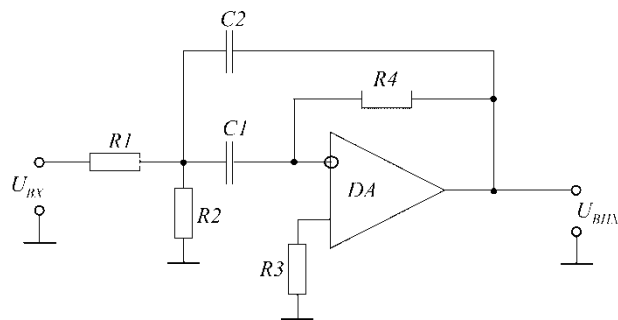


Рисунок 2.7 – Електрична схема активного смугового фільтра з багатоконтурним зворотним зв'язком

Для активного смугового фільтра основні параметри визначаються такими виразами:

– коефіцієнт передачі

$$K = -\frac{R_4}{R_1} \frac{C_1}{C_1 + C_2};$$

– центральна (резонансна) частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_4 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)};$$

– коефіцієнт згасання фільтра

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{R_4 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \times \left[\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right].$$

Регулювання затування в схемі відбувається за допомогою резистора R_2 , тому на практиці вибирають $R_1 \gg R_2$.

Виберемо $R_1 = R_3 = 10$ кОм, $C_1 = C_2 = 1$ нФ. Тоді інші елементи активного смугового фільтра з багатоконтурним зворотним зв'язком та коефіцієнт затування можна визначити таким чином:

$$R_4 = \frac{KR_1(C_1 + C_2)}{C_1} = 2KR_1 = 2 \cdot 1.45 \cdot 10 = 29 \text{ кОм};$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_1}{4\pi^2 f_0^2 R_1 R_4 C_1 C_2 - 1} = \\ &= \frac{10000}{4 \cdot \pi^2 \cdot 25000^2 \cdot 10000 \cdot 29000 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9} - 1} = 1626 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{1}{R_4 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} = 2 \sqrt{\frac{1}{29000 \cdot (10^{-4} + 1/1626)}} = 0.439.$$

Умова $R_1 \gg R_2$ виконується, тобто можна регулювати затування фільтра.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРА БАТТЕРВОРТА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

3.1 Вибір структурної схеми фільтра

Як згадувалося раніше, існують різні способи реалізації фільтрів в діапазоні низьких і наднизьких частот. Зокрема, найпоширенішим методом є активна RC фільтрація на основі операційних підсилювачів [1]. Роль підсилювача полягає в тому, щоб компенсувати втрати енергії в резистивній частині схеми для отримання складних полюсів, необхідних для досягнення операторських характеристик, необхідних фільтрами Баттерворта, Чебишева, Золотарьова-Кауера та іншими.

При каскадній реалізації фільтрів їх подають у вигляді каскадного з'єднання ФВЧ, внаслідок чого виникає структура показана на рисунку 3.1.

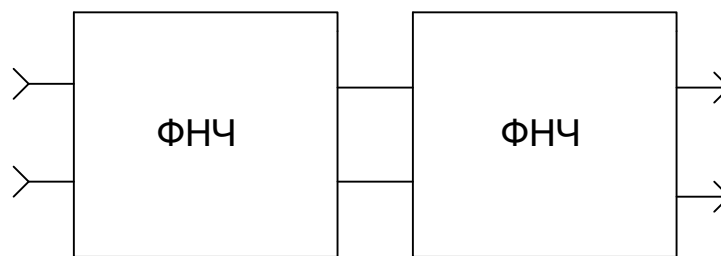


Рисунок 3.1- Каскадне з'єднання ФНЧ

Оскільки дана частота зрізу $f_{\zeta\omega} = 3,4$ кГц, $f_{\phi\omega} = 5$ кГц, отримаємо

$$w_{\phi\omega} = \frac{5,4}{3,4} = 1,588.$$

Тому порядок фільтра вираховуємо за виразом (1.2), де $n=7,468$. Беремо $n=8$ і реалізуємо каскадним з'єднанням на чотирьох ланках другого порядку. На рисунку 3.2 наведена структурна схема фільтра низьких частот, де усі ланки мають другий порядок.

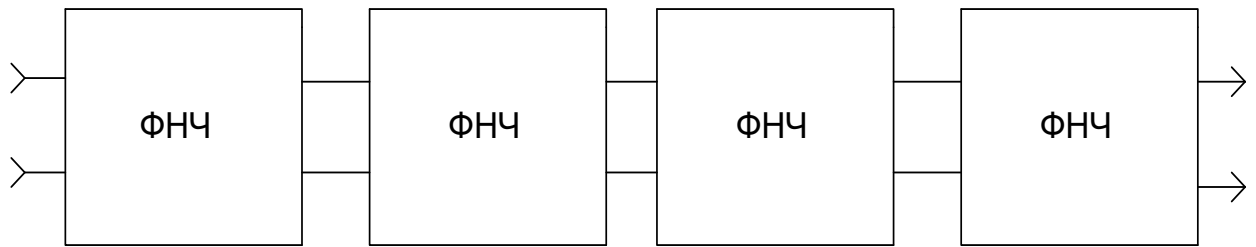


Рисунок 3.2 - Структурна схема фільтра Баттерворта

Визначення коефіцієнта підсилення каскадів RC-фільтра.

Коефіцієнт підсилення фільтра низьких частот, який дорівнює 8, можна багатьма способами розподілити між ланками. Його розподіл може здійснюватись за різними критеріями, зокрема за складністю розрахунків і схемної реалізації фільтра. Щоб покращити ці критерії потрібно коефіцієнт підсилення взяти однаковим для кожного каскаду і по можливості більшим одиниці. Спробуємо досягнути цього, виходячи з формули (3.1).

$$K_{ni} = \sqrt[n]{K_n}, \quad (3.1)$$

де K_{ni} -коефіцієнт підсилення i -того каскаду;

K_n -коефіцієнт підсилення всього фільтра.

3.2 Вибір електричної схеми каскадів фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах

Аналоговий RC-фільтр звукових частот, або фільтр Баттерворта низьких частот, що проектується є парного порядку ($n=8$), тому реалізуємо його каскадним з'єднанням чотирьох RC-фільтрів низької частоти другого порядку. В якості каскадів фільтрів низьких частот другого порядку оберемо каскад фільтра з нескінченним коефіцієнтом підсилення (на ДНКН) схема якого зображена на рисунку 3.3.

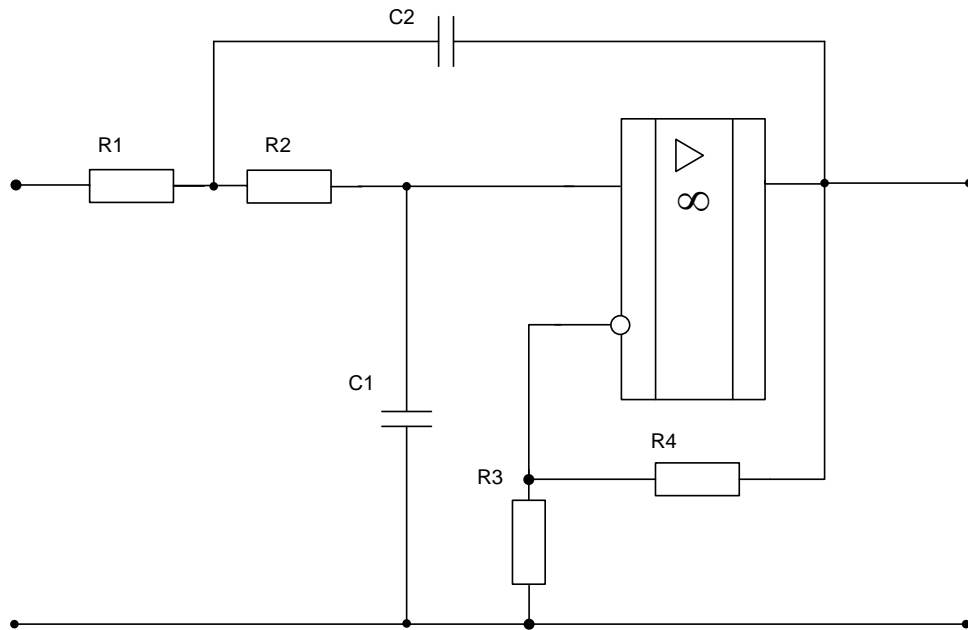


Рисунок 3.3 - Схема фільтра звукових частот на операційних підсилювачах

3.3 Розрахунок параметрів пасивних елементів фільтрів низьких частот другого порядку

Розрахувати схему фільтра Баттерворта низьких частот другого порядку з частотою зрізу f_z , коефіцієнтом підсилення K кожного каскаду, нерівномірністю частотної характеристики смуги пропускання, номінальним значенням конденсатора C_1 , таким же, як у розділі 1.3, ми починаємо з кожного етапу. Знаходимо нормалізовані значення коефіцієнтів нижніх частот B і C у відповідній таблиці.

Для першого каскаду коефіцієнти B і C рівні:

$$B=3,390181; C=1.$$

Оскільки збільшення кожного каскаду більше 1 ($K>1$), значення опорів наступних трьох каскадів можна отримати за формулою (3.2)

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{2}{\left[BC_2 + \sqrt{[B^2 + 4C(K-1)]C_2^2 - 4CC_1C_2} \right] \omega_3}, \\
 R_2 &= \frac{1}{\omega_3^2 CC_1C_2R_1}, \\
 R_3 &= \frac{K(R_1 + R_2)}{K-1}, \\
 R_4 &= K(R_1 + R_2)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$C_2 = \frac{10}{f_{зп}} = \frac{10}{3400} = 2941,176 \text{ (пФ)}$$

$$C_1 \leq [B^2 + 4C(K-1)]C_2 / 4C = \frac{14,213327 \cdot 0,0029411764}{4} = 10450,975 \text{ (нФ)}$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot 14 \cdot 3400 = 21352$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[3,390181 \cdot 0,002941176 + \sqrt{[3,390181^2 + 4 \cdot (1.68-1)] \cdot 0,002941176^2 - 4 \cdot 0,00076980324} \right] \cdot 21352} = 24021.793 \text{ (Ом)}$$

$$R_2 = \frac{1}{9424.777961 \cdot 24021.793 \cdot 21352^2} = 10061.051 \text{ (Ом)}$$

$$R_3 = \frac{1.68 \cdot (24021.793 + 10061.051)}{1.68 - 1} = 54887.049 \text{ (Ом)}$$

$$R_4 = 1.68 \cdot (24021.793 + 10061.051) = 42717.46 \text{ (Ом)}$$

Проведем перевірку

$$K_p = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$K_\delta = 1 + \frac{42717.46}{54887.049} = 1.68$$

$$K_p = K_n$$

Для другого каскаду коефіцієнти В і С рівні:

В=1,111140; С=1. При таких значеннях коефіцієнтів В і С опори будуть рівні наступним значенням

$$C_1 \leq [B^2 + 4C(K-1)]C_2 / 4C = \frac{1,23463209 + 0,00799999872}{4} = 31065,802 \text{ (нФ)}$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[1,111140 \cdot 31065,802 + \sqrt{[1,111140^2 + 4 \cdot 0,68] \cdot 31065,802^2 - 4 \cdot 31065,802}\right] \cdot 21352} = 17814,417 \text{ (Ом)}$$

$$R_2 = \frac{1}{9424,777961 \cdot 31065,802} = 8930,682 \text{ (Ом)}$$

$$R_3 = \frac{1,68(17814,417 + 8930,682)}{1,68 - 1} = 40703,905 \text{ (Ом)}$$

$$R_4 = 1,68(17814,417 + 8930,682) = 31679,012 \text{ (Ом)}$$

Проведемо перевірку:

$$K_p = 1 + \frac{R_4}{R_3},$$

$$K_p = 1 + \frac{31679,012}{40703,905} = 1,68$$

$$K_p = K_n$$

Для третього каскаду коефіцієнти В і С рівні: В=1,662939; С=1.

$$C_1 \leq [B^2 + 4C(K-1)]C_2 / 4C = \frac{2,76536611 + 0,00799999872}{4} = 69334,152 \text{ (нФ)}$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[1,662939 \cdot 69334,152 + \sqrt{[1,662939^2 + 2,72] \cdot 69334,152^2 - 0,011764704}\right] \cdot 21352} = 8857,353 \text{ (Ом)}$$

$$R_2 = \frac{1}{0,002941176 \cdot 8857,353} = 6334,353 \text{ (Ом)}$$

$$R_3 = \frac{1,68(8857,353 + 6334,353)}{1,68 - 1} = 20238,038 \text{ (Ом)}$$

$$R_4 = 1,68(8857,353 + 6334,353) = 15750,848 \text{ (Ом)}$$

Проведемо перевірку

$$K_p = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$K_\delta = 1 + \frac{15750,848}{20238,038} = 1.68$$

$$K_p = K_n$$

Для четвертого каскаду коефіцієнти В і С рівні: В=1,961571; С=1.

$$C_1 \leq [B^2 + 4C(K-1)]C_2 / 4C = \frac{3,84776078 + 0,00799999872}{4} = 98194,019 (n\Phi).$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[1,961571 \cdot 98194,019 + \sqrt{[1,961571^2 + 2,72] \cdot 98194,019^2 - 4 \cdot 98194,019 \cdot 0,002941176} \right] \cdot 21352} = 98507.532 (\text{Ом}).$$

$$R_2 = \frac{1}{98194,019 \cdot 0,002941176 \cdot 98507.532} = 7432,654 (\text{Ом}).$$

$$R_3 = \frac{1.68(98507.532 + 7432,654)}{1.68 - 1} = 37406.142 (\text{Ом}).$$

$$R_4 = 1.68(98507.532 + 7432,654) = 50786.329 (\text{Ом}).$$

Проведем перевірку

$$K_p = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$K_\delta = 1 + \frac{37406.142}{50786.329} = 1.68$$

Таблиця 3.2- Розрахункові значення параметрів елементів фільтра

Порядковий номер каскаду	Розрахункові значення елементів фільтра					
	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	С1 пФ	С2 пФ
Перший каскад (другого порядку)	10061,051	24021,793	54887,049	42717.46	10450,975	2941,176
Другий каскад (другого порядку)	8930,682	17814,417	40703,905	31679.012	31065,802	
Третій каскад (другого порядку)	6334,505	8857,353	20238,038	15750,848	69334,152	
Четвертий каскад (другого порядку)	98507.532	7432,654	37406.142	50786.329	98194,152	

Вибираємо номінальні значення опорів, найбільш близькі до обчислених для чотирьох каскадів фільтра і реалізуємо його відповідно до схем, що зображені на рисунку 3.1.

3.4 Вибір операційного підсилювача

Параметри компонентів фільтра визначаються для ідеального операційного підсилювача з нескінченним посиленням у нескінченному діапазоні частот, нескінченним вхідним і нульовим вихідним опором і нескінченною швидкістю наростання вихідної напруги. Властивості реального ОП значно поступаються властивостям ідеального ОП. Тому при виборі ОП мають бути дотримані деякі вимоги, які називаються умовами реалізації [17]. Умови реалізації, що стосуються зв'язку між параметрами елементів зв'язку фільтра та вхідним або вихідним опором ОП, задані співвідношенням (1.17) на рисунку 1.4, співвідношенням (1.18) на рисунку 1.5, співвідношенням (1.29) на рисунку 1.2 Наведіть 1.6 і (1.30) для рисунка 1.7. При остаточному виборі параметрів компонентів ланки враховувалися умови реалізації, при цьому вхідний і вихідний опори ОП були 1 МОм і 100 Ом відповідно.

На додаток до умов реалізації, які накладають певні обмеження на вхідний і вихідний опір ОП, його частота одиничного підсилення повинна задовольняти умову [22].

$$f_1 \geq f_{зр} H_0, \quad (3.3)$$

де H_0 - це є коефіцієнт підсилення каскаду;

f_1 - це є частота одиничного підсилення ОП;

$f_{зр_2}$ - це є частота зрізу фільтра.

Оскільки жоден із фільтрів низьких частот не має коефіцієнта посилення більше 2 і частоти $f_{зр} = 3400$ Гц, ОР повинен мати частоту одиничного посилення принаймні 6000 Гц.

Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача з відкритим контуром зворотного зв'язку має бути принаймні в 50 разів більшим за коефіцієнт підсилення в робочому режимі. Так як коефіцієнт посилення ланцюжка фільтрів не перевищує 2 при досить низькій граничній частоті = 3400 Гц, більшість сучасних ОП відповідають цій вимозі, в тому числі і Motorola LF 355B.

Також перевіримо виконання вимог щодо швидкості зростання вихідної напруги та її максимальної величини. Швидкість зростання вихідної напруги (В/мкс) без нелінійних спотворень повинна перевищувати

$$0.5\omega_{зр} \cdot 2 \cdot 10^{-6} U_{вих.макс} \cdot \left[\frac{B}{мкс} \right],$$

тобто

$$U_i > 0.5\omega_{зр} \cdot 2 \cdot 10^{-6} U_{вих.макс} \cdot$$

Для ОП motorola LF 355B $U_i = 2B/мкс$, $U_{вих.макс} = 12.5B$, а частота зрізу фільтра $f_{зр} = 3400$ Гц. Тому права частина нерівності складає, яка набагато менша за частину зліва. Таким чином, ОР motorola LF 355B відповідає вимогам компонентів підсилення фільтра.

Схема електрична принципова смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення наведена на рис. 3.4.

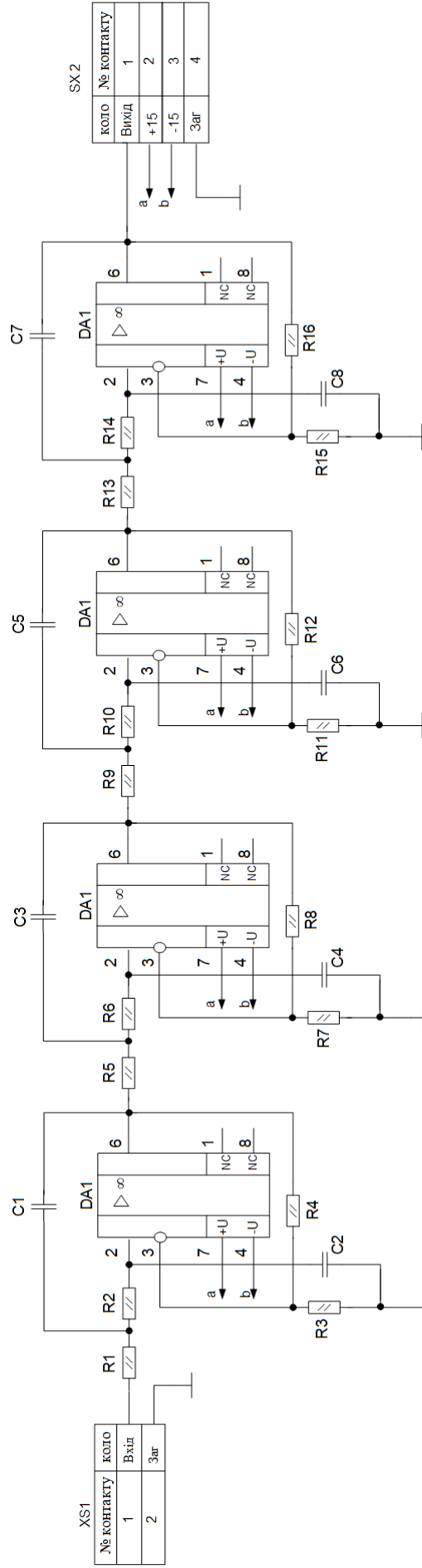


Рисунок 3.4 - Схема електрична принципова смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах

3.5 Моделювання електричної схеми фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах

Моделювання фільтра спрямоване на визначення амплітудно-частотної характеристики (ЧХ) і фазо-частотної характеристики (ФЧХ) фільтра шляхом розрахунку параметрів пасивних компонентів і ідеальних операційних підсилювачів (ОП) з конкретними ОП і номінальними значеннями Резистори і ємності значення, відповідно до їх порівняння. Для моделювання та креслення використовуйте програму Electronics Workbench.

Ви можете керувати поведінкою діаграми частотної характеристики для кожного посилення фільтра наступним чином. Обчисліть власну частоту та значення добротності шатуна другого порядку за формулами (3.4) і (3.5), результати наведено в таблиці 3.3.

$$\omega = \sqrt{C}, \quad (3.4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{C}}{B}, \quad (3.5)$$

де C і B - нормовані значення коефіцієнтів нижніх частот.

Таблиця 3.3 – Значення власної частоти і добротності ланок ФНЧ

B	C	W	Q
0,0914	0,9927	0,9963	10,899
0,2561	0,6535	0,8084	3,1559
0,3701	0,2305	0,4801	1,2969

Якщо власна Q ланцюга фільтра низьких частот більше 0,707, графік частотної характеристики має показувати викиди коефіцієнта пропускання, а якщо він менше 0,707, графік частотної характеристики буде монотонним (див. рис. 3.10). Зі значень, наведених у таблиці 3.1, ми бачимо, що

добротність усіх каскадів більше 0,707, тому можна зробити висновок, що частотна характеристика цих ланок матиме випромінювання.

Аналізуючи діаграми АЧХ, наведені на рисунках 3.5, 3.7, 3.9, можна зробити висновок, що висновок правильний, тобто гіпотеза підтверджується. Детальний аналіз графіка частотної характеристики всього фільтра (див. рисунок 3.11) також дає позитивні результати, як показано:

- 1) Частота пропускання має сім екстремумів коливань, кількість яких відповідає порядку фільтра;
- 2) При граничній частоті 3400 Гц при $\varepsilon=0,5088$ значення коефіцієнта посилення має дорівнювати:

$$K = \frac{K_{II}}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}}$$

$$K = \frac{10}{\sqrt{1 + 0,5088^2}} = 8,91$$

Це число можна побачити в таблиці на рис. 3.10 і воно відповідає координаті U1 на частоті, що відповідає координаті X1.

Проаналізувавши АЧХ схеми фільтра при фактичних ОП і номінальних значеннях пасивних компонентів, можна зробити висновок, що характеристики практично однакові. Схожість АЧХ обумовлена правильно підібраними резисторами і конденсаторами, а також якісним ОП зарубіжного виробництва Motorola LF 355B з характеристиками, які добре підходять для цього фільтра.

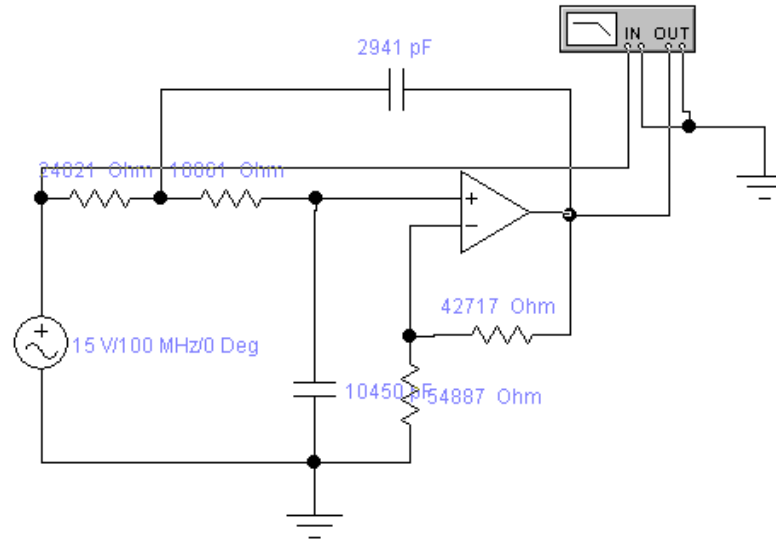


Рисунок 3.5 - Схема першого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

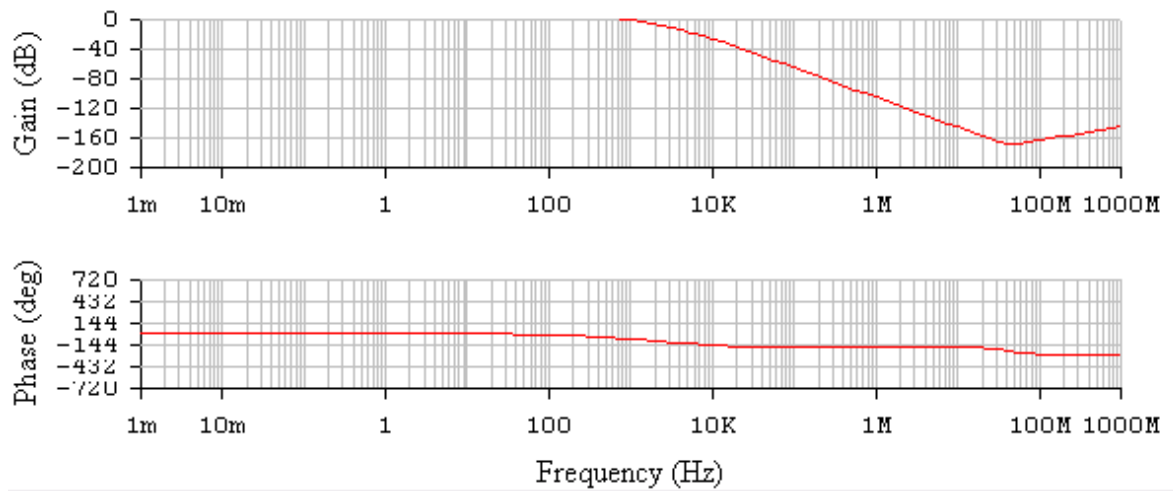


Рисунок 3.6 - АЧХ і ФЧХ першого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

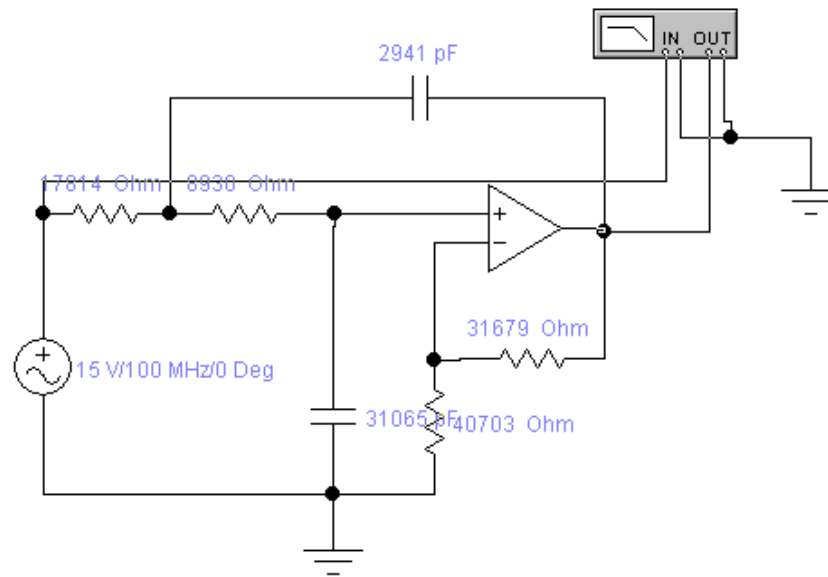


Рисунок 3.7 - Схема другого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

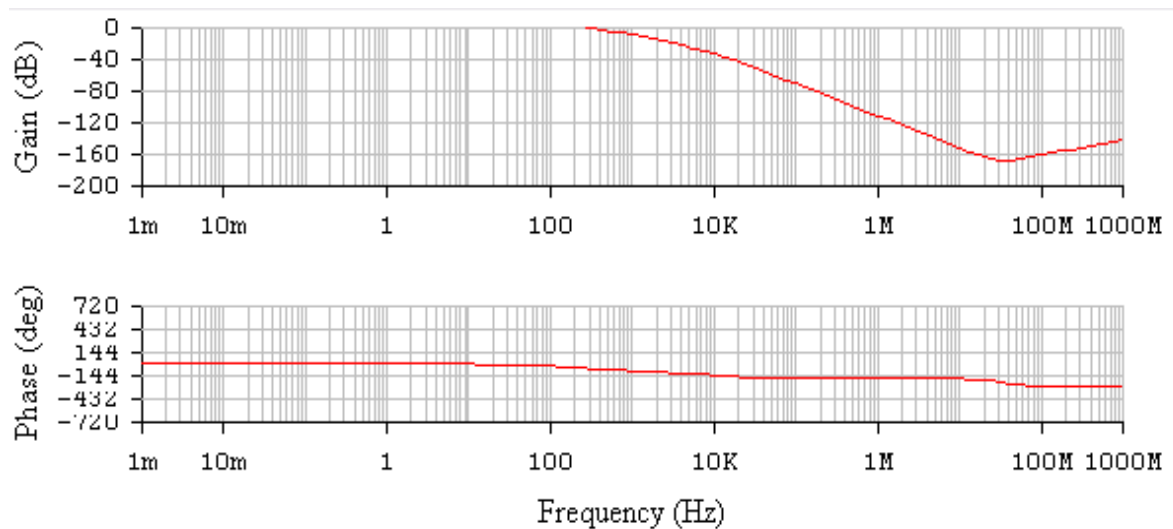


Рисунок 3.8 - АЧХ і ФЧХ другого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

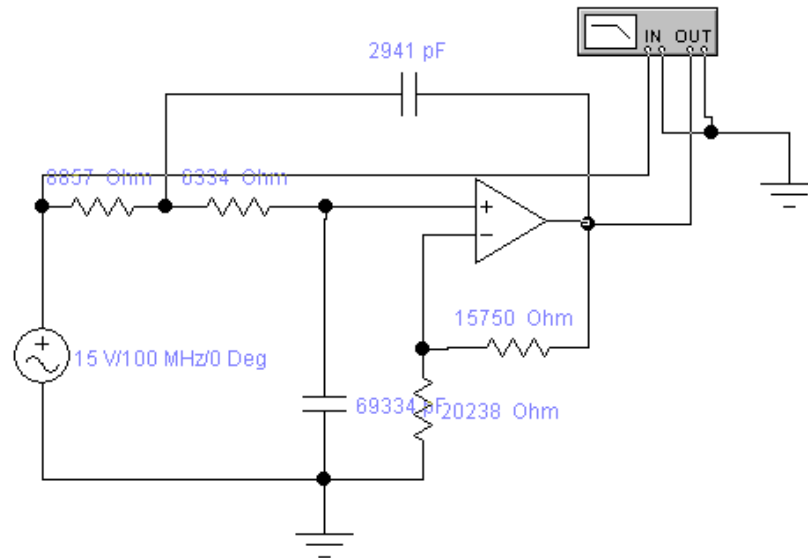


Рисунок 3.9 - Схема третього каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

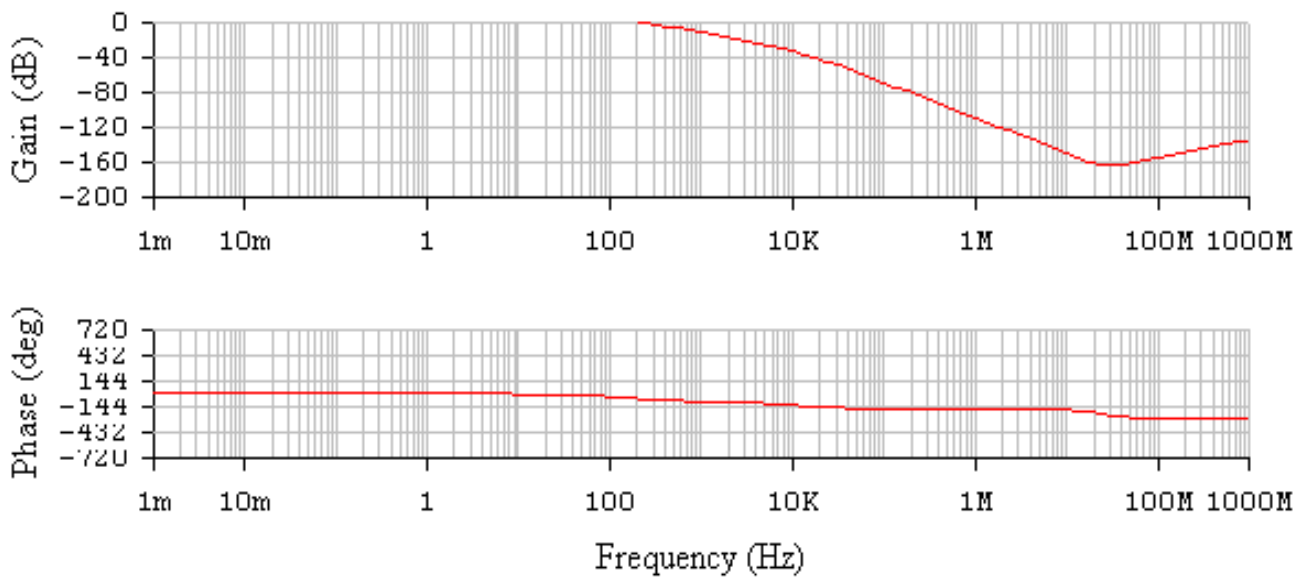


Рисунок 3.10 - АЧХ і ФЧХ третього каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

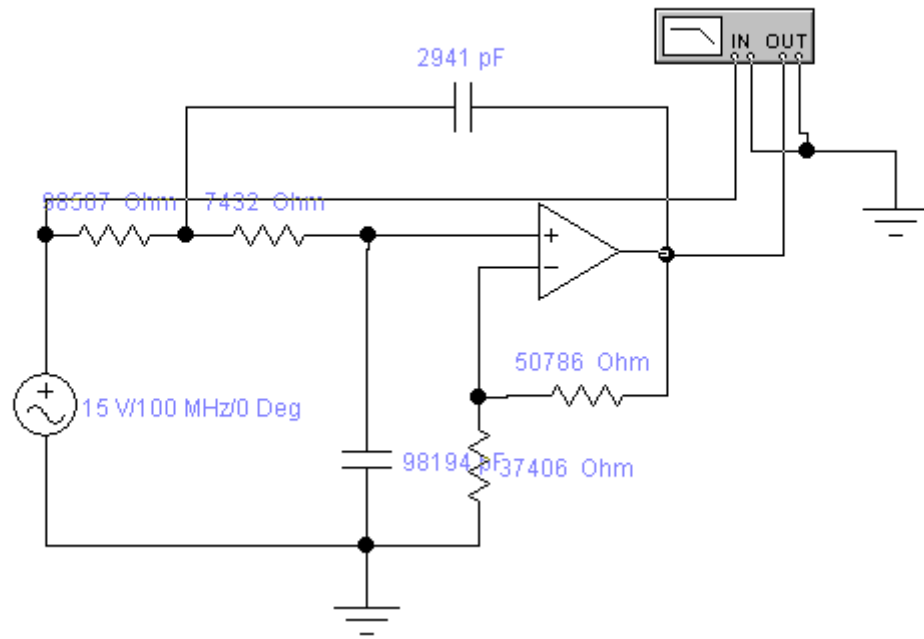


Рисунок 3.11 - Схема четвертого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

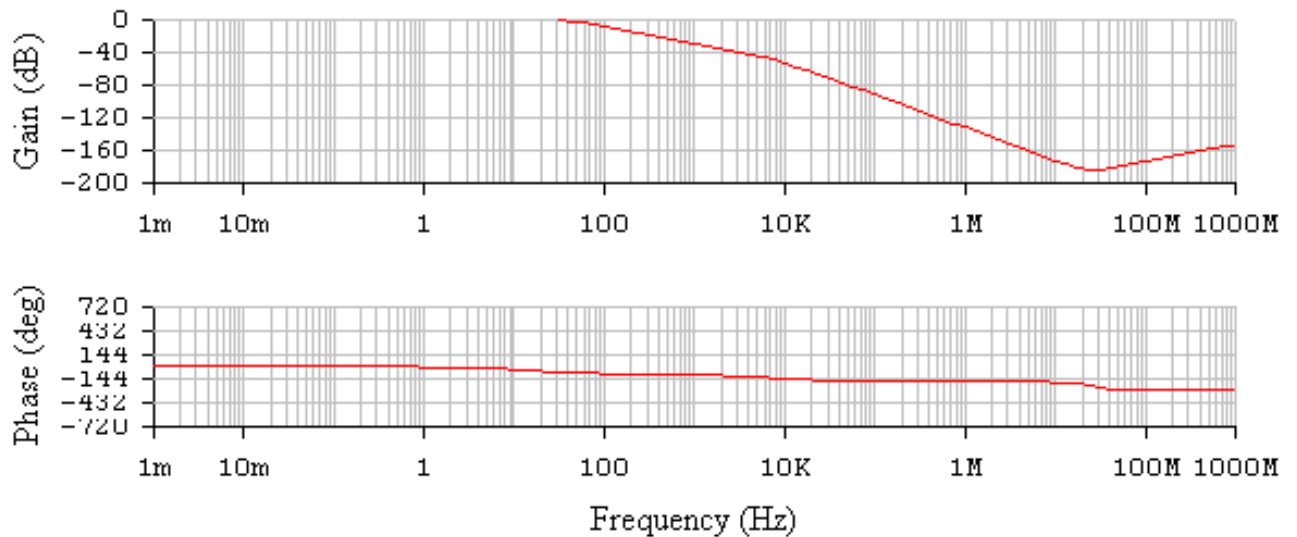


Рисунок 3.12 - АЧХ і ФЧХ четвертого каскаду фільтра в пакеті програм Electronics Workbench

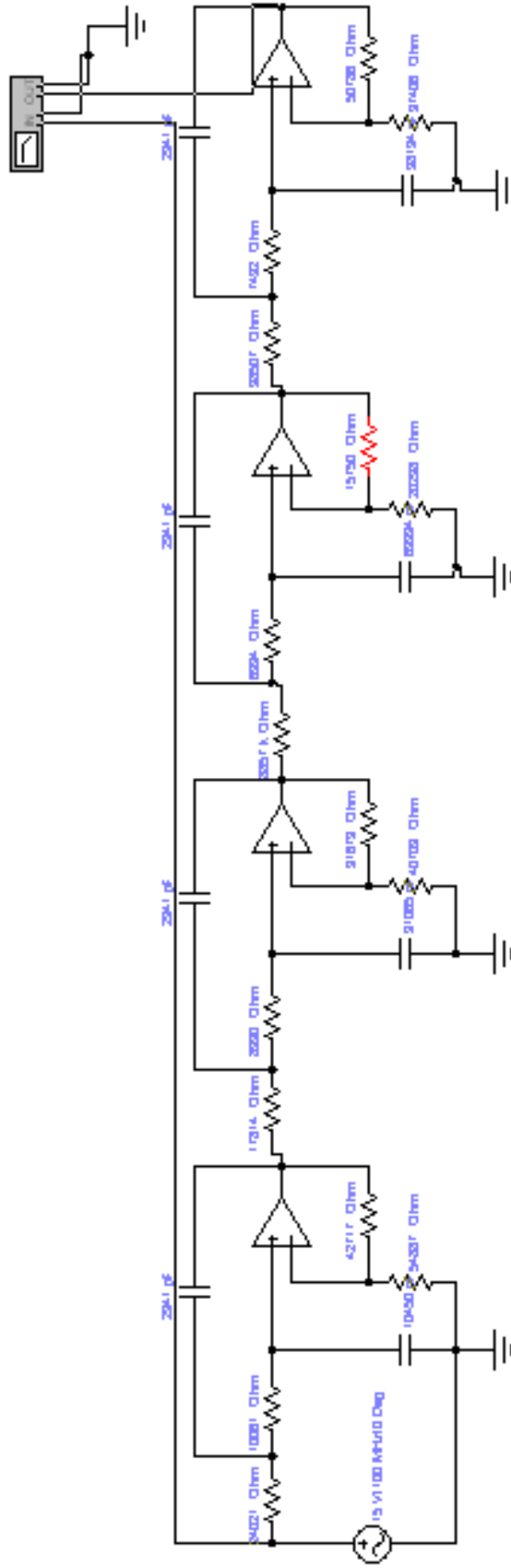


Рисунок 3.13 - Схема смугового фільтра Баттєворта четвертого порядку на операційних підсилювачах в пакеті програм Electronics Workbench

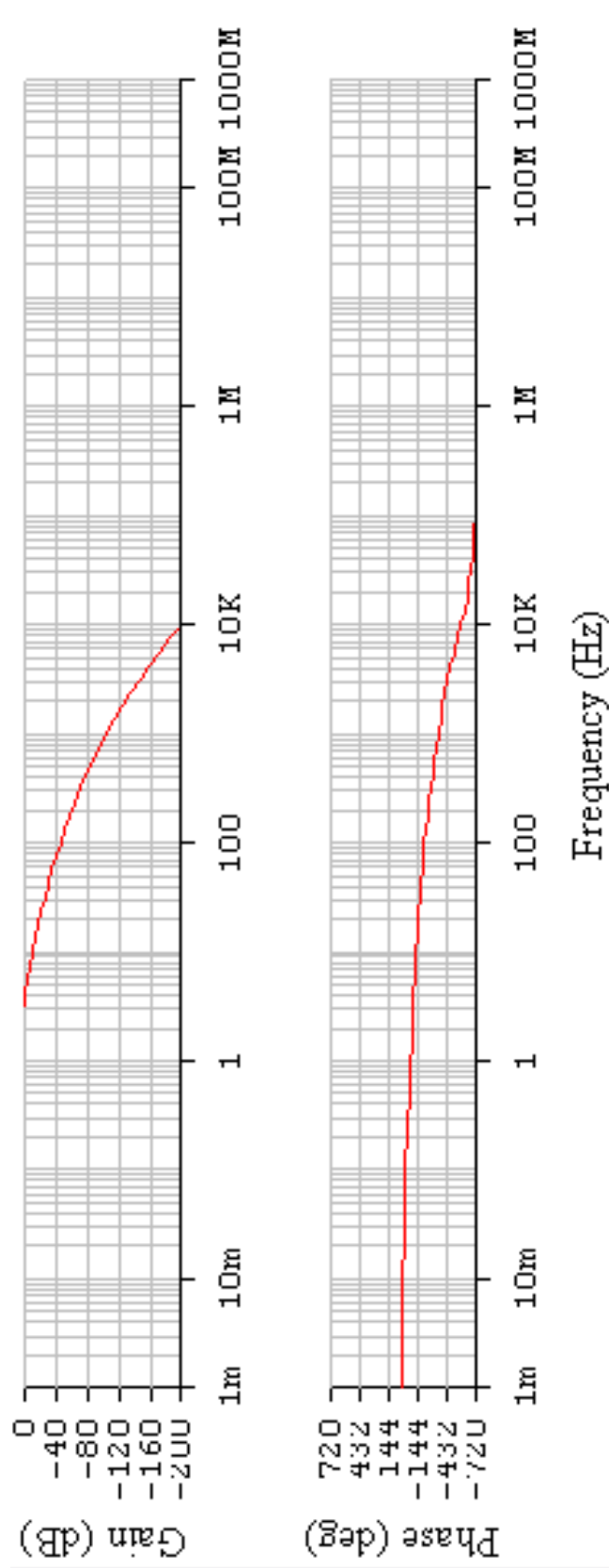


Рисунок 3.14 - АЧХ і ФЧХ смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах в пакеті програм Electronics Workbench

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

За оцінками Міжнародної організації праці (МОП), щорічно відбувається понад 270 мільйонів нещасних випадків на виробництві, які ведуть до відсутності на робочому місці протягом більше 3 днів, і від майже 160 мільйонів випадків хвороб без смертельного результату. Кожен день в світі вмирають в результаті нещасних випадків і захворюваності на виробництві близько 5000 осіб, в рік – від 2 до 2,3 мільйона осіб. Це не враховуючи воєнні дії на нашій території.

Проектування смугового фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання робочого місця

Виробничі приміщення повинні обладнуватись шафами для зберігання документів, стелажми, тумбами тощо, з урахуванням вимог до площі приміщень.

У приміщеннях з ПК слід щоденно робити вологе прибирання.

Приміщення із ПК мають бути оснащені аптечками першої медичної допомоги.

При приміщеннях із ПК мають бути обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження слід передбачити встановлення пристроїв для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою.

Конструкція робочого місця користувача ПК повинна забезпечувати підтримку оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками: стопи ніг – на підлозі або на підставці для ніг; стегна – у горизонтальній площині; передпліччя – вертикальні; лікті – під кутом 70-90° до вертикальної площини; зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20° щодо горизонтальної площини, нахил голови – 15-20° щодо вертикальної площини.

Висота робочої поверхні стола для відеотерміналу повинна перебувати в межах 680-800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля.

Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менш 600 мм, шириною не менш 500 мм, глибиною на рівні колін не менш 450 мм, на рівні витягнутої ноги - не менш 650 мм.

Робоче сидіння (стілець, крісло) користувача ПК повинен мати наступні основні елементи: сидіння, спинку й стаціонарні або знімні підлокітники.

Екран монітора й клавіатура повинні розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів.

Клавіатуру варто розміщати на поверхні стола або на спеціальній, регульованій по висоті, робочій поверхні окремо від стола на відстані 100-300 мм від краю, найближчого до працівника. Кут нахилу клавіатури повинен бути в межах 5-15°.

При організації праці, пов'язаної з використанням ПК, для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності передбачаються внутрішньо змінні регламентовані перерви для відпочинку.

Внутрішньозмінні режими праці й відпочинку містять додаткові нетривалі перерви в періоди, що передують появі об'єктивних і суб'єктивних ознак стомлення й зниження працездатності.

Працюючі з ПК підлягають обов'язковим медичним оглядам: попереднім – при влаштуванні на роботу і періодичним – протягом трудової діяльності. Основними критеріями оцінки придатності до роботи з ПК мають бути показники стану органів зору: гострота зору, показники рефракції, акомодації, стану біокулярного апарату ока тощо. При цьому необхідно враховувати також стан організму в цілому.

Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК й устаткування для обслуговування, ремонту й налагодження ПК в приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазових, нульових робочих і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електроприладів.

Металеві труби й гнучкі металеві рукави заземлені. Заземлення відповідає вимогам [26].

Неприпустимим є:

- експлуатація кабелів і проводів з ушкодженими захисними властивостями за час експлуатації ізоляції; залишення під напругою кабелів і проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, що не відповідають вимогам ПУЕ до переносних електропроводів;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального устаткування або ламп накаливання;

- користування ушкодженими розетками, вимикачами й іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або здуття;
- підвішування світильників безпосередньо на струмоведучих проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною й іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);
- використання електроапаратури й приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Параметри мікроклімату нормуються в залежності від: періоду року; категорії робіт; технологічного процесу.

Для нормування параметрів мікроклімату календарний рік поділяється на два періоди:

- холодний період – період року, коли середньодобова температура зовні приміщення нижча за $+10^{\circ}\text{C}$;
- теплий – коли середньодобова температура зовні приміщення становить $+10^{\circ}\text{C}$ і вище.

Робота розробника за енерговитратами відноситься до категорії 1а [27]. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.4.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [28]).

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для підтримки оптимального рівня мікроклімату в приміщенні передбачено систему опалення та вентиляції повітря. Виміри показників мікроклімату повинні проводитись на початку, в середині і в кінці холодного і теплого періодів року, не менше трьох разів за робочу зміну. При коливаннях показників мікроклімату, пов'язаних з технологічними процесами та іншими причинами, виміри необхідно проводити також при найменших і найбільших значеннях термічних навантажень на працюючих, що мають місце протягом робочої зміни.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється розробка, можливими забруднювачами повітря може бути офісна техніка та пил, який потрапляє ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Фенол	0,01	0,01	3
Формальдегід	0,035	0,003	2
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

В повітрі зовнішнього природного середовища, як і в повітряному середовищі приміщень завжди є наявною певна кількість заряджених частинок – іонів. Так в 1 см³ чистого зовнішнього повітря міститься близько 1000 негативних іонів і понад 1200 позитивних. Параметри іонного складу

повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для дотримання нормального складу повітря робочої зони в приміщенні використовують припливно-витяжну вентиляцію. Систематично здійснюють провітрювання через віконні отвори та вологе прибирання. Планується встановлення системи кондиціонування.

4.2.3 Виробниче освітлення

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно з статистичними даними, до 5% травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20% воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції.

При надмірній яскравості джерел світла та оточуючих предметів може відбутись засліплення працівника. Нерівномірність освітлення та неоднакова яскравість оточуючих предметів призводять до частоті переадаптації очей під час виконання роботи і, як наслідок цього – до швидкого втомлення органів зору

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні для виконання роботи зазначені у таблиці 4.4 (відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [29]):

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Місце праці повинно бути розташоване так, щоб уникнути попадання в очі прямого світла. Щоб уникнути світлових відблисків необхідно використовувати обладнання з матовою поверхнею. Для захисту очей від прямого сонячного світла чи джерел штучного освітлення необхідно застосовувати захисні козирки та жалюзі на вікнах.

Для створення оптимальних умов зорової роботи слід враховувати не лише кількість та якість освітлення, а й кольорове оточення. Так, при світлому пофарбуванні інтер'єру завдяки збільшенню кількості відбитого світла рівень освітленості підвищується на 20 – 40% (при тій же потужності джерел світла), різкість тіней зменшується, покращується рівномірність освітлення.

4.2.4 Виробничий шум

Шум може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси організму людини. Фізіологічні та біологічні наслідки можуть проявлятися у формі порушення функцій слуху та інших аналізаторів, зокрема вестибулярного апарату, координуючої функції кори головного мозку, нервової системи, систем травлення і кровообігу.

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму, суттєво впливають на його сприйняття

Допустимі рівні шуму та вібрації на місцях праці осіб, що працюють з ПК, встановлені санітарними нормами ДсанПіН 3.3.2-007-98 [30], витяг з яких подано в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Допустимі еквівалентні рівні шуму

Вид професійної діяльності, місце праці	Еквівалентні рівні шуму, дБА.
Програмісти	50
Оператори в залах опрацювання інформації на ПК та оператори комп'ютерного набору	65
В приміщеннях для розташування шумних агрегатів	75

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Оскільки проектування проводилося за допомогою ПК, то на робочому місці працівника можливий підвищений рівень електромагнітного випромінювання.

Основою функціонування організму є дуже слабкі біоелектричні струми, що синхронізують природні біологічні режими. Штучні ЕМП якщо

співпадають з частотами біологічних ритмів мозку або біоелектричною активністю серця чи інших органів людини можуть призвести до десинхронізації функціональних процесів в організмі.

Механізм біологічної дії на організм людини полягає як у тепловому, так і нетепловому специфічному ефекті, тепла дія ЕМП проявляються у підвищенні температури тіла, а також локальному, вибіркового нагріванні тканин, органів, клітин унаслідок переходу електромагнітної енергії у теплову.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/М	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320. ..400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. .70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 вВ/м

Для зменшення впливу ЕМП від ПК на дослідника, необхідно дотримуватися регламентованих режимів роботи та відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

В приміщенні, де здійснювалося проектування використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д».

За вогнестійкістю будинок відноситься до другої категорії згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [31]. Робоча зона приміщення віднесена до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система запобігання пожежі включає такі основні напрями:

- запобігання утворенню горючого середовища. Досягається: застосуванням герметичного виробничого устаткування; максимально можливою заміною в технологічних процесах горючих речовин та матеріалів негорючими; обмеженням кількості пожежо- та вибухонебезпечних речовин при використанні та зберіганні, а також правильним їх розміщенням; ізоляцією горючого та вибухонебезпечного середовища; організацією контролю за складом повітря в приміщенні та контролю за станом середовища в апаратах; застосуванням робочої та аварійної вентиляції; відведенням горючого середовища в спеціальні пристрої та безпечні місця; застосуванням в установках з горючими речовинами пристроїв захисту від пошкоджень та аварій; використанням інгібувальних (хімічно активні компоненти, що сприяють припиненню пожежі) та флегматизаційних (інертні компоненти, що роблять середовище негорючим) добавок та ін.

- запобігання виникненню в горючому середовищі (чи внесенню в

нього) джерела запалювання. Досягається: використанням устаткування та пристроїв, при роботі яких не виникає джерел запалювання; використанням електроустаткування, що відповідає за виконанням класу пожежо- та вибухонебезпеки приміщень та зон, груп і категорії вибухонебезпечної суміші; виконанням вимог щодо сумісного зберігання речовин та матеріалів; використанням устаткування, що задовольняє вимоги електростатичної іскробезпеки; улаштуванням блискавкозахисту; організацією автоматичного контролю параметрів, що визначають джерела запалювання; використанням швидкодіючих засобів захисного вимкнення; заземленням устаткування, видовжених металоконструкцій; використанням під час роботи з ЛЗР інструментів, що не допускають іскроутворення; ліквідацією умов для самоспалахування речовин і матеріалів; усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин; підтриманням температури нагрівання поверхні устаткування пристроїв, речовин та матеріалів, які можуть контактувати з горючим середовищем нижче гранично допустимої (80 % температури самозаймання).

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де проводилося проектування такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- залишення без нагляду увімкнених комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- систематичне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист промислових об'єктів забезпечується:

- правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій; правильним об'ємно-планувальним рішенням будівель і споруд; розташуванням приміщень та виробництв з урахуванням вимог пожежної безпеки;
- улаштуванням протипожежних перепон у будівлях, системах вентиляції, опалювальних та кабельних комунікаціях;
- спорудженням протидимного захисту;
- забезпеченням евакуації людей;
- використанням засобів пожежної сигналізації, сповіщення та пожежогасіння;
- організацією пожежної охорони об'єкта;
- засобами, що забезпечують успішне розгортання тактичних дій гасіння пожежі.

Досліджуване приміщення має два переносних (порошкових, водопінних або водяних) вогнегасників з масою заряду вогнегасної речовини 5 кг і більше. Крім того, треба передбачати по одному вуглекислотному вогнегаснику з величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг і більше:

- на 20 м² площі підлоги в таких приміщеннях: офісні приміщення з ПК, комори, електрощитові, вентиляційні камери та інші технічні приміщення;

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській дипломній роботі проведено розрахунки аналогового RC-фільтра звукових частот з характеристиками Батерворта, за вимогами технічного завдання. Фільтр реалізований каскадним з'єднанням чотирьох ланок другого порядку, так як він є парного ($n=8$) порядку. Всі активні RC-ланки побудовані на ДНКН, переваги якої наведені в підрозділі 2.1. Запропоновані два варіанти реалізації резистивних елементів фільтра:

1) послідовне з'єднанням постійного опору з номінальними значеннями параметрів, що в сумі наближено мають розрахункові значення опорів.

2) послідовне з'єднанням постійного опору та підстроєного опору.

Ємності окремих каскадів фільтра обраним так, щоб отримати результуючу ємність однаковою з номінальним значенням та близьку до розрахункової.

Розроблення фільтра, аналіз АЧХ і ФЧХ та моделювання АЧХ окремих каскадів і всього фільтра, здійсненні з використанням програми Electronics Workbench. Результати моделювання підтвердили правильність теоретично отриманих результатів.

Наведено практичні результати підтверджують актуальність і доцільність здійсненого дослідження. Отже на основі вищесказаного робимо висновок, що розробка даного типу фільтра є досить актуальною тому, що використання RC-фільтра є найбільш вигідним, так як при його виготовленні зменшується трудомісткість, та значного полегшення процесу настроювання.

Також у бакалаврській дипломній роботі розроблено розділ Охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Чинний від 01.07.2017 р.
2. Скрипка Ю.Г. Пристрої аналогової обробки сигналів. Методичні вказівки до вивчення курсу «Аналогові електронні пристрої». Ч. 2. – К.: КПІ, 1997. – 32 с.
3. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Third Edition. – Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
4. Аналогова схемотехніка: Конспект лекцій для студентів спеціальності 171 – Електроніка (спеціалізації «Акустичні мультимедійні технології та системи», «Акустичний моніторинг, біо- та психоакустика») (Гриф надано Вченою радою ФЕЛ (Протокол № 03/2017 від 29 березня 2017 р.)) / В.С. Берегун. – К.: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2017. – 137 с
5. Бойко В. І. Схемотехніка електронних систем: підручник : у 3 кн. Кн 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої / Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. та ін. – Київ : Вища школа, 2004. – 366 с.
6. Electronics Tutorials [Electronic resource] URL: https://www.electronicstutorials.ws/filter/filter_7.html
7. Electronics Projects Focus [Electronic resource] URL: <https://www.elprocus.com/what-is-a-band-pass-filter-circuit-diagram-types-andapplications/>
8. Mandal, M.K., Divyabramham, K. and Velidi, V.K. Compact wideband bandstop filter with five transmissions zeros/ M.K. Mandal, K. Divyabramham, V.K. Velidi // IEEE Microwav., Wireless comp., Lett. — 2012. — vol.22. — no.1. — pp.4-6.
9. Circuits Today [Electronic resource] URL: <https://www.circuitstoday.com/band-pass-filters>

- 10.8. Sun, S. and Zhu, L. Compact dual-band microstrip bandpass filter without external feeds/S. Sun, L. Zhu // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.— 2005.— vol. 15.— no. 10.— pp.644 -646.
- 11.Electricalfundablog [Electronic resource] URL:
<https://electricalfundablog.com/band-pass-filter-types-works-applicationsadvantages/#Disadvantage>
- 12.Powered Global Spac Engineering360 [Electronic resource] URL:
https://www.globalspec.com/learnmore/semiconductors/analog_mixed_signals/amplifier_linear_devices/active_bandpass_filters
- 13.ALL ABOUT CIRCUITS [Electronic resource] URL:
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-passfilters/>
- 14.SpringerLink [Electronic resource] URL:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-0817-1_95
- 15.Audiomania [Electronic resource] URL:
<https://www.audiomania.ru/content/art-1839.html>
- 16.Воробйова О. М. Основи схемотехніки : підручник / Воробйова О. М., Іванченко В. Д.. – [2-ге вид.]. – Одеса : Фенікс, 2009. – 388 с.
- 17.Савицька М. П. Аналогові електронні пристрої : навчальний посібник. Модуль 1 / М. П. Савицька, Л. Б. Ботнар. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2009. – 108 с.
- 18.Савицька М. П. Аналогові електронні пристрої: навчальний посібник. Модуль 2 / М. П. Савицька, Л. Б. Ботнар. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2009. – 144 с.
- 19.Юдін О. К. Електроніка : конспект лекцій. Модуль 1 / О. К. Юдін, Н. К. Гулак, А. В. Чунарьова. – Київ : НАУ, 2010. – 74 с.
- 20.Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : навч. посіб. / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков; за ред. А. Г. Соскова. – 2-ге вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.

- 21.Схемотехніка електронних систем: підручник : у 3 кн. Кн 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – К. : Вища школа, 2004. – 366 с.
- 22.Воробйова О. М. Основи схемотехніки : підручник / О. М. Воробйова, В. Д. Іванченко. – [2-ге вид.]. – Одеса : Фенікс, 2009. – 388 с.
- 23.ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.
- 24.ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
- 25.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php.
- 26.ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с.
- 27.Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
- 28.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
- 29.ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
- 30.Про мінімальні вимоги безпеки при роботі з дисплейним обладнанням: 90/270/ЕЭС. Брюссель : Рада Європейських співтовариств, 1990. URL: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>

- 31.ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
- 32.Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>

Додаток А
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ**

**СМУГОВИЙ ФІЛЬТР БАТТЕРВОРТА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ НА
ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ
ЗВУКОВІДТВОРЕННЯ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах для обладнання звуковідтворення»

Тип роботи:

БДР

(БДР, МКР)

Підрозділ

ІРТС, ІЕС

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 80,6% 'Схожість 19,4%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

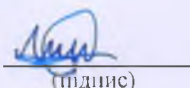
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)

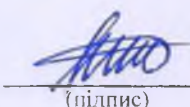
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Михайло КОБРЕНЮК
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Андрій СЕМЕНОВ
(прізвище, ініціали)

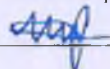
Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

СМУГОВИЙ ФІЛЬТР БАТТЕРВОРТА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ ЗВУКОВІДТВОРЕННЯ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-196
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

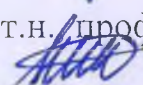
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Кобренюк М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС



Семенов А. О.

(прізвище та ініціали)

« 15 » 06 2023 р.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

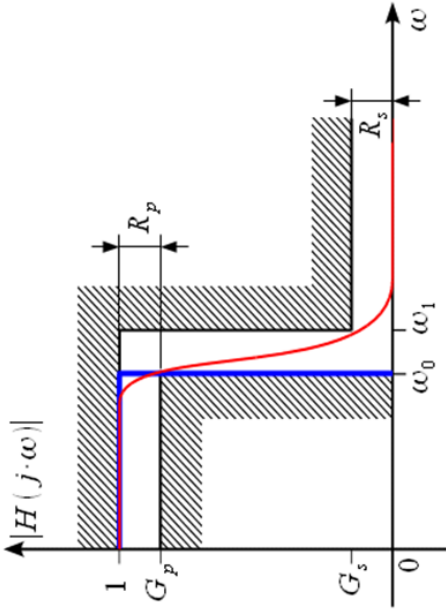


Рисунок 1 - Ідеальна й реальна амплітудно-частотні характеристики фільтра нижніх частот

Передатна функція фільтрів нижніх частот Баттерворта

$$H = \frac{V_2}{V_1} = \frac{P(s)}{s^2 + Bs + C}$$

де $P(s)$ – поліном другого порядку; B і C - нормовані коефіцієнти ланки фільтра нижніх частот другого порядку.

$$H(p) = H_1(p) \cdot H_2(p) \cdot \dots \cdot H_m(p)$$

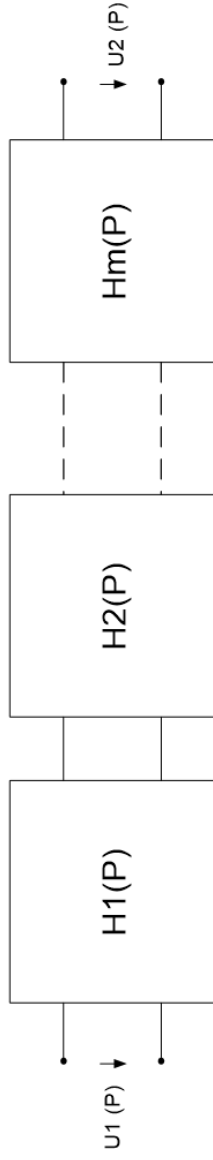
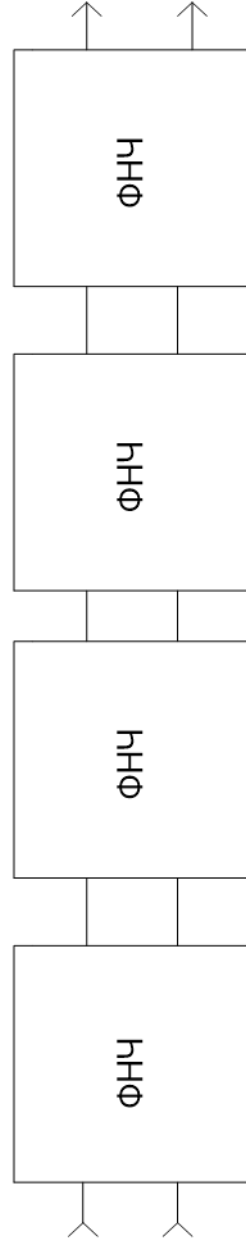


Рисунок 2 - Каскадне з'єднання ланок фільтра

Структурна схема фільтра Баттерворта 4-го порядку



Результати електричних розрахунків фільтра Баттерворта 4-го порядку

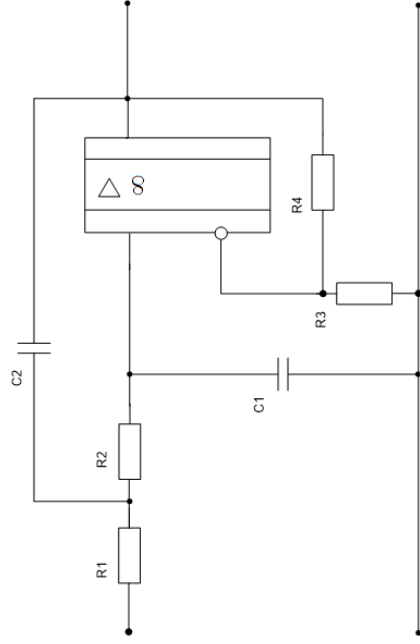
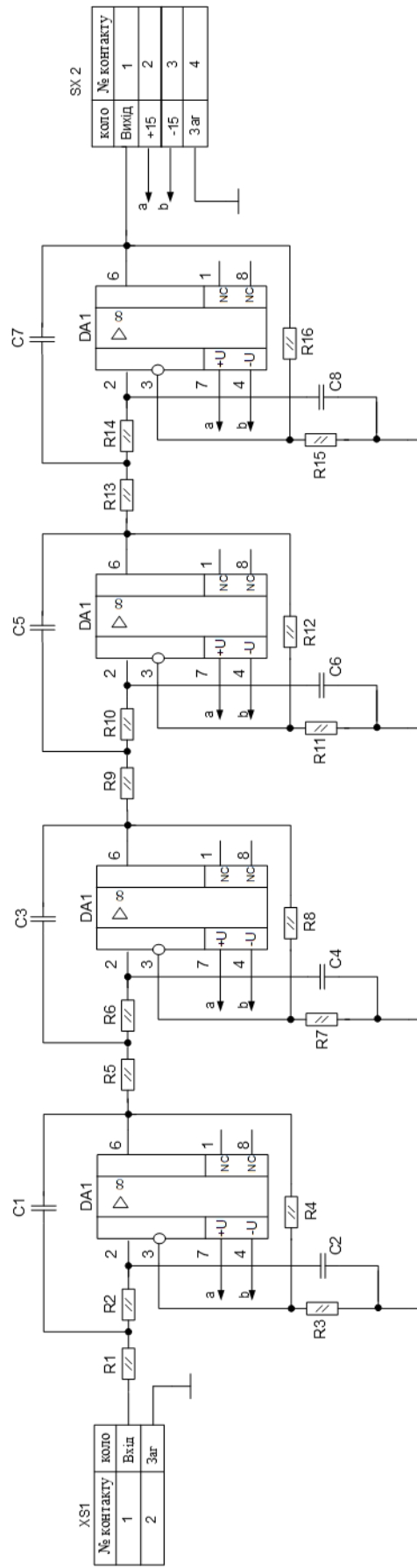


Рисунок 1 – Електрична схема ланки фільтра на операційних підсилювачах

Таблиця 1 - Розрахункові значення параметрів елементів фільтра

Порядковий номер каскаду	Розрахункові значення елементів фільтра					
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	C_1 пФ	C_2 пФ
Перший каскад (другого порядку)	10061,051	24021,793	54887,049	42717,46	10450,975	2941,176
Другий каскад (другого порядку)	8930,682	17814,417	40703,905	31679,012	31065,802	
Третій каскад (другого порядку)	6334,505	8857,353	20238,038	15750,848	69334,152	
Четвертий каскад (другого порядку)	98507,532	7432,654	37406,142	50786,329	98194,152	

Схема електрична принципова фільтра Баттерворта 4-го порядку



АЧХ і ФЧХ фільтра Баттерворта четвертого порядку на операційних підсилювачах в пакеті програм Electronics Workbench

