

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))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської дипломної роботи на тему:

«АКТИВНИЙ НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ФАЗОВИЙ ФІЛЬТР БЕССЕЛЯ ШОСТОГО ПОРЯДКУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ»

Виконав: студент 2(4)-го курсу, групи ТКР-22мс
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Чуба Ю.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС
Савицький А.Ю.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2024 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ
Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)
«13» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 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

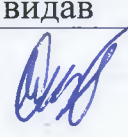
15 березня 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Чубі Юрію Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Активний низькочастотний фазовий фільтр Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах»
керівник роботи Савицький Антон Юрійович, к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “11”03 2024 року № 80
2. Строк подання студентом роботи 10 06 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: смуга пропускання 2000 Гц; нижня частота смуги пропускання 2000 Гц; частота зрізу 1400 Гц і 5600 Гц; максимальне ослаблення в смузі пропускання 2,3 дБ; мінімальне ослаблення в смузі затримування 30 дБ; напруга живлення ± 15 В; коефіцієнт передачі в межах смуги пропускання 16; опір навантаження 2000 Ом.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз сучасного стану методів побудови активних фільтрів. Розроблення схемної реалізації активного фазового фільтра Бесселя. Розділ конструкторських розрахунків. Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання каскадів активного фільтра Бесселя. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Загальна структурна схема активного фільтра Бесселя. Схеми каскадів ФНЧ і ФВЧ на ОП з обмеженим коефіцієнтом підсилення. Схема електрична принципова активного фільтра Бесселя. Топологія друкованої плати активного фільтра Бесселя (вигляд знизу). Топологія друкованої плати активного фільтра Бесселя (вигляд згори). Встановлення радіокомпонентів на друкованій платі активного фільтра Бесселя. Зовнішній вигляд лабораторного макета.

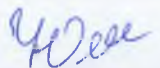
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доцент, доцент каф. ІРТС Савицький А.Ю.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 14.03. 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-10.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	11.03.2024-31.03.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.04.2024-06.05.2024	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2024-18.05.2024	
6.	Розробка графічної частини БДР	19.05.2024-22.05.2024	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2024-28.05.2024	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	29.05.2024-05.06.2024	
9.	Нормоконтроль	06.06.2024-07.06.2024	
10.	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	08.06.2024-10.06.2024	
11.	Захист БДР ЕК	11.06.2024-14.06.2024	

Студент  Чуба Ю.В.

(підпис)

Керівник роботи  Савицький А.Ю.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396.6

Чуба Ю.В. Активний низькочастотний фазовий фільтр Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах. Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 102 с. Українською мовою. Бібліогр.: 32 назв; Рис.: 29. Табл. 15

У бакалаврській дипломній роботі розроблений та досліджений активний низькочастотний фазовий фільтр Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах. Проаналізовано сучасний стан розробки активних фільтрів ультра-високочастотного діапазону. Виконані електричні розрахунки каскадів активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах. Отримані результати моделювання його амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик. Виконані конструкторські розрахунки та розроблена друкована плата активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах і конструкція лабораторного макету на його основі.

Ключові слова: активний фільтр, амплітудно-частотна характеристика, електричне керування, операційний підсилювач, зворотний зв'язок.

ABSTRACT

Chuba Y.V. Sixth-order active low-pass Bessel phase filter on operational amplifiers. Bachelor's thesis. - Vinnytsia: VNTU, 2024. 102 p. In Ukrainian. Bibliography: 32 titles; Figures: 29. Table 15

In the bachelor's thesis, an active low-pass Bessel phase filter of the sixth order on operational amplifiers was developed and studied. The current state of development of active filters in the ultra-high frequency range is analysed. The electrical calculations of the stages of the sixth-order active low-pass Bessel phase filter on operational amplifiers are carried out. The results of modelling its amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are obtained. Design calculations were performed and a printed circuit board of the sixth-order active low-pass Bessel phase filter on operational amplifiers and a laboratory model based on it were developed.

Keywords: active filter, amplitude-frequency response, electrical control, operational amplifier, feedback.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ.....	11
1.1 Характеристики смугових фільтрів і вимоги до них.....	11
1.2 Аналіз вимог індивідуального завдання.....	15
1.3 Каскадне проектування активних фільтрів	16
1.4 Частотні перетворення в задачах проектування фільтрів.....	21
1.5 Чутливість характеристик та параметрів електричних схем фільтрів до зміни параметрів елементів.....	24
1.6 Настроювання активних фільтрів.....	27
2 РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АКТИВНОГО ФАЗОВОГО ФІЛЬТРА БЕССЕЛЯ.....	30
2.1 Розроблення структурної схеми фільтра	30
2.2 Визначення порядку розташування ланок і їх параметрів.....	32
2.3 Розроблення електричної принципової схеми фільтра	35
2.4 Розрахунок параметрів пасивних елементів ланки ФНЧ.....	36
2.5 Розрахунок параметрів пасивних елементів ланки ФВЧ.....	41
2.6 Вибір типу операційного підсилювача	46
2.7 Чутливість характеристик ланок фільтра до зміни параметрів елементів	48
2.8 Визначення допусків на параметри елементів	52
2.9 Настроювання пропонованого фільтру.....	54
3 РОЗДІЛ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РОЗРАХУНКІВ.....	57
3.1 Конструкторський розрахунок друкованої плати.....	57
3.2 Розрахунок надійності	62
4 РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КАСКАДІВ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА БЕССЕЛЯ ..	68
4.1 Створення проекту активного фільтра.....	68

4.2 Результати моделювання АЧХ каскадів активного фільтра Бесселя	70
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	75
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	75
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	78
5.3 Пожежна безпека.....	82
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	93
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) дипломної роботи	101

ВСТУП

Актуальність теми.

Схеми фільтрації сигналу є важливим компонентом багатьох систем зв'язку, а також електричного контрольно-вимірювального обладнання. Вони використовуються для формування каналів у системах комутації, розподілу та перетворення електричних сигналів, дистанційного керування технологічними процесами та багатьох інших галузях [1].

Історично склалося так, що пасивні LC- і RC-фільтри спочатку використовувалися в технологіях дротового зв'язку, а пізніше в радіотехнологіях для вирішення більшості проблем фільтрації електричних сигналів. Однак, незважаючи на безсумнівні позитивні властивості таких фільтрів (великий динамічний діапазон, просте рішення, можливість отримання різноманітних частотних характеристик тощо), вони мають і багато недоліків — велику масу, великі габаритні розміри (особливо на низьких частотах). Індуктори, складність технології виготовлення та несумісність з інтегральною мікросхемотехнікою, низька стійкість заводів до електромагнітних полів, неможливість отримання фільтрів зі складними полюсами на основі пасивних RC-схем [2].

Сьогодні використання пасивних LC-фільтрів обмежено діапазоном частот від кількох сотень Гц до приблизно 300 МГц і використовується в менш інтегрованих пристроях [3].

Другими за хронологією використання є електромеханічні фільтри, які використовуються в діапазоні частот від 1 Гц до приблизно 600 кГц [4].

Основними недоліками електромеханічних фільтрів є їх габаритні розміри та маса, некваліфіковане виготовлення та висока вартість [5,6]. Через останній недолік електромеханічні фільтри не використовуються в побутовій радіоапаратурі [7,8].

На даному етапі розвитку технології фільтрації існує проблема зменшення розмірів РЕА. Це скорочення відбувається за рахунок мініатюризації компонентної бази та нових принципів побудови пристроїв РЕА. При використанні

традиційних схемних рішень можливості використання мікромініатюризації обмежені через неможливість зменшити розміри окремих елементів схеми в діапазоні низьких частот. Ця проблема стосується технічних університетів, лабораторії яких не мають сучасних фільтрів [9, 10].

В університетських лабораторіях є пасивні фільтри. Пасивні фільтри складаються тільки з пасивних компонентів схеми: резисторів, конденсаторів, індукторів, трансформаторів. Фільтри цього типу добре працюють на високих частотах, але в діапазоні низьких частот (до 500 кГц) вони мають істотні недоліки: збільшені розміри і вартість, знижена добротність котушки індуктивності, низький вхідний і високий вихідний опір роблять фільтр неперевершеним. вхід і вихід важко співставити. Видно, що основним недоліком пасивних фільтрів є наявність індуктивної котушки [11, 12].

Огляд літературних джерел.

В діапазоні частот приблизно від 5 кГц до 100 МГц використовуються п'єзоелектричні (кристалічні) фільтри на основі нижчих частот, п'єзоелектричні фільтри мають неприйнятні розміри і вагу [5].

Фільтрація поверхневих акустичних хвиль отримала глибокий розвиток в останні десятиліття минулого століття і сьогодні, з частотами в діапазоні від 10 МГц до десятків ГГц [6].

Існує багато інших способів реалізації фільтрів, але всі вони не охоплюють низькі (сотні Гц) і субнизькі (десятки Гц) діапазони часових частот. [7]

Таким чином, існує ніша низькочастотного діапазону, де характеристики вищезгаданих фільтрів з різних причин не відповідають сучасним вимогам до фільтрації електричних сигналів. Це поле заповнюється RC-фільтрами, які містять підсилювачі для отримання складних полюсів і відомі як активні RC-фільтри (скорочено ARC-фільтри). [8]

Перша інформація про фільтри ARC відноситься до 1930-х років і була пов'язана з отриманням діапазонів низьких і субнизьких частот і створенням вимірювальних систем, що працюють в сильних магнітних полях. [8] Однак розробка систем фільтрації на основі схем ARC була досягнута в 1960-х роках з

успіхом мікроелектроніки, особливо з появою високоякісних інтегрованих операційних підсилювачів (ОП).

Сьогодні фільтри АРС використовуються від 0 до приблизно 500 кГц, при цьому верхня межа має тенденцію до збільшення через появу швидкодіючих ОП. [9]

Застосування RC-фільтрів в радіообладнанні поки що обмежується звуковими доріжками, а саме: стереодекодери, обертонові частотні фільтри для декодерів, коректори попередніх підсилювачів магнітоакустичних детекторів, фільтри, що обмежують частотний діапазон відтворення, блоки регулювання тембру [10].

Метою роботи є розроблення та дослідження смугового RC-фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах, що розрахований на виготовлення на основі дискретних резисторів, конденсаторів, операційних підсилювачів і призначений для обмеження діапазону відтворюваних частот звукового діапазону.

Об'єктом дослідження - процес перетворення енергії спектрального складу сигналів звукової частоти в активному фільтрі Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах.

Предмет дослідження – частотні параметри і характеристики активного фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах.

Щоб досягнути зазначену мету в бакалаврській дипломній роботі вирішені наступні задачі:

- аналіз сучасного стану методів побудови активних фільтрів;
- розробити структурну схему активного фільтра Бесселя;
- виконати електричні розрахунки усіх каскадів і ланок активного фільтра Бесселя;
- розробити електричну схему активного фільтра Бесселя;
- виконати розрахунки конструкції друкованої плати;
- розробити друковану плату активного фільтра Бесселя;
- здійснити комп'ютерне моделювання активного фільтра Бесселя;

- виконати розділ безпеки життєдіяльності.

Методи дослідження. Елементи основ теорії лінійних електричних кіл, теорія функції комплексної змінної, теорія конструювання РЕА, елементи теорії радіоавтоматики.

Практичне значення одержаних результатів

Нова електрична схема та конструкція лабораторного макету активного фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах.

Структура і обсяг роботи. Робота містить вступ, розділи 1-5, висновки, додатки і список використаних джерел.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

1.1 Характеристики смугових фільтрів і вимоги до них

Довгий час проектування фільтрів базувалося на характерних параметрах чотириполіусника [2]. Лише з появою швидкодіючих комп'ютерів проектування базувалося на робочих параметрах [13]. На рис. 1.1 показаний графік частотної залежності робочої постійної загасання смугового фільтра з рівночастотною характеристикою.

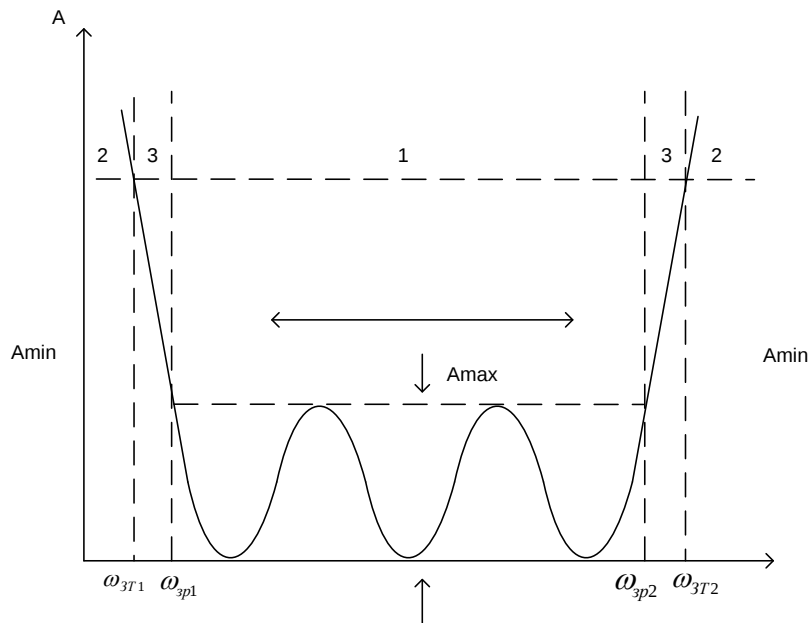


Рисунок 1.1 – Графік частотної характеристики постійної ослаблення смугового фільтра з рівнохвильовою АЧХ

Як показано на малюнку 1.1. Прийняті такі назви: $\omega_{зр1}$ і $\omega_{зр2}$ - граничні частоти смуги пропускання (частоти зрізу) $\Delta\Omega = \omega_{зр2} - \omega_{зр1}$ - смуга пропускання, (область 1 на рисунку 3.1) $\omega_{зт1}$ і $\omega_{зт2}$ - граничні частоти смуги пропускання Смуга затримки, частоти $\omega < \omega_{зт1}$ і $\omega > \omega_{зт2}$ (область 2 на рисунку 3.1) відповідає частотному інтервалу $(\omega_{зт1}, \omega_{зр1})$ і $(\omega_{зр2}, \omega_{зт2})$, який називається перехідною

смугою (область на рис. 1.1). Основні вимоги до частотної залежності безперервного загасання спрацьовування полягають у тому, що в смузі пропускання його значення не повинно перевищувати максимально допустиме значення $A_{\max}$ ($A \leq A_{\max}$), а в смузі затримки його значення не повинно бути менше мінімально допустимого значення. значення ($A \geq A_{\min}$), а в межах перехідної смуги частотна залежність постійного загасання є неконтрольованою.

Залежно від характеру частотної залежності постійного загасання в межах смуги пропускання і затримки виникають різні типи фільтрів: фільтри Баттерворта - частотна залежність постійного загасання монотонна і максимально плоска по смузі пропускання; фільтри Чебишева - частотні.

Аналітично залежність між константою ослаблення та амплітудно-частотними характеристиками (частотною характеристикою) фільтра визначається рівнянням (1.1)

$$A = 20 \lg \frac{1}{H(\omega)} \quad (\text{дБ}) \quad (1.1)$$

де $H(\omega)$ – це модуль коефіцієнта передачі по напрузі.

Виходячи з рівняння (1.1) вимоги до постійної ослаблення (дивись рис. 1.1) формують такі вимоги до АЧХ (рис. 1.2)

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1\max} - 1} \quad (1.2)$$

- це нерівномірність АЧХ у смузі пропускання;

$$\delta = \sqrt{10^{0,1\min} - 1} \quad (1.3)$$

- це крутизна АЧХ в перехідній смузі.

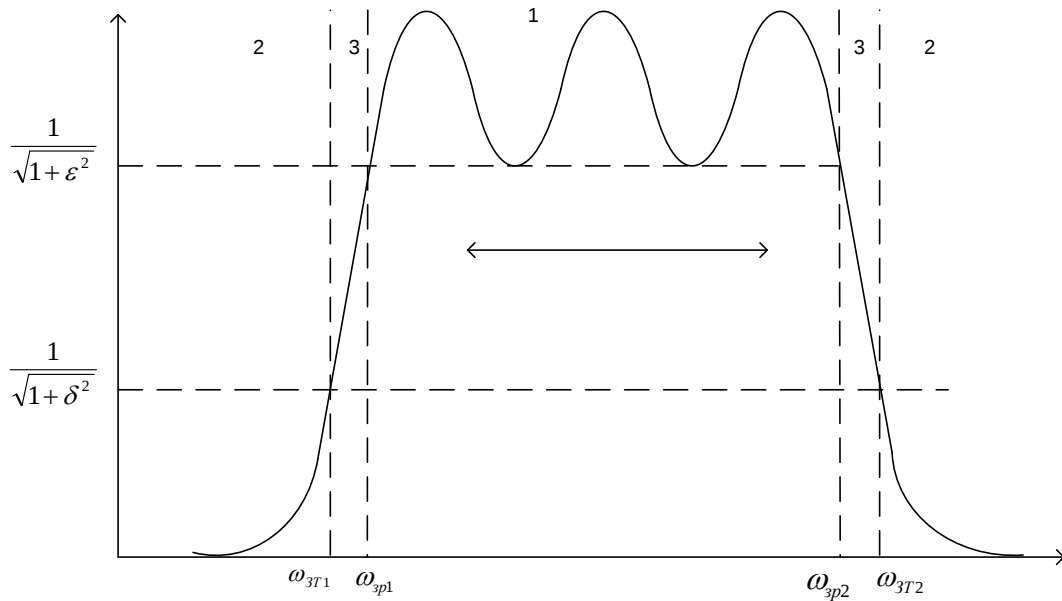


Рисунок 1.2 – Передатна характеристика рівнохвильової АЧХ

Залежно від співвідношення граничних частот смугові фільтри поділяються на вузькосмугові ($\omega_{zp2}/\omega_{zp1} < 1,5$) і широкосмугові ($\omega_{zp2}/\omega_{zp1} > 1,5$). Широко-смуговий фільтр можна розглядати як комбінацію двох незалежних фільтрів - фільтра низьких частот (LFF) і фільтра високих частот (HFF) [3]. У випадку смугового фільтра (SF), реалізованого каскадом фільтрів нижніх і високих частот на основі активних RC-ланок, якщо на виході кожної ланки є ОП з низьким вихідним опором. Оскільки постійне загасання каскаду додається при вирішенні реалізації каскаду, вимоги до високої та низької напруги як компонентів SF визначаються на основі вимог SF. Отже, відповідно до частотної залежності постійного затухання на рисунку SF визначаються вимоги до 1.1 НЧ і ВЧ

$$\begin{aligned} \text{ФНЧ:} \quad \omega_{zpнч} &= \omega_{zp2} \quad , \quad A_{\max нч} = 1/2 A_{\max c} \\ \omega_{ztнч} &= \omega_{zt2} \quad , \quad A_{\min нч} = A_{\min c} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \text{ФВЧ:} \quad \omega_{zpвч} &= \omega_{zp1} \quad , \quad A_{\max вч} = 1/2 A_{\max c} \\ \omega_{ztвч} &= \omega_{zt1} \quad , \quad A_{\min вч} = A_{\min c} \end{aligned} \quad (1.5)$$

При визначенні вимог до низьких і високих частот безперервне загасання СФ в межах смуги пропускання ділиться порівну між двома компонентами, але можливі й інші варіанти. У смузі затримки безперервне ослаблення ПЗ задовольняє умову $A_{\min c} = A_{\min} + 0,5A_{\max}$, тобто відповідає вимозі безперервної слави ПЗ у смузі затримки, і має певний запас.

При реалізації СФ з рівночастотною частотною характеристикою через каскад фільтрів низьких і верхніх частот будуть виникати систематичні похибки реалізації частоти зрізу через наявність систематичних похибок на частоті зрізу. Частота зрізу, обидва фільтри мають постійне затухання $0,5 A_{\max c}$, до якого додається постійне загасання смуги пропускання другого фільтра, яке через коливання не обов'язково приймає значення $0,5 A_{\max c}$, наведені причини сприяють збільшення смуги пропускання СФ.

Тому для отримання даного ЧФ потрібна додаткова конфігурація. Порядок ФНЧ визначається виразом (1.6)

$$n \geq \frac{\lg\left(\frac{\delta}{\varepsilon} + \sqrt{\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^2 - 1}\right)}{\lg(\varpi_{3T} + \sqrt{\varpi_{3T}^2 - 1})} \quad (1.6)$$

Оскільки фільтр проектується в ідеалізованих умовах основних характеристик існуючих компонентів, характеристики фільтра відхиляються від запланованих характеристик. Тому при проектуванні фільтрів використовується підхід «до спотворень» (9), тобто до фільтра висуваються більш жорсткі вимоги, ніж ті, що вказані в технічних завданнях. Наприклад, якщо необхідно розробити фільтр з $A \leq A_{\max} - \Delta A$, де ΔA є запасом для неідеальності компонента, неможливо гарантувати «запас» у пропускній здатності «до». Якщо обмеження на варіацію пропускної здатності не вказано, використовується метод «викривлення». Без них фільтр повинен бути налаштований для отримання заданої смуги пропускання, про що йшлося вище.

1.2 Аналіз вимог індивідуального завдання

Як зазначалося у вступі, основним питанням розробки технології фільтрації на даному етапі є зменшення розміру РЕА. Це скорочення відбувається за рахунок мініатюризації. При використанні традиційних схемних рішень можливості застосування ультрамініатюризації обмежені через неможливість зменшити розмір окремих елементів схеми в заданому діапазоні частот.

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

Одним із перших винайдених фільтрів був LC-фільтр, який зазвичай використовувався в діапазоні частот від кількох сотень Гц до кількох сотень кілогерц.

Вважається, що кращим є фільтр з вузькою перехідною смугою. Ослаблення в смузі затримування вказує на якість фільтра. Чим більше значення цієї величини, тим досконалішим є фільтр. Коефіцієнт передачі фільтра вказує на співвідношення вихідної та вхідної напруг. Оптимальнішим є значення, що перевищує одиницю. Маса нової розробки значно менша ніж аналога, що безсумнівно є перевагою. Ціна на даний виріб повинна пропорційно залежати від якісних показників фільтра і при цьому виріб повинен бути конкурентноспроможний на ринку.

Внаслідок принципової зміни конструкції виробу, а також зміни технології виготовлення планується вирішити поставлену задачу із технічним рівнем вищим, ніж існуючий. Разом з тим розробка буде мати вищу надійність, і простішою у налагодженні.

На основі технічного завдання розробляємо технічні вимоги до активного фільтра.

До електричних вимог відносяться:

1. Смуга пропускання 2 кГц²;
2. Максимальна ширина перехідної смуги 2 кГц;

3. Центральна частота смуги пропускання 4 кГц;
4. Тип фільтра - фазовий Бесселя 6-го порядку;
5. Пульсації ослаблення в смузі пропускання 2 дБ;
6. Мінімальне ослаблення в смузі затримування 20 дБ;
7. Джерело живлення двополярне ± 15 В;
8. Коефіцієнт передачі на нульовій частоті 10;
9. Опір навантаження 2 кОм;
10. Структура фільтра - каскадна.

Технічний рівень нової розробки навчального приладу отримується значно вищим, ніж у попередніх розробках, за рахунок використання більш нової елементної бази (напівпровідникові елементи, мікросхеми тощо).

Під час роботи пристрій не повинен створювати радіо завади, що заважають роботі інших електроприладів. В свою чергу інші електроприлади не повинні впливати на режим роботи проектного пристрою, тобто він повинен бути стійким до електромагнітних завад.

1.3 Каскадне проектування активних фільтрів

Існують два основні методи проектування активних фільтрів: метод прямої реалізації, який визначає всю схему фільтра та її параметри відповідно до заданих вимог; каскадний метод, який означає, що вимоги до фільтра розподіляються між каскадами. З'єднуються ланки, як правило, не більше третьої за порядком, після чого визначається схема кожної ланки та параметри її елементів [15].

Каскадна конструкція фільтрів є найбільш поширеною «з помірними вимогами до фільтрів» [9]. Причина цього полягає в тому, що в сучасних системах зв'язку значна частина обробки сигналів здійснюється за допомогою цифрових ВИС. Тому вимоги до периферійних аналогових фільтрів зазвичай скромні, і їх можна задовольнити відносно низькими полюсними Q-факторами та мінімальним енергоспоживанням. У цьому випадку проектування фільтра з каскадними

посиланнями на одному ОП є близьким до оптимального. Для високоякісних фільтрів, що вимагають високої добротності та низької чутливості, використовується каскад із кількох ОП.

Перший етап каскадного методу полягає в тому, щоб представити передаточну функцію розробленого фільтра n -го порядку у вигляді добутку передаточних функцій нижчого порядку (зазвичай не вище третього порядку).

$$H(p) = H_1(P) * H_2(P) * \dots * H_m(P), \quad (1.7)$$

де $m=n/2$, коли n – парне і всі $H_k(P)$ ($k=1; 2-m$) другого порядку та $m=(n+1)/2$, коли n – непарне, проте одна з $H_k(P)$ ($k=1; 2-m$) є першого порядку.

Реалізація передатної функції $H(P)$ згідно рівняння (1.7) здійснюється за схемою рис. 1.3.



Рисунок 1.3 - Каскадне з'єднання ланок фільтра

За умови відсутності між каскадами взаємного впливу, що забезпечується низьким вихідним опором операційних підсилювачів попередніх каскадів.

Передатна функція має вигляд для ланок першого порядку [16]

$$H(P) = \frac{M(P)}{P + \omega_p} \quad (1.8)$$

де „ ω_p ” це полюс передатної характеристики, а „ $M(P)$ ” це поліном нульового або першого порядку.

Для ланок другого порядку

$$H(P) = \frac{N(P)}{P^2 + \frac{\omega_p}{q_p} p + \omega_p^2} \quad (1.9)$$

де ω_p це частота полюсу, q_p це добротність полюсу, а $M(P)$ це поліном другого або меншого порядку. У табл. 1.1. наведені вирази поліномів $M(P)$ і $N(P)$ для ФНЧ, ФВЧ і СФ без сплесків ослаблена в слугі затримування [1], де H_0 і H_∞ - коефіцієнти передачі на нульовій і нескінченній частотах, а - на частоті полюсу.

Таблиця 1.1 – вирази поліномів для ФНЧ, ФВЧ і СФ.

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. наведені типові електричні схеми каскадів ФНЧ, що найбільш широко використовуються при проектуванні фільтрів каскадним методом. Внизу кожної зі схем наведені співвідношення, що визначають основні параметри ФНЧ (ω_p - частоту полюсу, q_p - добротність полюсу і H_0 - коефіцієнт передачі на нульовій частоті).

Рівняння передатної характеристики для обох схем ФНЧ однакове та визначається співвідношенням

$$H(P) = \frac{H_0 \omega_p^2 p}{p^2 + \frac{\omega_p}{q_p} p + \omega_p^2} \quad (1.10)$$

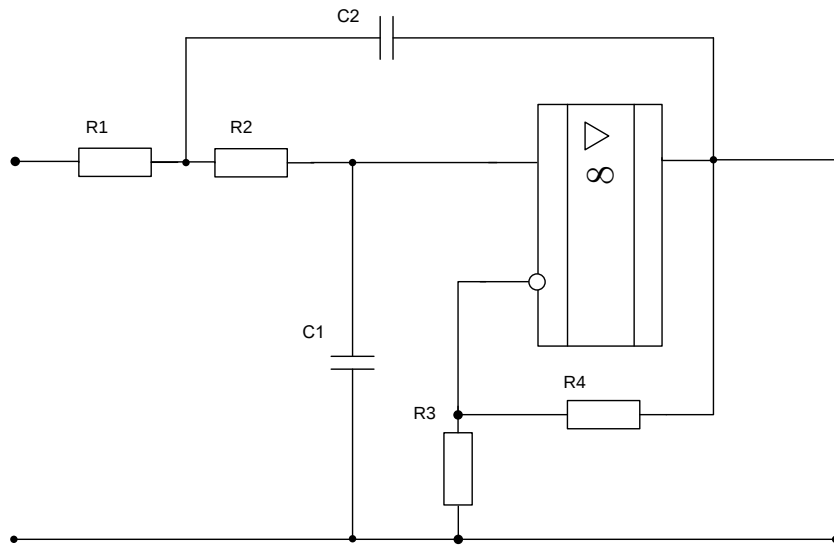


Рисунок 1.4 – Електрична схема каскаду ФНЧ з обмеженим коефіцієнтом підсилення

$$\omega_p^2 = 1/R_1 C_1 R_2 C_2 \quad (1.11)$$

$$q_p = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} / \left(1 + \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4 C_2}{R_3 C_1} \right) \quad (1.12)$$

$$H_0 = 1 + R_4/R_3 \quad (1.13)$$

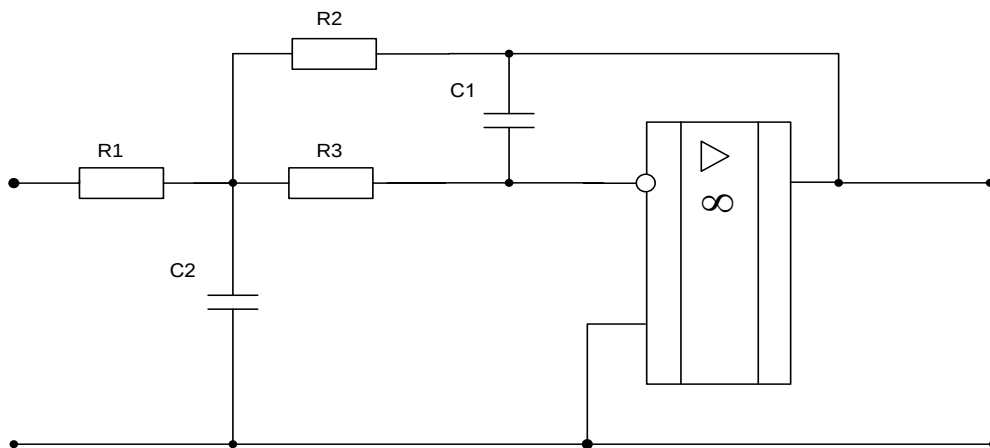


Рисунок 1.5 – Електрична схема каскаду ФНЧ з багатопетльовим зворотним зв'язком

$$\omega_p^2 = 1/C_1 R_2 C_2 R_3 \quad (1.14)$$

$$q_p = \sqrt{\frac{C_2 R_3}{C_1 R_3}} \left/ \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} \right) \right. \quad (1.15)$$

$$H_0 = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.16)$$

Співвідношення, наведені під кожною з схем, отримані в припущенні ідеального ОП, який має нескінченний вхідний опір ($R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$), нульовий вихідний опір ($R_{\text{вих}} = 0$) і нескінченний диференціальний коефіцієнт підсилення $K_0 \rightarrow \infty$. Оскільки відомі ОП мають обмежені значення $R_{\text{вх}}$, K_0 і мають не нульовий вхідний опір, тому наведені рівняння наближено достовірні. Для схеми рис. 1.4. умови реалізації мають вигляд [17]

$$R_1 + R_2 \ll R_{\text{вх}}, \quad \frac{1}{\omega_{\text{зр}} C_2} \ll R_{\text{вх}}, \quad \frac{1}{\omega_{\text{зр}} C_1} \gg R_{\text{вих}} \quad (1.17)$$

Для схеми рис. 1.5 умови реалізації мають вигляд [17].

$$R_2 \gg R_{\text{вих}}, \quad \frac{1}{\omega_{\text{зр}} C_1} \gg R_{\text{вих}}, \quad R_1 + R_3 \ll R_{\text{вх}} \quad (1.18)$$

Знаки нерівностей в умовах реалізації значать, що більша з величин повинна перевищувати меншу як мінімум в десять раз.

Крім того для обох схем ФНЧ коефіцієнт підсилення операційного підсилювача із розімкнутим зворотнім зв'язком має бути не менше ніж в 50 разів перевищувати значення АЧХ на частоті зрізу, а швидкість наростання напруги на виході (вольт за мікросекунду) має в $0,5\omega_{\text{зр}} 10^{-6}$ разів перевищувати максимальний розмах вихідної напруги [16].

1.4 Частотні перетворення в задачах проектування фільтрів

Характеристика фільтрів рис. 1.4. рис. 1.5. визначаються або добутком опорів та ємності $(R_k * C_m)$ або їх відношенням $(R_k/R_m, C_k/C_m)$. Тому характеристики фільтрів не зміняться при одночасному збільшенні (зменшенні) всіх опорів і зменшенні (збільшенні) ємності в однакову кількість разів [16].

Зазначені властивості дозволяють змінювати параметри елемента без зміни характеристик фільтра з дотриманням обмежень виконання умов реалізації (1.17), (1.18). Якщо всі резистори або окремі конденсатори змінюються (збільшуються або зменшуються) в K разів, то ті характеристики фільтра, які визначаються співвідношенням резисторів або конденсаторів, змінюються (збільшуються або зменшуються) в K разів. Зокрема, зміниться полюсна частота та частота зрізу фільтра. Остання властивість дозволяє змінювати пропускну здатність фільтра.

Важливим перетворенням частоти фільтра ARC є перетворення RC-CR, яке може визначити схему та параметри елемента фільтра низьких частот на основі відомої схеми та параметрів елемента фільтра низьких частот, а також конвертовану частоту, що є відносно двох загальних частот зрізу фільтра, частотна характеристика фільтра нижніх частот є геометрично симетричною [2]. Наприклад, якщо в схемі фільтра низької напруги Сален-Кей (рис. 1.4) замінити резистори конденсаторами, а конденсатори резисторами (крім резисторів R_3 і R_4 , які визначають коефіцієнт підсилення OP), тоді співвідношення

$$R_1 = \frac{1}{\omega_{zp} C'_1}; \quad R_2 = \frac{1}{\omega_{zp} C'_2}; \quad \frac{1}{\omega_{zp} C_1} = R'_1; \quad \frac{1}{\omega_{zp} C_2} = R'_2, \quad (1.19)$$

де штрихом позначені параметри елементів ФВЧ, тоді виникне схема ФВЧ з тією ж частотою зрізу та тими ж самими A_{max} і A_{min} . Відповідна електрична схема каскаду ФВЧ подана на рис. 1.6.

$$\omega_p^2 = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} \quad (1.20)$$

$$qp = \sqrt{\frac{C_1 R_1}{C_2 R_2}} \left/ \left(1 + C_1 / C_2 - \frac{R_1 * R_4}{R_2 * R_3} \right) \right. \quad (1.21)$$

$$H_\infty = 1 + R_4 / R_3 \quad (1.22)$$

де штрихи у елементів опущені.

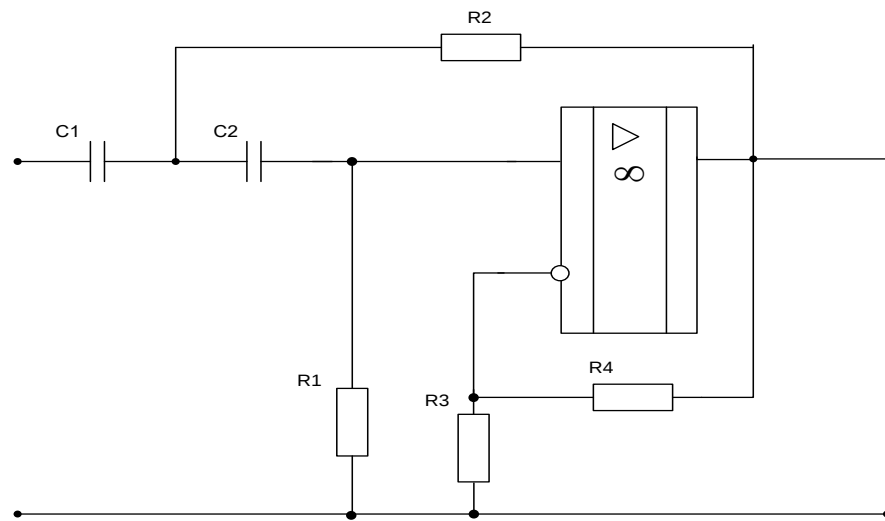


Рисунок 1.6 – Схема ФВЧ на ОП з обмеженим коефіцієнтом підсилення

Заміняючи в схемі рис. 1.5 опри ємностями і навпаки, отримаємо схему ФВЧ (рис. 1.7.) з багатопетльовим зворотнім зв'язком, параметри елементів.

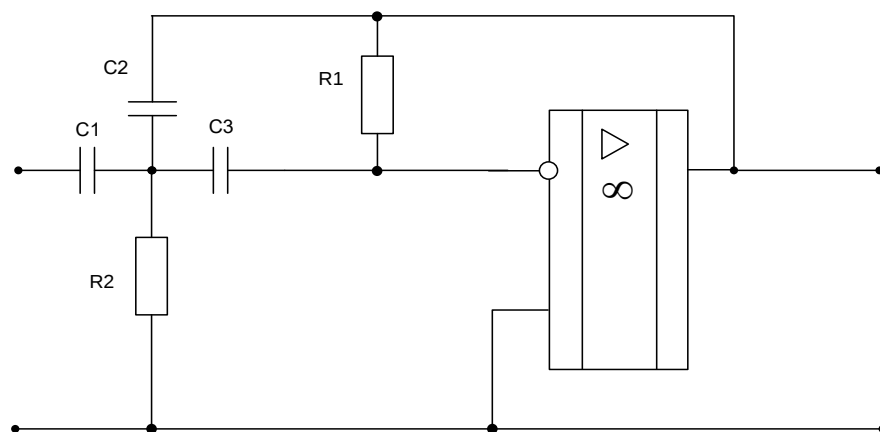


Рисунок 1.7 – Схема ФВЧ з багатопетльовим зворотнім зв'язком

$$\omega_p^2 = \frac{1}{R_1 C_2 R_2 C_3} \quad (1.23)$$

$$qp = \sqrt{\frac{R_1 C_3}{C_2 R_4}} \left/ \left(1 + \frac{C_1 + C_3}{C_2} \right) \right. \quad (1.24)$$

$$H_\infty = -\frac{C_1}{C_2} \quad (1.25)$$

Елементи схеми визначаються за співвідношенням (1.19) через параметри відповідних елементів прототипу фільтра НЧ. Безрозмірні частотні характеристики ВЧ, отримані перетворенням RC-CR, визначаються перетворенням LF-HF[2]

$$\omega' = -\frac{\omega_{zp}^2}{\omega} \quad (1.26)$$

де ω і ω' це кругові частоти відповідно ФНЧ і ФВЧ, ω_{zp} це частота зрізу, що однакова для обох схем фільтрів. Для операторної форми НЧ-ВЧ перетворення описується

$$P' = \frac{\omega_{zp}^2}{P} \quad (1.27)$$

Операторна характеристика ФВЧ, отримана з операторної характеристики ФНЧ (1.10) на підставі НЧ-ВЧ перетворення (1.27) має вигляд

$$H(P) = \frac{H_\infty P^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{q_p} + \omega^2 p} \quad (1.28)$$

де H_∞ - коефіцієнт передачі ФВЧ на нескінченній частоті. Параметри операторної характеристики (1.28) - H_∞ , ω_p і q_p визначаються рівняннями, наведеними під кожною з схем ФВЧ.

Умови реалізації для схеми рис. 1.6. і рис 1.7. визначаються співвідношенням (1.29) і (1.30), відповідно [17].

$$R_1 R_2 = \frac{1}{\omega_{zp} C_1}, \quad \frac{1}{\omega_{zp} C_2} \ll R_{вх}; \quad R_1 \gg R_{вих} \quad (1.29)$$

$$R_1, R_2 \ll R_{вх}; \quad R_1, \frac{1}{\omega_{zp} C_2} \gg R_{вих}. \quad (1.30)$$

Знаки нерівностей в виразах (1.29), (1.30) значать, що більша з величин повинна перевищувати меншу як мінімум в десять разів.

Оскільки коефіцієнт підсилення операційного підсилювача з розімкнутим зворотним зв'язком повинен як мінімум в 50 разів перевищувати значення АЧХ на частоті f_a це найбільшій потрібній частоті смуги пропускання, а швидкість його зростання (В/мкс) повинна бути в $\pi f_a * 10^{-6}$ разів перевищувати максимальний розмах вихідної напруги.

1.5 Чутливість характеристик та параметрів електричних схем фільтрів до зміни параметрів елементів

При проектуванні будь-якої технічної системи важливо, щоб відхилення параметрів компонентів від розрахункових параметрів змінювали характеристики та параметри системи порівняно з проектними параметрами.

Існує багато причин для відхилень у параметрах компонентів: через допуски в параметрах компонентів, через зміни температури та вологості, а іноді через тиск і старіння навколишнього середовища. Відхилення робочих характери-

стик фільтра від проектних обумовлено зміною параметрів, і прийнято оцінювати чутливість [18].

Чутливість функції або параметра фільтра до змін параметрів елемента визначається виразом

$$S_x^y = \frac{x}{y} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x} \quad (1.31)$$

де під x розуміють параметри пасивних елементів (опорів, ємностей) або коефіцієнт підсилення ОП тощо, а під y розуміють передатну характеристику фільтра, тобто, його АЧХ, добротність, частоту полюсу та ін.

Якщо характеристика чи параметр фільтра комплексні, тоді чутливість також комплексна

$$S_x^y = S_x^{|y|} + j \arg y \cdot S_x^{\arg y} \quad (1.32)$$

де $S_x^{|y|}$ це чутливість модуля, а $S_x^{\arg y}$ це чутливість аргументу. Тому зручніше оцінювати чутливість дійсних величин, маючи справу з модулями або аргументами, дійсними або уявними частинами величин комплексних.

Оскільки характеристики та параметри фільтра залежать від багатьох компонентів, концепція багатопараметричної чутливості прийнята для оцінки найгіршого випадку зміни фільтра, коли параметри багатьох компонентів змінюються одночасно, що визначається виразом [19]

$$S_\Sigma^y = \sum_i |S_{x_i}^y| \quad (1.33)$$

де додавання здійснюється по всім елементам схеми. Відносні характеристики або параметри фільтра, що викликані зміною багатьох елементів

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \sum_i S_{x_i}^y \frac{\Delta x_i}{x_i} \leq \sum_i \left| S_{x_i}^y \right| \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right|$$

Коли відносні зміни параметрів елементів не перевищують певної величини, тобто $|\Delta x_i/x_i| \leq h$, тоді відносні зміни характеристик цього фільтра в найгіршому випадку мають задовольняти такій умові

$$\frac{\Delta y}{y} \leq h \sum_i \left| S_{x_i}^y \right| = h * S_{\Sigma}^y \quad (1.34)$$

Оцінка відносних змін характеристик фільтра для найгіршого випадку (1.34) здебільшого виявляється високою та потребує суворих вимог на допуски елементів та їх стабільність. Тому у багатьох випадках використовують статистичну параметричну чутливість, яка враховує ймовірність певного відхилення параметрів елементу від оптимального значення [19]. Статистична багатопараметрична чутливістю визначається виразом (критерій Скоєфлера)

$$S_{\sqrt{r}}^y = \sqrt{\sum_i (S_{x_i}^y)^2} \quad (1.35)$$

При достатньо великій кількості елементів фільтра та статистично незалежних відхиленнях їх параметрів, тоді розподіл відносних відхилень характеристик цього фільтра $\Delta y/y$ наближається до нормального закону із нульовим середнім та дисперсією

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

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

Якщо допуски на всі елементи і закон розподілу однакові, то

$$\sigma_{\Delta y/y} = \sigma_{\Delta x/x} \sqrt{\sum (s_{x_i})^2} = \sigma_{\Delta x/x} * S_{\Sigma^2}^y \quad (1.37)$$

З властивостей нормального закону випливає, що в 68% випадків відхилення характеристики фільтра буде лежати в межах $\pm \sigma_{\Delta y/y}$, в 95% випадків в межах $\pm 2\sigma_{\Delta y/y}$, і в 99,7% випадків – в межах $\pm 3\sigma_{\Delta y/y}$.

Статистична багатопараметрична чутливість хоча й знижує вимоги на допуски елементів схеми фільтра, проте не дає достовірної гарантії, що характеристики цього фільтра не вийдуть за допустимі границі.

1.6 Настроювання активних фільтрів

У попередньому розділі було підкреслено, що характеристики фільтра можуть відрізнятися від проектних характеристик з різних причин. Але навіть незабаром після виготовлення характеристики фільтра можуть не відповідати характеристикам конструкції. У цьому випадку необхідно налаштувати фільтр або окремі його ланки [9].

Якщо відомий загальний вигляд частотної характеристики кожної ланки та її характерні точки, налаштування фільтра спрощується. На малюнку. На малюнку 1.8 показано два можливі варіанти АЧХ НЧ-фільтра другого порядку [16].

Положення максимуму амплітудно-частотної характеристики, що має місце за умов $q_p > 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ визначається виразами [16]

$$H_m = \frac{H_0 q_p}{\sqrt{1 - 1/4q_p^2}} \quad (1.38)$$

$$\omega_m = \omega_{zp} \overline{\omega_p} \sqrt{1 - 1/2q_p^2} \quad (1.39)$$

де $\overline{\omega_p}$ - нормована частота полюсу.

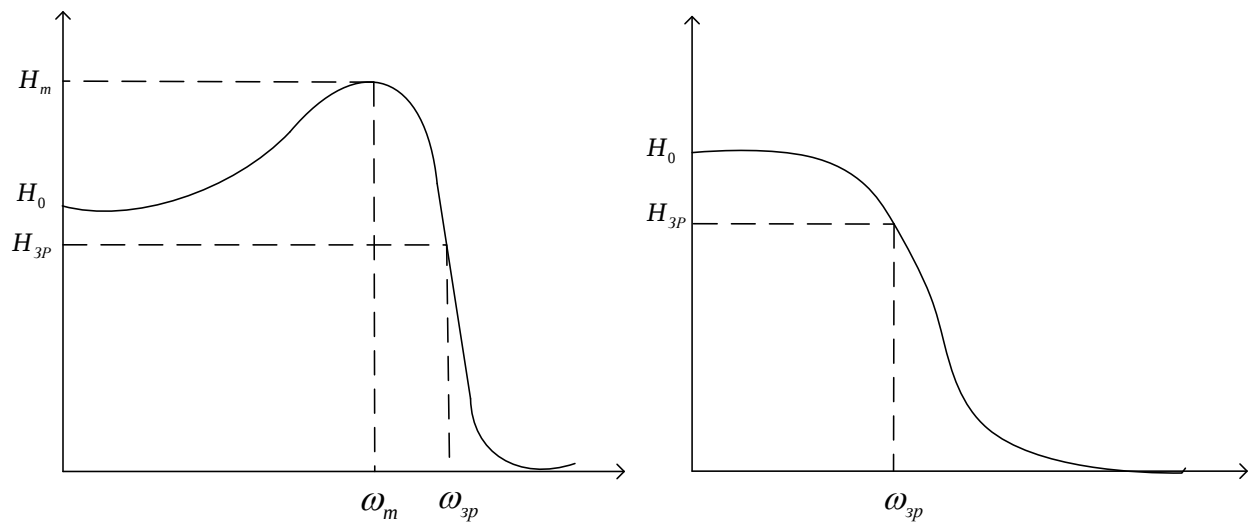


Рисунок 1.8 – АЧХ ФНЧ другого порядку:

а) $q_p > 0.707$

б) $q_p \leq 0.707$

На частоті зрізу

$$H_{3p} = \frac{H_0 \overline{\omega_{p^2}}}{\sqrt{(\overline{\omega_{p^2}} - 1)^2 + \frac{\overline{\omega_{p^2}}}{q_{p^2}}}} \quad (1.40)$$

Оскільки проектування фільтра здійснюється на підставі більш жорстких вимог до АЧХ, тому при настроюванні потрібно орієнтуватись на отримання потрібного значення АЧХ на частоті зрізу (3.40). Для ланки на основі ДНКН (рис. 1.4.) $H_0 = 1$ тому потрібне H_{3p} можна отримати зміною елементів, які впливають на добротність або частоту полюсу. Практично це простіше зробити зміною опорів $R1$ або $R2$. Для схеми з багатопетльованим зворотнім зв'язком зручно змінювати коефіцієнт H_0 , який визначається відношенням опорів $R1$ і $R3$.

Для каскадів ФВЧ другого порядку з характеристиками Чебишева АЧХ наведені на рис. 1.9 [16].

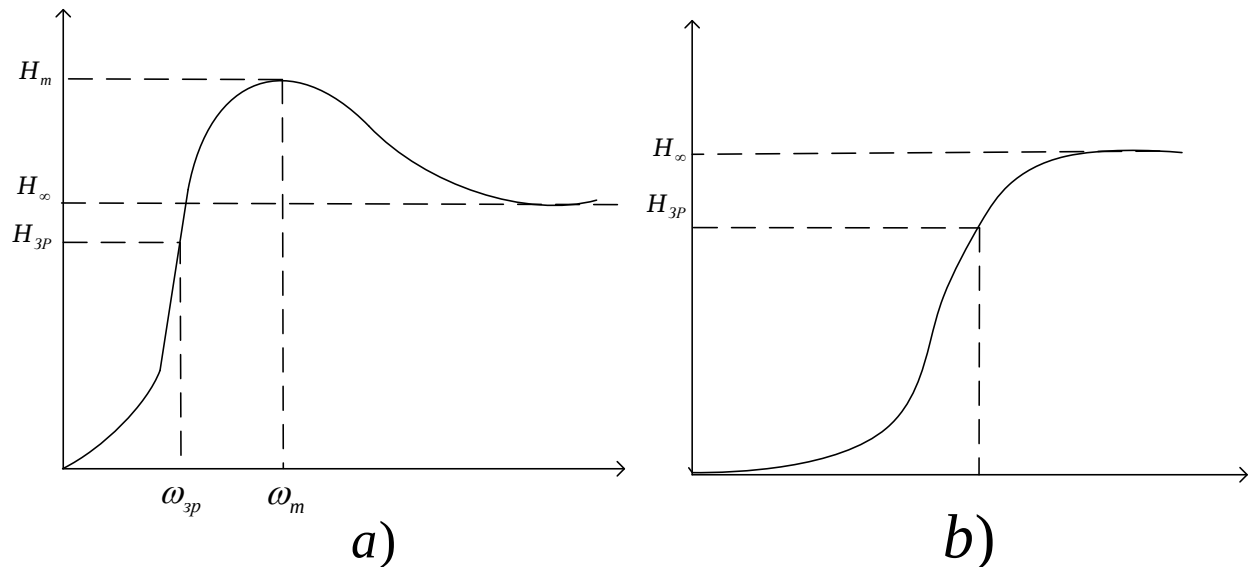


Рисунок 1.9 – АЧХ каскаду ФВЧ другого порядку:

а) $q_p > 0.707$

б) $q_p \leq 0.707$

Значення амплітудно-частотної характеристики каскадів ФВЧ в максимумі та на границі смуги пропускання збігається з відповідними значеннями амплітудно-частотної характеристики каскадів ФНЧ, а частота максимуму визначається виразом

$$\omega_m = \frac{\omega_{3p} \overline{\omega_p}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2q_p^2}}} \quad (1.41)$$

Налаштування каскадів ФВЧ можна також здійснити з метою отримання необхідного значення амплітудно-частотної характеристики каскадів на частоті зрізу і на частоті ω_m .

Налаштування смуги частот смугового фільтра на точне значення амплітудно-частотної характеристики каскаду на частоті зрізу може забезпечити точне значення амплітудно-частотної характеристики всього каскаду фільтрів на частоті зрізу, і точне значення його пропускну здатності. При проектуванні фільтра використовується метод попередніх спотворень для компенсації можливих відхилень амплітудно-частотних характеристик каскаду від розрахункових на інших частотах смуги пропускання.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АКТИВНОГО ФАЗОВОГО ФІЛЬТРА БЕССЕЛЯ

2.1 Розроблення структурної схеми фільтра

Як згадувалося раніше, існує кілька способів реалізації фільтрів у діапазоні низьких і субнизьких частот. Зокрема, найпоширенішим підходом є активна RC-фільтрація на основі операційного підсилювача [1]. Функція підсилювача полягає в тому, щоб компенсувати втрати енергії в резисторній частині схеми для отримання складних полюсів, необхідних для досягнення операторних характеристик, необхідних для фільтрів Баттерворта-Чебишева, Золотарьова-Каула та інших.

Залежно від вимог конкретного завдання цей фільтр відносять до широко-смугових, оскільки співвідношення верхньої і нижньої частот зрізу дорівнює 2.

$$(f_{zp_2} / f_{zp_1} = 4000/2000 = 2), \quad (2.1)$$

При каскадній реалізації широкосмугових фільтрів їх подають у вигляді каскадного з'єднання ланок ФНЧ і ФВЧ, внаслідок чого виникає структура показана на рис. 2.1.

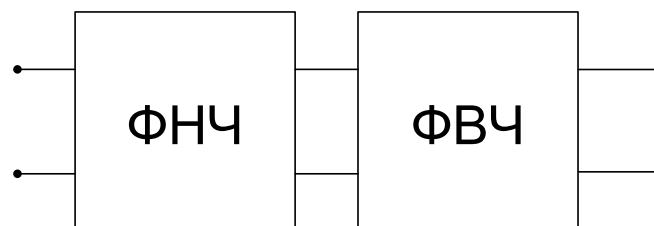


Рисунок 2.1 – Каскадне з'єднання ланок ФНЧ і ФВЧ

Оскільки згідно з технічним завданням максимальне постійне загасання в смузі пропускання не повинно перевищувати 2,3 дБ, то, враховуючи, що фактичні характеристики фільтра можуть відрізнятися від нормативних, ми будемо проектувати на основі більш жорстких вимог, тобто, приймаємо 2 дБ. Макси-

мальне постійне загасання всього фільтра розподіляється порівну між низько-частотними та високочастотними каскадами. За цих умов визначаються вимоги до НЧ і ВЧ (див. (1.4.)).

$$\begin{aligned} \text{ФНЧ: } f_{zp_2} &= 4\kappa\Gamma\Omega \quad A_{\max} = 1\text{дб} , \\ f_{zm_2} &= 5,6\kappa\Gamma\Omega \quad A_{\min} = 30\text{дб} , \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \text{ФВЧ: } f_{zp_1} &= 2\kappa\Gamma\Omega \quad A_{\max} = 1\text{дб} , \\ f_{zm_1} &= 1,4\kappa\Gamma\Omega \quad A_{\min} = 30\text{дб} . \end{aligned} \quad (1.3)$$

Порядок ФНЧ розраховуємо за виразами (1.2), (1.3) і (1.6), де

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1*1} - 1} = 0,500884712$$

$$\delta = \sqrt{10^{0,1*30} - 1} = 31,606961$$

$$\bar{w}_{zm} = \frac{5,6}{4} = 1,4$$

Підставляючи отримані результати в (1.6) отримаємо $n \geq 5,56$. Тому порядок ФНЧ беремо рівним 6 ($n = 6$).

Для ФВЧ величина ε і δ зберігаються, а в якості нормованої частоти затримки в виразі (1.6) береться нормовану частоту затримки ФНЧ – прототипу, яка визначається НЧ-ВЧ перетворенням (3.26): $\bar{w}_{zm} = 2/1,4 = 1,4285714$. Далі на підставі (1.6) знаходимо $n \geq 5,38$. Вибираємо для ФВЧ також порядок $n = 6$.

Таким чином ФНЧ і ФВЧ можна реалізовувати трьома ланками другого порядку. На рис. 2.2. наведена попередня структурна схема смугового фільтра, де кожна ланка має другий порядок.

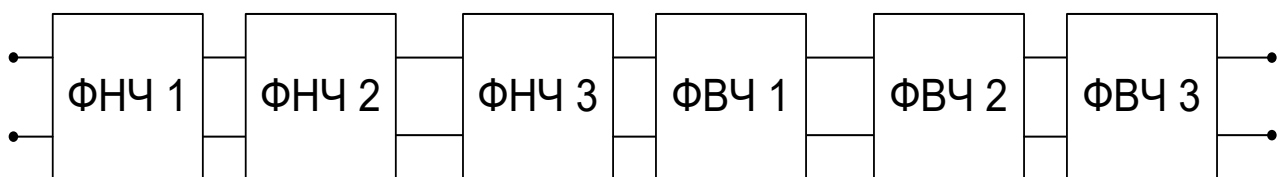


Рисунок 2.2 - Попередня структурна схема фазового фільтра Бесселя

Найбільш широко вживані типи ланок ФНЧ і ФВЧ при реалізації широко-смужових фільтрів наведені на рис. 1.4 - рис. 1.7.

2.2 Визначення порядку розташування ланок і їх параметрів

За умов відсутності взаємного впливу ланок (розв'язана реалізація) розташування ланок не обов'язково має відповідати рис. 2.1. Всього може бути $6!=720$ варіантів з однаковими АЧХ але іншими важливими характеристиками – динамічним діапазоном, стабільністю, шумами, втратами енергії в смузі пропускання, тощо. [20].

Критерії, якими керуються при розташуванні ланок, суперечливі, але найважливішими з них є [9].

При спряженні двох ланок спектр сигналу в смузі пропускання має лишатись найбільш плоским.

Добротність полюсів каскадно з'єднаних ланок зростає від входу до виходу.

Вхідна ланка фільтра має бути ланкою ФНЧ, а вихідна – ланкою ФВЧ.

Для задоволення сформульованих критеріїв при розташуванні ланок необхідно знати властивості ланок а саме їх АЧХ і добротність полюсів. Нормована операторна характеристика ФНЧ Чебишева шостого порядку визначається виразом [15].

$$\overline{H}(\overline{p}) = \frac{\overline{\omega}_{p_1}^{-2} \overline{\omega}_{p_2}^{-2} \overline{\omega}_{p_3}^{-2}}{\left(\overline{p}^2 + \frac{\overline{\omega}_{p_1}}{q_{p_1}} \overline{p} + \overline{\omega}_{p_1}^2 \right) \left(\overline{p}^2 + \frac{\overline{\omega}_{p_2}}{q_{p_2}} \overline{p} + \overline{\omega}_{p_2}^2 \right) + \left(\overline{p}^2 + \frac{\overline{\omega}_{p_3}}{q_{p_3}} \overline{p} + \overline{\omega}_{p_3}^2 \right)} \quad (1.4)$$

де $\overline{H}(\overline{p}) = H(\overline{p})/H_0$ (на коефіцієнт передачі на нульовій частоті) а величини $\overline{\omega}_{pk}$ і q_{pk} ($k=1,2,3$) мають зміст нормованої частоти полюсу і добротності, значення яких наведені у перших двох рядках табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення частот полюсів і добротності каскадів фільтра

k, l	1	2	3
$\bar{\omega}_{p_{HЧ}}$	0,353139	0,746806	0,995355
q_p	8,003692	2,197892	0,760870
$\omega_{p_{ВЧ}}$	2,831748	1,332035	1,004666

Операторну характеристику (2.3) можна подати у вигляді добутку трьох множників (див (1.7) при $m=3$), які після деформування визначаються

$$H_K(p) = \frac{H_{0K} \bar{\omega}_{pk} \omega_{zp_2}^2}{p^2 + \frac{\bar{\omega}_{pk} \omega_{zp_2}}{q_{pk}} p + \bar{\omega}_{pk} \omega_{zp_2}^2}, k=1,2,3. \quad (2.5)$$

де $H_K(p)$ - операторна характеристика другого порядку $\bar{\omega}_{pk} \omega_{zp_2} = \omega_{pk}$ - частота полюсу, q_{pk} - добротність а H_{0K} - коефіцієнт підсилення k -ої ланки на нульовій частоті. Коефіцієнт підсилення ланок мають задовольняти вимозі $H_0 = H_{01} H_{02} H_{03}$. В рівнянні (2.4) $\omega_{zp_2} = 2\pi f_{zp_2} = 8000\pi \text{с}^{-1}$ частота зрізу ФНЧ, яка збігається з більшою частотою зрізу смугового фільтра.

Операторні характеристики ланок ФВЧ можна отримати з (2.4) на підставі НЧ-ВЧ перетворення (1.27)

$$H_e(p) = \frac{H_{\infty e} p^2}{p^2 + \frac{\bar{\omega}_{pe} \omega_{zp_1}}{q_{pe}} p + \bar{\omega}_{pe} \omega_{zp_1}^2} \quad e=1,2,3. \quad (2.6)$$

де $H_e(p)$ - операторна характеристика ланки ФВЧ другого порядку $\bar{\omega}_{pe} \omega_{zp_1} = \omega_{pe}$ - частота полюсу, q_{pe} - добротність, а $H_{\infty e}$ - коефіцієнт підсилен-

ня e -ої ланки ФВЧ. Добротність полюсів ланок ФВЧ збігається з відповідними добротностями ланок ФНЧ і наведені в другому рядку табл. 2.1. нормовані частоти полюсів ланок ФВЧ обернені до частот полюсів ланок ФНЧ і наведені в третьому рядку табл. 1.2.

В рівнянні (2.5) $\omega_{zp_1} = 2\pi f_{zp_1} = 4000\pi \text{ c}^{-1}$ - нижня частота зрізу смугового фільтра. Коефіцієнт підсилення ланок ФВЧ повинен задовольняти вимозі $H_\infty = H_{\infty 1} H_{\infty 2} H_{\infty 3}$, де H_∞ - коефіцієнт підсилення ФВЧ, а $H_{\infty 1} H_{\infty 2} H_{\infty 3}$ - коефіцієнт підсилення його ланок на нескінченній частоті. Вигляд АЧХ ланок ФНЧ і ФВЧ для різних добротностей наведені на рис. 1.8. та 1.9 з яких видно, що нерівномірність АЧХ зростає з збільшенням добротності полюсів. Оскільки максими АЧХ ФНЧ і ФВЧ спостерігаються на різних частотах то для задовільнення першого критерія необхідно об'єднати в пари ланки ФНЧ і ФВЧ з однаковими добротностями. Для задовільнення другого критерія – першою має бути пара ланок ФНЧ і ФВЧ з мінімальною добротністю.

Для задовільнення третього критерія – входною ланкою СФ має бути низькодобротна ланка ФНЧ, а вихідна – високдобротна ланка ФВЧ.

Таким чином остаточна структурна схема смугового фільтра набуває вигляду рис. 2.3.

Коефіцієнт підсилення смугового фільтра на середній частоті, який дорівнює 16, можна багатьма способами розподілити між його ланками. Розподіл коефіцієнту підсилення може здійснюватись за різними критеріями [20]. Зокрема для збільшення відношення сигнал/шум на виході фільтра коефіцієнт підсилення ланок має зростати від входу до виходу. На рис. 4.3 наведені коефіцієнти підсилення ланок, вибір яких відповідає згаданому критерію, а також отриманню найбільш плоских АЧХ проміжних ланок СФ утворених суміжними ланками ФНЧ і ФВЧ.

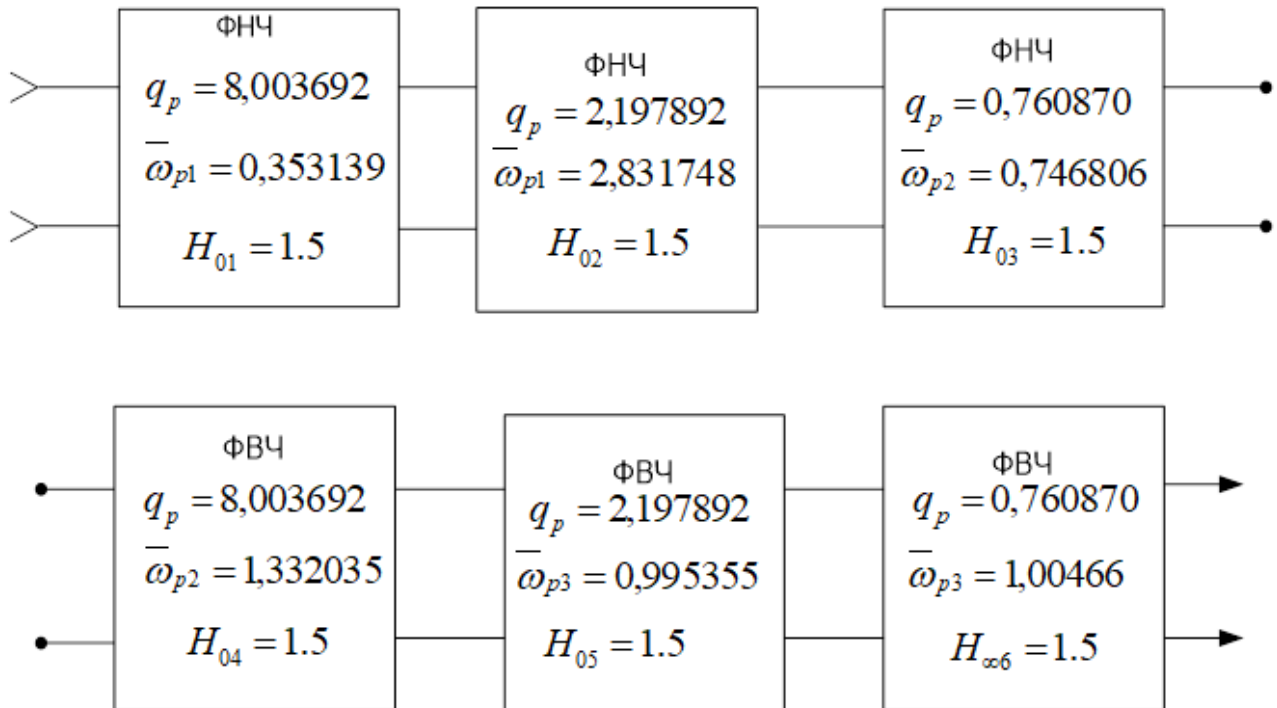


Рисунок 2.3 – Остаточна структурна схема смугового фільтра

2.3 Розроблення електричної принципової схеми фільтра

Найбільш широкоживані принципові схеми ланок ФНЧ і ФВЧ при каскадній реалізації активних RC-фільтрів наведені на рис. 1.4. - рис. 1.7. [16].

Схеми рис. 1.4. і рис. 1.6 – неінвертуючі, а схеми рис. 1.5 і рис. 1.7 – інвертуючі. Кожна зі схем застосовується для реалізації каскадів з добротностями і коефіцієнтами підсилення не вище 10 [16]. За такими критеріями обидві схеми каскадів ФНЧ і ФВЧ можуть бути використані для реалізації каскадів проектного фільтра. Оскільки за технічним завданням фільтра в цілому має бути неінвертуючим, то при використанні інвертуючих ланок їх кількість має бути парною. За кількістю RC-елементів слід віддати перевагу ланкам з багатопетльовим зворотнім зв'язком (рис. 1.5 і рис. 1.7). але для реалізації ланок з добротністю $q_p \leq 2$ в схемах рис. 1.4. і рис. 1.6 можна використати операційний підсилювач, що охоплений по інвертуючому входу стовідсотковим зворотним зв'язком, взяти опори $R_4 = 0$, а $R_3 = \infty$. У такому випадку кількість елементів у

схемі каскаду на рис. 1.5 і рис. 1.7 зменшиться, а коефіцієнт підсилення операційного підсилювача стає рівним одиниці [9].

Через це для реалізації низькодобротних ланок ($Q_p < 2$) ФНЧ і ФВЧ вибираємо ланки на основі ДНКН (рис. 1.4 і рис. 1.6), а для реалізації високдобротних ланок – схеми рис. 1.5 і рис. 1.7.

Таким чином принципова схема проектного смугового фільтра набуває вигляду рис. 2.4.

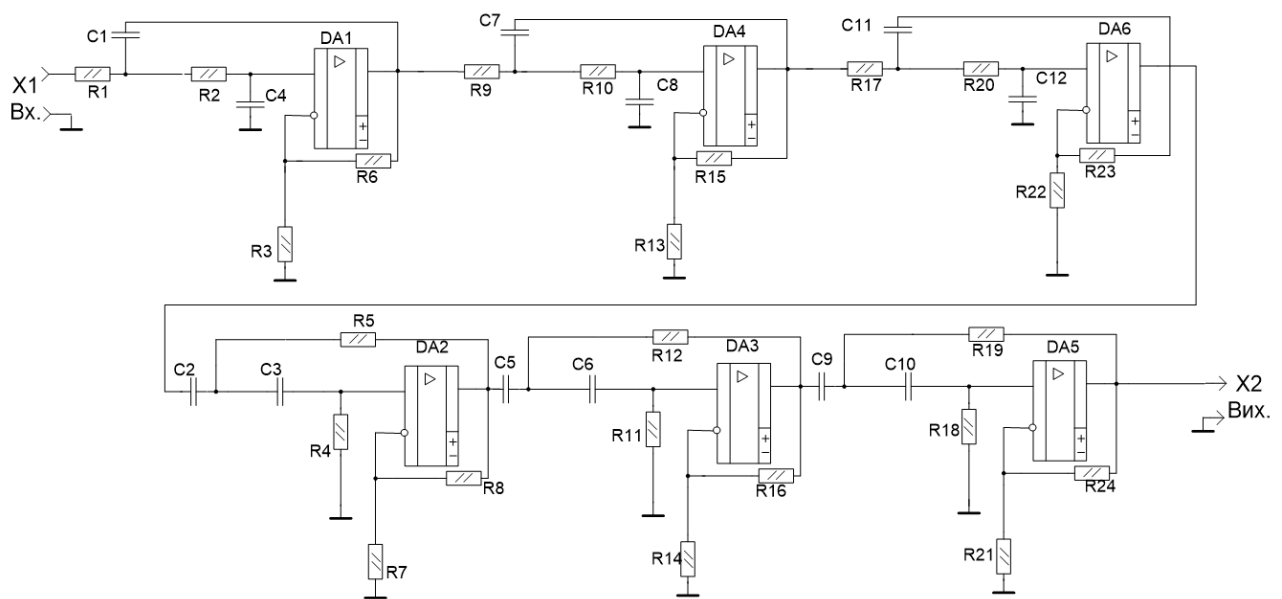


Рисунок 2.4 – Електрична принципова схема активного фазового фільтра Бесселя шостого порядку

2.4 Розрахунок параметрів пасивних елементів ланки ФНЧ

Ланки ФНЧ зібрані за схемою на ДНКН (джерело напруги кероване напругою). Ця схема реалізує не інвертуючий (додатній) коефіцієнт підсилення (див. рис. 2.5) .

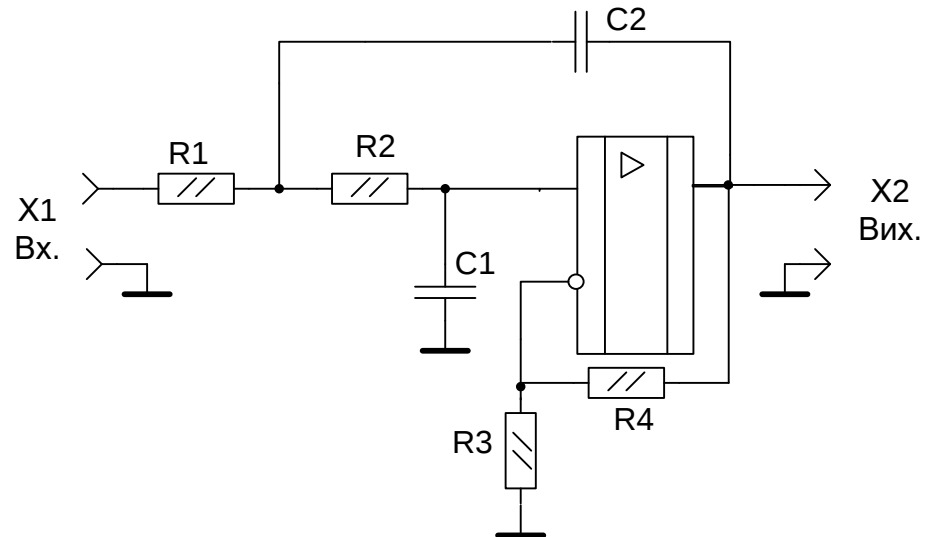


Рисунок 2.5 – Електрична схема ланка ФНЧ

Ємність C_2 вибирається близькою до значення $\frac{10}{f_{zp}}$ мкФ .

Ємність C_1 можна розрахувати за формулою

$$C_1 \leq \frac{[B^2 + 4C(K-1)]C_2}{4C}; \quad (2.7)$$

де B і C – нормовані коефіцієнти .

Резистори R_1, R_2, R_3, R_4 розраховують за наступними формулами

$$R_1 = \frac{2}{[BC_2 + \sqrt{[B^2 + 4C(K-1)]C_2^2 - 4CC_1C_2}] \omega_{zp}}; \quad (2.8)$$

$$R_2 = \frac{1}{CC_1C_2R_1\omega_{zp}^2}; \quad (2.9)$$

$$R_3 = \frac{K(R_1 + R_2)}{K-1}; \quad (2.10)$$

$$R_4 = K(R_1 + R_2); \quad (2.11)$$

2.4.1 Розрахунок 1-го каскаду ФНЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,124362$, $C=0,990732$, $K=1.5$

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 5123.1 = 32173.068 (\text{рад})$$

Вибираємо значення ємності C_2 :

$$C_2 = \frac{10}{5123} = 0.00195 \approx 0.002 (\text{мкФ}) = 2 \cdot 10^{-9} (\text{Ф});$$

Розрахуємо значення ємності C_1 :

$$C_1 \leq \frac{[0.124362^2 + 4 \cdot 0.990732(1.5-1)] \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 0.990732} \approx 10^{-9} (\text{Ф});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{2}{[0.124362 \cdot 2 \cdot 10^{-9} + \sqrt{[0.124362^2 + 4 \cdot 0.990732(1.5-1)](2 \cdot 10^{-9})^2 - 4 \cdot 0.990732 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}] \cdot 32173.068} = 1249652 (\text{Ом});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{0.990732 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9} \cdot 1249652 \cdot 32173.068^2} = 3901.6 (\text{Ом});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{1.5(1249652 + 3901.6)}{1.5 - 1} = 386600.4 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4 :

$$R_4 = 1.5(1249652 + 3901.6) = 193300.2 (\text{Ом}).$$

Номінали елементів потрібно обрати як умога точніше, тому: опір R1 буде складатись з резистора опором 120 кОм і підстроєчного резистора опором 10 кОм; резистор R2 буде складатись з резистора опором 3,7 кОм і підстроєчного резистора опором 470 Ом; резистор R3 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 380 кОм і 6,6 кОм; резистор R4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 190 кОм і 3,3 кОм.

2.4.2 Розрахунок 2-го каскаду ФНЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,339763$, $C=0,557720$, $K=1.5$

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 5123.1 = 32173.068 \text{ (рад)}$$

Вибираємо значення ємності C_2 :

$$C_2 = \frac{10}{5123} = 0.00195 \approx 0.002 \text{ (мкФ)} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)};$$

Розрахуємо значення ємності C_1 :

$$C_1 \leq \frac{[0.339763^2 + 4 \cdot 0.557720(1.5-1)]2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 0.557720} \approx 1.06 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{2}{[0.339763 \cdot 2 \cdot 10^{-9} + \sqrt{[0.339763^2 + 4 \cdot 0.557720(1.5-1)](2 \cdot 10^{-9})^2 - 4 \cdot 0.557720 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1.06 \cdot 10^{-9}}]} 32173.068 = 55501.5 \text{ (Ом)};$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{0.557720 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1.06 \cdot 10^{-9} \cdot 55501.5 \cdot 32173.068^2} = 14721.7 \text{ (Ом)};$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{1.5(55501.5 + 14721.7)}{1.5 - 1} = 2106696 \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4 :

$$R_4 = 1.5(55501.5 + 14721.7) = 1053348 \text{ (Ом)}.$$

Резистор R_1 буде складатись з резистора опором 50 кОм і підстроєчного резистора опором 10 кОм; резистор R_2 буде складатись з резистора опором 12 кОм і підстроєчного резистора опором 4,7 кОм; резистор R_3 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 200 кОм і 11 кОм; резистор R_4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 100 кОм і 5,2 кОм.

2.4.3 Розрахунок 3-го каскаду ФНЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,464125$, $C=0,124707$, $K=1.5$

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 5123.1 = 32173.068 \text{ (рад)}$$

Вибираємо значення ємності C_2 :

$$C_2 = \frac{10}{5123} = 0.00195 \approx 0.002 \text{ (мкФ)} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)};$$

Розрахуємо значення ємності C_1 :

$$C_1 \leq \frac{[0.464125^2 + 4 \cdot 0.124707(1.5 - 1)] 2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 0.124707} \approx 1.86 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1

$$R_1 = \frac{2}{\left[0.464125 \cdot 2 \cdot 10^{-9} + \sqrt{[0.464125^2 + 4 \cdot 0.124707(1.5-1)](2 \cdot 10^{-9})^2 - 4 \cdot 0.124707 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1.86 \cdot 10^{-9}}\right] \cdot 32173068} = 31435.2(\text{Ом});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2

$$R_2 = \frac{1}{0.124707 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1.86 \cdot 10^{-9} \cdot 31435.2 \cdot 32173068^2} = 66246.8(\text{Ом});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3

$$R_3 = \frac{1.5(31435.2 + 66246.8)}{1.5 - 1} = 293046(\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4

$$R_4 = 1.5(31435.2 + 66246.8) = 146523(\text{Ом}).$$

Резистор R_1 буде складатись з резистора опором 30 кОм і підстроєчного резистора опором 4,7 кОм; резистор R_2 буде складатись з резистора опором 63 кОм і підстроєчного резистора опором 4,7 кОм; резистор R_3 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 280 кОм і 13,5 кОм; резистор R_4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 140 кОм і 6,6 кОм.

2.5 Розрахунок параметрів пасивних елементів ланки ФВЧ

Ланки ФВЧ зібрані за схемою на ДНКН (джерело напруги кероване напругою). Ця схема реалізує не інвертуючий (додатній) коефіцієнт підсилення (див. рис. 2.6) .

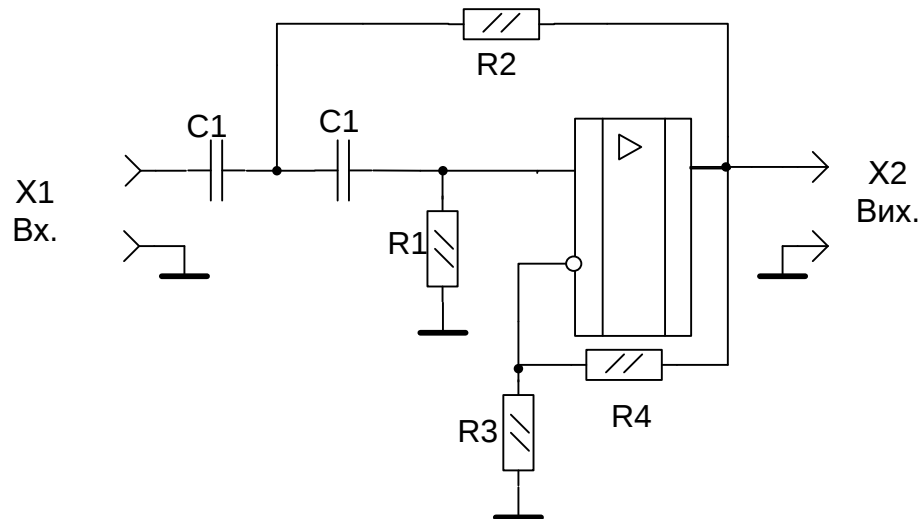


Рисунок 2.6 – Електрична схема ланки ФВЧ

Ємність C_1 вибирається близькою до значення $\frac{10}{f_{zp}}$ мкФ .

Резистори R_1, R_2, R_3, R_4 розраховують за наступними формулами

$$R_2 = \frac{4C}{\left[B + \sqrt{B^2 + 8C(K-1)} \right] \omega_{zp} C_1}; \quad (2.12)$$

$$R_1 = \frac{C}{C_1^2 R_2 \omega_{zp}^2}; \quad (2.13)$$

$$R_3 = \frac{K R_2}{K - 1}; \quad (2.14)$$

$$R_4 = K R_2; \quad (2.15)$$

де B і C – нормовані коефіцієнти.

2.5.1 Розрахунок 1-го каскаду ФВЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,124362$, $C=0,990732$, $K=1.5$

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 3123 = 1961244 (\text{rad})$$

Вибираємо значення ємності C_1

$$C_1 = \frac{10}{3123} = 0.0032 \approx 0.0033 (\text{мкФ}) = 3.3 \cdot 10^{-9} (\text{Ф});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2

$$R_2 = \frac{4 \cdot 0.990732}{\left[0.124362 + \sqrt{0.124362^2 + 8 \cdot 0.990732(1.5 - 1)}\right] 1961244 \cdot 3.3 \cdot 10^{-9}} = 28739.5 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1

$$R_1 = \frac{0.990732}{(3.3 \cdot 10^{-9})^2 28739.5 \cdot 1961244^2} = 8229.7 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3

$$R_3 = \frac{1.5 \cdot 28739.5}{1.5 - 1} = 86218.5 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4

$$R_4 = 1.5 \cdot 28739.5 = 43109.25 (\text{Ом}).$$

Резистор R_1 буде складатись з резистора опором 8 кОм і підстроєчного резистора опором 470 Ом; резистор R_2 буде складатись з резистора опором 28 кОм і підстроєчного резистора опором 2,2 кОм; резистор R_3 складається з двох

послідовно з'єднаних резисторів опором 80 кОм і 6,2 кОм; резистор R4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 42 кОм і 1,1 кОм.

2.5.2 Розрахунок 2-го каскаду ФВЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,339763$, $C=0,557720$, $K=1.5$

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 3123 = 1961244 (\text{rad})$$

Вибираємо значення ємності C_1

$$C_1 = \frac{10}{3123} = 0.0032 \approx 0.0033 (\text{мкФ}) = 3.3 \cdot 10^{-9} (\text{Ф});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2

$$R_2 = \left[\frac{4 \cdot 0.557720}{0.339763 + \sqrt{0.339763^2 + 8 \cdot 0.557720(1.5 - 1)}} \right] \frac{1}{1961244 \cdot 3.3 \cdot 10^{-9}} = 18417.6 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1

$$R_1 = \frac{0.557720}{(3.3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 18417.6 \cdot 1961244^2} = 7229.2 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3

$$R_3 = \frac{1.5 \cdot 18417.6}{1.5 - 1} = 55252.8 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4

$$R_4 = 1.5 \cdot 18417.6 = 27626.4 (\text{Ом}).$$

Резистор R1 буде складатись з резистора опором 7 кОм і підстроєчного резистора опором 470 Ом; резистор R2 буде складатись з резистора опором 18 кОм і підстроєчного резистора опором 2,2 кОм; резистор R3 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 50 кОм і 5,2 кОм; резистор R4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 26 кОм і 1,6 кОм.

2.5.3 Розрахунок 3-го каскаду ФВЧ

Для нього коефіцієнти $B=0,256666$, $C=0,532939$, $K=1$.

$$\omega_{zp} = 2\pi \cdot 3123 = 1961244 (\text{рад})$$

Вибираємо значення ємності C_1

$$C_1 = \frac{10}{3123} = 0.0032 \approx 0.0033 (\text{мкФ}) = 3.3 \cdot 10^{-9} (\text{Ф});$$

Розрахуємо значення опору резистора R_2

$$R_2 = \frac{4 \cdot 0.124707}{\left[0.464125 + \sqrt{0.464125^2 + 8 \cdot 0.124707(1.5 - 1)} \right] 1961244 \cdot 3.3 \cdot 10^{-9}} = 6540.7 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_1

$$R_1 = \frac{0.124707}{(3.3 \cdot 10^{-9})^2 6540.7 \cdot 1961244^2} = 4551.7 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_3

$$R_3 = \frac{1.5 \cdot 6540.7}{1.5 - 1} = 196221 (\text{Ом}).$$

Розрахуємо значення опору резистора R_4

$$R_4 = 1.5 * 6540.7 = 9811.05(\text{Ом})$$

Резистор R1 буде складатись з резистора опором 4,3 кОм і підстроєчного резистора опором 470 Ом; резистор R2 буде складатись з резистора опором 6,2 кОм і підстроєчного резистора опором 470 Ом; резистор R3 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 18 кОм і 1,6 кОм; резистор R4 складається з двох послідовно з'єднаних резисторів опором 8 кОм і 1,8 кОм.

2.6 Вибір типу операційного підсилювача

Параметри фільтруючого елемента визначаються для ідеального операційного підсилювача, який має нескінченне посилення, нескінченний вхідний і нульовий вихідний опір і нескінченну швидкість наростання вихідної напруги в нескінченному діапазоні частот. Характеристики реального ОП значно поступаються характеристикам ідеального ОП. Тому при виборі ОП необхідно виконати багато вимог, які називають 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. 1.4, (1.18) Рис. 1.5, (1.29) Рис. 1.6 і (1.30) Рис. 1.7 При остаточному виборі параметрів компонентів зв'язку враховувалися умови реалізації, припускаючи, що вхідний і вихідний опори ОП становлять 3 МОм і 100 Ом відповідно.

Крім умов реалізації, які мають певні обмеження на вхідний і вихідний опір ОУ, його одинична частота посилення також повинна відповідати умовам [22]

$$f_1 \geq f_{zp_2} H_0, \quad (4.16)$$

де H_0 це коефіцієнт підсилення каскаду f_1 це частота одиничного підсилення операційного підсилювача, а f_{zp_2} це більша з частот смугового фільтра. Оскільки у всіх каскадів коефіцієнт підсилення не перевищує 1,5, а частота $f_{zp_2} = 4000$

Гц, тоді частота одиничного підсилення операційного підсилювача повинна бути не меншою 6000 Гц.

Коефіцієнт підсилення ОП з розімкнутим зворотним зв'язком в крайньому разі в 50 разів має перевищувати коефіцієнт підсилення в робочому режимі. Оскільки коефіцієнт підсилення ланок фільтра не перевищує 2-х при досить низькій верхній частоті зрізу $f_{зр_2} = 4000 \text{ Гц}$, то цій вимозі задовольняє більшість сучасних ОП, в тому числі ОП M101A1V характеристики якого наведені в табл. 5.1. [1].

Таблиця 2.2 – Основні параметри ОП M101A1V

Параметр	Значення
Вхідний струм (нА)	1500
Вхідний опір (МОм)	$5 \cdot 10^3$
Коефіцієнт підсилення напруги (разів)	$2 \cdot 10^4$
Частота одиничного підсилення (МГц)	10
Вихідний опір (Ом)	150
Максимальний вихідний струм (мА)	10
Максимальна вихідна напруга (В)	+/- 10
Напруга живлення (В)	+/- 15
Струм споживання (мА)	8

Перевіряємо виконання вимоги до швидкості наростання вихідної напруги та її максимальної амплітуди.

Швидкість зростання вихідної напруги (В/мкс) при якій не виникають не-лінійні спотворення, повинна перевищувати $0.5\omega_{зр} \cdot 2 \cdot 10^{-6} U_{вих.макс}$, тобто $U_{ш} > 0.5\omega_{зр} \cdot 2 \cdot 10^{-6} U_{вих.макс}$. Для ОП M101A1V $U_{ш} = 2 \text{ В/мкс}$, $U_{вих.макс} = 12.5 \text{ В}$, а більша частота зрізу фільтра $f_{зр} = 4000 \text{ Гц}$. Тому права частина нерівності складає $1.26 \cdot 10^{-6} \text{ В/мкс}$, що значно менше лівої частини. Таким чи-

ном ОП КР М101А1V задовольняє вимогам до підсилювального елементу фільтра.

2.7 Чутливість характеристик ланок фільтра до зміни параметрів елементів

Внаслідок того, що проектування фільтра здійснюється за вимогами до форми амплітудо-частотної характеристики, тому найбільший інтерес являє чутливість саме АЧХ до зміни параметрів елементів. Аналіз чутливості АЧХ дозволяє визначити допуски на параметри пасивних елементів.

Існує багато методів визначення чутливості АЧХ, але для схем з обмеженою кількістю компонентів найбільш ефективним є метод знакової функції [18]. Щоб використовувати його, вам потрібно мати аналітичний вираз, який передає функцію. Аналітичний вираз для передавальної функції ланки LNP (1-й, 3-й і 5-й каскади на рисунку 2.4) визначається будь-яким методом теорії кіл і має наступний вигляд

$$\begin{aligned}\underline{H}_1(j\omega) &= \frac{1}{1 - R_1 C_1 R_2 \omega^2 + j\omega C_1 (R_1 + R_2)} \\ H_3(j\omega) &= \frac{-R_8 / R_7}{1 - C_5 C_6 R_8 R_9 \omega^2 + j\omega C_5 (R_7 R_8 + R_8 R_9 + R_9 R_7)} \\ H_6(j\omega) &= \frac{-R_{15} / R_{14}}{1 - C_{10} C_{11} R_{15} R_{16} \omega^2 + j\omega C_{10} (R_{14} R_{15} + R_{15} R_{16} + R_{16} R_{14})}\end{aligned}$$

Чутливості АЧХ схеми каскадів ФНЧ знайдені на підставі виразів (1.31), (1.32) і (2.7)-(2.11), з використанням параметрів елементів наведених у табл. 2.3, визначаються співвідношеннями

Для 1-го каскаду

$$\begin{aligned}S_R^{|H_1|} &= -1 + (1 - 2.76602 \cdot 10^{-2} \omega^2 / \omega_{p1}^2) \cdot \mathcal{D}_1^{-1} \\ S_{R2}^{|H_1|} &= -1 + (1 - 2.449948 \cdot 10^{-1} \omega^2 / \omega_{p1}^2) \cdot \mathcal{D}_1^{-1} \\ S_{C1}^{|H_1|} &= -1 + (1 - 2.449948 \cdot 10^{-1} \omega^2 / \omega_{p1}^2) \cdot \mathcal{D}_1^{-1}\end{aligned}$$

$$S_{C2}^{|H_1|} = -1 + (1 + 7.273449 \cdot 10^{-1} \omega^2 / \omega_{p1}^2) \cdot \mathcal{D}_1^{-1}$$

де

$$\mathcal{D}_1 = 1 - 2.726551 \cdot 10^{-1} \omega^2 / \omega_{p1}^2 + \omega^4 / \omega_{p1}^4$$

Для 3-го каскаду

$$S_{R7}^{|H_3|} = -1 + 0.087895567 \mathcal{D}_3^{-1} \omega^2 / \omega_{p3}^2$$

$$S_{R8}^{|H_3|} = -1 + (1 - 0.9560522 \cdot 10^{-1} \omega^2 / \omega_{p3}^2) \cdot \mathcal{D}_3^{-1}$$

$$S_{R9}^{|H_3|} = -1 + (1 - 0.9248354 \omega^2 / \omega_{p3}^2) \cdot \mathcal{D}_3^{-1}$$

$$S_{C5}^{|H_3|} = -1 + (1 - \omega^2 / \omega_{p3}^2) \cdot \mathcal{D}_3^{-1}$$

$$S_{C6}^{|H_3|} = -1 + (1 - 0.792942 \omega^2 / \omega_{p3}^2) \cdot \mathcal{D}_3^{-1}$$

де

$$\mathcal{D}_3 = 1 - 1.792992 \omega^2 / \omega_{p3}^2 + \omega^4 / \omega_{p3}^4$$

Для 5-го каскаду

$$S_{R14}^{|H_5|} = -1 + (7.68049 \omega^2 / \omega_{p5}^2) \cdot \mathcal{D}_5^{-1}$$

$$S_{R15}^{|H_5|} = (1 - 0.995821 \omega^2 / \omega_{p5}^2) \cdot \mathcal{D}_5^{-1}$$

$$S_{R16}^{|H_5|} = -1 + (1 - 0.9955483 \omega^2 / \omega_{p5}^2) \cdot \mathcal{D}_5^{-1}$$

$$S_{C10}^{|H_5|} = -1 + (1 - \omega^2 / \omega_{p5}^2) \cdot \mathcal{D}_5^{-1}$$

$$S_{C11}^{|H_5|} = -1 + (1 - 0.9843894 \omega^2 / \omega_{p5}^2) \cdot \mathcal{D}_5^{-1}$$

Чутливості схеми каскадів ФВЧ знаходяться на підставі НЧ-ВЧ перетворення і визначаються виразами:

Для 2-го каскаду

$$S_{R4}^{|H_2|} = 1 - (1 - \omega_{p2}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_2^{-1},$$

$$S_{R5}^{|H_2|} = 1 - (1 + 1.273449 \cdot 10^{-1} \omega_{p2}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_2^{-1},$$

$$S_{C3}^{|H_2|} = 1 - (1 - 2.76602 \cdot 10^{-1} \omega_{p2}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_2^{-1},$$

$$S_{C4}^{|H_2|} = 1 - (1 - 2.449948 \cdot 10^{-1} \omega_{p2}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_2^{-1},$$

де

$$\mathcal{D}_2 = 1 - 2.726551 \cdot 10^{-1} \omega_{p2}^2 / \omega^2 + \omega_{p2}^4 / \omega^2.$$

Для 4-го каскаду

$$S_{R11}^{|H_4|} = 1 - (1 - \omega_{p4}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_4^{-1}$$

$$S_{R12}^{|H_4|} = 1 - (1 - 0.792992 \omega_{p4}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_4^{-1}$$

$$S_{C7}^{|H_4|} = 1 - (8.7895567 \cdot 10^{-2} \omega_{p4}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_4^{-1}$$

$$S_{C8}^{|H_4|} = 1 - (1 - 0.9560522 \omega_{p4}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_4^{-1}$$

$$S_{C9}^{|H_4|} = 1 - (1 - 0.9248354 \omega_{p4}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_4^{-1}$$

$$\mathcal{D}_4 = 1 - 1.792992 (\omega_p / \omega)^2 + (\omega_p / \omega)^4$$

Для 6-го каскаду

$$S_{R18}^{|H_6|} = 1 - (1 - \omega_{p6}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_6^{-1}$$

$$S_{R19}^{|H_6|} = 1 - (1 - 0.9843894 \omega_{p6}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_6^{-1}$$

$$S_{C12}^{|H_6|} = 1 - (7.6804549 \omega_{p6}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_6^{-1}$$

$$S_{C13}^{|H_6|} = -(1 - 0.995821 \omega_{p6}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_6^{-1}$$

$$S_{C14}^{|H_6|} = 1 - (1 - 0.9555483 \omega_{p6}^2 / \omega^2) \cdot \mathcal{D}_6^{-1}$$

де

$$\mathcal{D}_6 = 1 - 1 - 1.9843894 \omega_{p6}^2 / \omega^2 + \omega_{p6}^4 / \omega^6$$

В табл. 2.3 наведені значення чутливостей ланок ФНЧ, розраховані на граничних частотах і частотах полюсів.

Таблиця 2.3 – значення чутливостей на граничних частотах і частотах полюсів

Ланки ФНЧ	$F, \text{Гц}$ S	0	3123	5123	f_p
1	$S_{R1}^{ H_1 }$	0	-0,1887965	-0,9876701	-0,437090
	$S_{R2}^{ H_1 }$	0	-0,8862179	-1,0152827	-0,562910
	$S_{C1}^{ H_1 }$	0	-1,2246529	-1,111207	-1
	$S_{C2}^{ H_1 }$	0	-0,4503615	-0,8917458	0
2	$S_{R7}^{ H_3 }$	-1	-0,4008109	-0,8424083	-0,5754001
	$S_{R8}^{ H_3 }$	1	1,4386273	-0,71418668	0,212300
	$S_{R9}^{ H_3 }$	0	0,4738552	-1,6582167	-0,636900
	$S_{C5}^{ H_3 }$	0	0,3890329	-1,7924825	-1
	$S_{C6}^{ H_3 }$	0	0,6226389	-1,4218291	0
3	$S_{R14}^{ H_5 }$	-1	-0,9965572	-0,5107167	-0,5079975
	$S_{R15}^{ H_5 }$	1	1,3300179	-0,32418171	0,26710271
	$S_{R16}^{ H_5 }$	0	0,3301401	-1,30681258	-0,7148284
	$S_{C10}^{ H_6 }$	0	0,3281447	-1,59040539	-1
	$S_{C11}^{ H_6 }$	0	0,3351421	-0,5959342	0

Оскільки схеми каскадів ФВЧ отримані зі схем каскадів ФНЧ через частотні перетворення, тому чутливість схеми каскадів ФВЧ до зміни параметрів елементів збігаються з відповідними чутливостями схеми каскадів ФНЧ за модулем, але протилежні за знаком [14]. Так в таблиці 5.8 чутливості першої схеми каскаду ФНЧ пов'язані з чутливостями другої схеми каскаду ФВЧ

$$S_{R1}^{|H_1|} = -S_{C3}^{|H_2|}; S_{R2}^{|H_1|} = -S_{C4}^{|H_3|}; S_{C1}^{|H_1|} = -S_{R4}^{|H_3|}; S_{C2}^{|H_1|} = -S_{R5}^{|H_3|}.$$

Аналогічні вирази мають місце для інших пар схем каскадів ФНЧ та ФВЧ, що пов'язані НЧ-ВЧ перетвореннями.

2.8 Визначення допусків на параметри елементів

Через те, що передатна характеристика СФ визначається виразом (3.7) (при $m=6$), то передатна АЧХ також визначається добутком передатних АЧХ окремих ланок. Тому, при визначенні чутливості СФ до зміни параметрів елементів ланок виразом (1.31), чутливість всього фільтра збігається з відповідною чутливістю ланки [9].

Результати розрахунку чутливості схеми каскадів АЧХ фільтра для найгіршого випадку знайдені за співвідношенням (1.33) і даними таблиці 2.4, наведені у таблиці

Таблиця 2.4 – Чутливості АЧХ фільтра

f, Гц	3123	5123
$S_{\Sigma}^{ H(\omega) }$	20.989992	29.52716

Визначення параметрів елементів СФ проведено на підставі $A_{\max}=2\text{дБ}$, в той час, як за технічним завданням $A_{\max}=2,3\text{дБ}$, різниця $A_{\max}=0,3\text{дБ}$ є допуском

на відхилення постійної ослаблення, що зумовлена розкидом параметрів елементів. Рівняння відносного відхилення АЧХ має вигляд

$$\frac{\Delta H(\omega)}{H(\omega)} = 10^{0.05\Delta A_{\max}} - 1 \approx 3.51422 \cdot 10^{-2}.$$

Оскільки відносне відхилення частотної характеристики в термінах найгіршої чутливості пов'язане співвідношенням (1.3), враховуючи, що ми отримуємо

$$\frac{\Delta H(\omega)}{H(\omega)} \leq h S_{\Sigma}^{|H(\omega)|} \leq 3.51422 \cdot 10^{-2}.$$

Для частоти $f=5123$ Гц, на якій чутливість на найгірший випадок максимальна допуск на елемент складає

$$h = \frac{\Delta X}{X} \leq 1.1901652 \cdot 10^{-3}$$

Досягти отриманих значень допуску технічно складно. Тому необхідно відмовитися від визначення допусків параметрів компонентів за найгіршим критерієм вибору, який дає стовідсоткову гарантію досягнення АЧХ у заданому діапазоні.

Ми будемо використовувати статистичну багатопараметричну чутливість (критерій Скофлера) (2.35). Результати розрахунків статистичної багатопараметричної чутливості наведено в таблиці. 2.5.

Таблиця 2.5 – Статистична багато параметрична чутливість фільтра.

f, Гц	3123	5123
$S_{\sqrt{}}^{ H(\omega) }$	4.4375488	6,0332869

У випадку, коли допуски всіх компонентів і функція розподілу ймовірностей відхилення параметрів компонента від номінальних значень однакові, середньостатистичне відхилення АЧХ від проектного значення задається виразом (1.37) для частоти $f = 5123$ Гц (згідно з таблицею 2.2 найгірший випадок) буде записаний як

$$\sigma_{\Delta H/H} = 6.0332869 \sigma_{\Delta X/X}$$

Для випадку нормального закону розподілу імовірність відхилення $\sigma_{\Delta X/X} = h/3$, де h це допуск на елемент [17].

Оскільки відносне відхилення АЧХ від розрахункового значення не повинно перевищувати межі, визначені виразом (5.17), АЧХ не відхилятиметься від меж у 68% випадків, якщо допуски параметрів компонентів задовольняють наступним умовам [17]

$$3.51422 \cdot 10^{-6} \geq 6.0332869 \cdot \frac{h}{3},$$

звідки знаходимо $h \leq 1.7474 \cdot 10^{-2}$.

Таким чином, вимоги до допуску є досить суворими (менше 2%) на основі статистичної багатопараметричної чутливості. З цього випливає, що для реалізації SF на елементах з допуском, що перевищує 1%, необхідно налаштувати фільтр. Резистори і конденсатори вибираємо з допуском 5%, але послідовно з постійним (основним) резистором включаємо регулюючий резистор. Номінали послідовно з ними постійних і регулюючих резисторів наведені в таблиці 2.2 і таблиці 2.7.

2.9 Настроювання пропонованого фільтру

Амплітудно-частотні характеристики ланок визначаються трьома параметрами – частотою полюсу, добротністю і коефіцієнтами передачі на нульові частоті ФНЧ і на нескінченній частоті для ФВЧ. У ланок з одиничним коефіцієн-

том передачі (перша і друга ланки рис.2.1), настроювання підлягають тільки частота полюсу і добротність, а у інших ланок і коефіцієнт передачі. Оскільки ємність конденсаторів з номіналами в кілька тисяч пФ і вище відрегулювати практично важко, рекомендується замінити цю операцію підбором потрібного конденсатора, оскільки їх ємності відрізняються на 5%.

В цьому випадку настроювання ланок фільтра здійснюється тільки підстроєчними опорами.

Настроювання ланок заключається в тому, щоб забезпечити теоретичні максимальні значення коефіцієнтів передачі H_m та частоті ω_m (див. (1.38) і (1.39)) і на частоті зрізу (див. 1.40). В табл. 2.6 наведені дані, які визначають екстремуми (максимуми) амплітудно-частотної характеристики каскадів ФНЧ і значення на частоті зрізу $f=5123$ Гц і нульовій частоті

Аналогічні дані для АЧХ ланок ФВЧ наведені у табл. 2.7 (частота зрізу $f_{зр}=3123$ Гц).

Таблиця 2.6 – Екстремуми АЧХ для ланок ФНЧ

Ланка ФНЧ	1	2	3
F_m , Гц	521.55147	2828.4093	3.9658526
U_m	1.0094241	4.5141447	16.038712
$H_{зр}$	0.12587361	1.999960	15888979
H_0	1	2	2

Таблиця 2.7 – Екстремуми АЧХ для ланок ФВЧ

Ланка ФВЧ	4	5	6
f_m , Гц	15333.851	2828, 4446	2017,2206
H_m	1,0094241	4,5141447	16,038712
$H_{зр}$	0,12587361	1,999960	15,888919
H_0	1	2	2

Настроювання ланок фільтра складається з 2-етапів:
детерміністське настроювання,
функціональне настроювання.

Детерміноване коригування передбачає приведення номінального значення елемента до розрахункового значення. На практиці конденсатори слід підбирати так, щоб їх ємність була максимально наближена до розрахункового значення. Розраховане значення опору встановлюється за допомогою налаштованого резистора.

Функціональне регулювання виконується при індивідуальній роботі кожної ланки SF шляхом зміни опору підстроювального резистора на частотах f_m і f_{zp} і встановлення розрахункового значення коефіцієнта пропускання (див. табл. 2.6) і табл. 2.7).

Оскільки коефіцієнт пропускання на частоті ω_m залежить лише від Q-фактора (див. 3.38), тоді як коефіцієнт пропускання на частоті f_{zp} залежить як від Q-фактора, так і від полюсної частоти, рекомендується спочатку встановити розрахункове значення H_m , змінивши одиницю. підстроювальних резисторів. Значення опору другого регульовального резистора використовується для регулювання частоти f_m , а потім розраховане значення H_{sp} встановлюється шляхом зміни значення опору другого регульовального резистора на частоті f_{sp} . і знову повертається до налаштування H_m на частоті f_m і так далі. На завершальному етапі контролюється частотна характеристика всього фільтра в процесі його роботи і при необхідності вносяться додаткові налаштування.

3 РОЗДІЛ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РОЗРАХУНКІВ

3.1 Конструкторський розрахунок друкованої плати

3.1.1 Розрахунок розмірів друкованих провідників

При проектуванні розрахунків необхідно враховувати параметри друкованих провідників: товщину, ширину, форму, розміщення, відстань між провідниками. Розрахунок виконується за методикою, описаною в [18].

Ширина друкованих провідників залежить від сили струму, що протікає по ним. Допустиме значення струму провідника можна визначити за формулою (3.1)

$$I=25av, \quad (3.1)$$

де a – це товщина друкованого провідника; v – це ширина друкованого провідника.

При $a=0.66$ мм можна розрахувати величину струму в амперах, який рівний ширині друкованого провідника в міліметрах. В цьому випадку нагрівання провідника не перевищить 25 0С [18]. Приймаючи величину падіння напруги в друкованому провіднику не більше 0.03 В при максимальному струмі 0.03 А, робимо висновок, що при товщині провідника 0.06 мм, їх ширина повинна бути не менше 0.45 мм.[18] в широких місцях і 0.3 мм у вузьких.

3.1.2 Розрахунок розмірів контактних площадок.

Мінімальний діаметр контактної площадки визначений за умови збереження цілостності контактної площадки при свердлінні отворів. Розрахунок діаметра контактної площадки проводиться за формулою (3.2)

$$D=D_{\min}+1.5h_{\phi}, \quad (3.2)$$

де $D_{\min}$ – це мінімальний ефективний діаметр при свердлінні плати; h_{ϕ} – це товщина мідної фольги на діелектрику.

Мінімальний ефективний діаметр контактної площадки визначений по формулі (3.3)

$$D_{\min} = 2 \cdot \left(B_{\Pi} + \frac{d_{\max}}{2} + O_{\text{отв}} + O_{\text{кп}} \right), \quad (3.3)$$

де $d_{\max}$ – максимальний діаметр просвердленого отвору;

$O_{\text{отв}}$ – це похибка свердління отвору;

$O_{\text{кп}}$ – це похибка розташування контактної площадки при її виготовленні;

B_{Π} – це відстань від краю поверхні отвору до краю контактної площадки.

Максимальний діаметр отвору визначений по формулі (3.4).

$$d_{\max} = d_{\text{св}} + O_{\text{отв}}, \quad (3.4)$$

де $d_{\text{св}}$ – це діаметр свердла.

Похибка просвердленого отвору визначена по формулі (3.5)

$$O_{\text{отв}} = O_o + O_{\phi} \quad (3.5)$$

де O_o – це похибка розташування отвору відносно координатної шкали, обумовлена неточністю свердління верстата; O_{ϕ} – похибка базування плати на верстаті.

З урахуванням рекомендацій [18] прийнято $O_o = 0.2$ мм; $O_{\phi} = 0.02$ мм; $d_{\text{св}} = 0.8$ мм. У такому випадку похибка просвердленого отвору і максимальний діаметр отвору рівні: $O_{\text{отв}} = 0.22$ мм; $d_{\max} = 1.02$ мм.

При виготовленні контактної площадки похибка розташування визначена по формулі (3.6)

$$O_{\text{кп}} = O_{\text{п}} + O_{\text{з}} + \frac{O_{\text{п}} + O_{\text{з}}}{2}, \quad (3.6)$$

де $O_{\text{п}}$ – це похибка розташування контактної площадки при її фіксуванні ($O_{\text{п}}=0.08$ мм); $O_{\text{з}}$ – похибка розташування базових отворів на фотошаблоні ($O_{\text{з}}=0.03$ мм).

Тоді згідно з (3.6) похибка розташування контактної площадки буде рівним: $O_{\text{кп}}=0.165$ мм.

Прийнявши $B_{\text{п}}=0.05$ мм, мінімально ефективний діаметр контактної площадки буде дорівнювати $D_{\text{мін}}=1.89$ мм. Так як прийнята в п.3.1 товщина друкованого провідника складає $h_{\text{ф}}=0.06$ мм, то згідно з (3.2) діаметр контактної площадки дорівнює $D=1.98$ мм.

На фотошаблоні мінімальний діаметр вікна для контактної площадки визначений по формулі (3.7)

$$D=D-dE, \quad (3.7)$$

де $D=1.98$ мм – це діаметр контактної площадки; $dE=0.04$ мм – похибка діаметра контактної площадки фотокопії.

Тоді згідно з (3.7) мінімальний діаметр вікна на фотошаблоні для контактної площадки дорівнює

$$D=1.98-0.04=1.95 \text{ (мм)}$$

На фотошаблоні максимальний діаметр вікна для контактної площадки визначений по формулі (3.8)

$$D=D+dP, \quad (3.8)$$

де dP – це похибка при виготовленні вікна фотошаблону.

Тоді згідно з (3.8) максимальний діаметр вікна фотошаблону для контактної площадки рівний

$$D=1.98+0.04=2.02 \text{ (мм)}.$$

Максимальний діаметр контактної площадки визначений по формулі

$$D=D+dE \quad (3.9)$$

$$D=2.02+0.04=2.06 \text{ (мм)}.$$

3.1.3 Розрахунок відстані між провідниками

Мінімальна відстань між провідниками визначена по формулі (3.10)

$$S_{MIN} = I - \left(\frac{D_{MAX}}{2} + O_{III} + \frac{t_{MAX}}{2} + O_t \right), \quad (3.10)$$

де $I=2.5$ мм – це відстань між центрами елементів які розглядаються;

$O_{III}=0.04$ мм – це похибка фотошаблону;

$O_t=0.04$ мм – це похибка розташування провідників відносно координатної сітки на фотошаблоні.

Тоді, згідно [19] мінімальна відстань між провідниками дорівнює

$$S_{MIN} = 2.5 - \left(\frac{1.58}{2} + 0.04 + \frac{2.36}{2} + 0.04 \right) = 0.45 \text{ (мм)}.$$

3.1.4 Розрахунок електричних параметрів друкованої плати

Наявність базових ізоляторів з великими значеннями діелектричної провідності відповідає за появу з'єднувальних паразитних ємностей і власних ємностей провідника. Основну частину значення ємності створює поле, укладене діелектриком.

Значення паразитної ємності визначається по формулі (3.11)

$$C_{\Pi} = 8.87 \cdot \varepsilon - 3 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{l_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}{D_{MAX}} \right), \quad (3.11)$$

де l_{Π} – це довжина взаємопаралельних провідників ($l_{\Pi}=130$ мм); b_{Π} – ширина друкованого провідника ($b_{\Pi}=1$ мм).

Тоді величина паразитної ємності дорівнює

$$C_{\Pi} = 8.87 \cdot 6 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 6 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{0.13 \cdot 0.001}{1.58 \cdot 10^{-3}} \right) = 0.4 (\text{пФ})$$

Індуктивність друкованих провідників визначається за формулою (3.12)

$$L = 0.2 \cdot l_{\Pi} \cdot \left(2.3 \cdot \lg \left(\frac{l_{\Pi}}{a + b_{\Pi}} \right) + 0.2235 \left(\frac{a + b_{\Pi}}{l_{\Pi}} \right) + 0.6 \right), \quad (3.12)$$

$$L = 0.2 \cdot 0.13 \cdot \left(2.3 \cdot \lg \left(\frac{0.13}{0.06 \cdot 10^{-3} + 0.001} \right) + 0.2235 \left(\frac{0.06 \cdot 10^{-3} + 0.001}{0.13} \right) + 0.6 \right) = 111 (\text{мкГн})$$

Отже, індуктивність друкованих провідників становить 111 мкГн. Опір ізоляції друкованої плати для кіл, які розташовані на поверхні визначається за формулою (3.13)

$$R_s = \frac{\rho_s \cdot l}{S}, \quad (3.13)$$

де ρ – це питомий поверхневий опір ізоляції основи;

S – це довжина ізоляційного зазору;

l – це ізоляційний зазор розугоджених кіл.

Тому опір ізоляції становить

$$R_s = \frac{10 \cdot 15}{0.285 \cdot 10^{-4}} = 5.26 (\text{Мом}).$$

Потужність втрат друкованої плати визначається за формулою (3.14)

$$P_B = 2 \cdot P \cdot I \cdot f \cdot C \cdot U \cdot \text{tg} \theta, \quad (3.14)$$

де f – це максимальна робоча частота;

C – це ємність друкованої плати;

$\text{tg} \theta$ – це тангенс кута діелектричних втрат (для матеріалу СФ-1-35-1.5 $\text{tg} \theta = 0.003$);

Ємність друкованої плати визначається за формулою (3.15)

$$C = \frac{0.09 \cdot \varepsilon \cdot F}{H_{\Pi}}, \quad (3.15)$$

де F – сумарна площа друкованих провідників;

H_{Π} – товщина плати діелектрика.

$$C = \frac{0.09 \cdot 0.4 \cdot 153.3}{1.5} = 296 (\text{пФ})$$

Отже, згідно (3.14) втрати потужності друкованої плати $P = 5,13$ мВт.

Тому під час проектних розрахунків друкованої плати розраховуються геометричні розміри провідників і контактних майданчиків, визначається мінімально допустима відстань між елементами схемотехніки провідника, розраховуються електричні параметри друкованої плати.

3.2 Розрахунок надійності

3.2.1 Оцінка експлуатаційної надійності смугового RC – фільтра

При розрахунку сумарної інтенсивності відмов РЕА $\lambda_{\text{РЕА}}$ користуються виразом (3.16)

$$\lambda_{PEA} = K_{AM} \cdot K_{OBSL} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_{Ei}, \quad (3.16)$$

де λ_{PEA} – це сумарна інтенсивність відмов PEA;

λ_{Ei} – це експлуатаційна інтенсивність відмов i -го типу елементу;

n – це кількість типів елементів.

Значення K_{AM} – (коефіцієнт, який залежить від амортизації PEA), при наявності системи амортизації у виробі приймаємо рівним 0.85.

Значення K_{OBSL} – (коефіцієнт, який залежить від якості технічного обслуговування PEA), для виробів загального призначення приймають рівним 0.6. Проведемо оцінку експлуатаційної інтенсивності відмов (EIV) інтегральних мікросхем згідно методики яка наведена в [20]. В результаті розрахунку інтенсивність відмов для мікросхеми M101A1V складає $\lambda_{EIMC}=0.15 \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$.

Визначення експлуатаційної інтенсивності відмов конденсаторів

Проведемо визначення експлуатаційної інтенсивності відмов конденсаторів згідно методики [20].

Для визначення EIV керамічних конденсаторів постійної ємності скористаємось наступною математичною моделлю

$$\lambda_{E(KPE)} = \lambda_{OC.G} \cdot K_p \cdot K_e \cdot K_c, \quad (3.17)$$

де $\lambda_{OC.G}$ – інтенсивність відмов даного типу елементу. Що відповідає температурі навколишнього середовища 25 0C і номінальному електричному навантаженню;

K_p – це коефіцієнт режиму, що залежить від електричного навантаження і (або) температури навколишнього середовища;

K_e – це коефіцієнт, що залежить від умов експлуатації;

K_c – це коефіцієнт, що залежить від величини номінальної ємності.

$$\lambda_{E(KПЕ)} = 0.05 \cdot 10^{-6} \cdot 0.03 \cdot 1 \cdot 0.04 = 6 \cdot 10^{-10} \text{ (1/год)}$$

Розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмов резисторів. Для визначення ЕІВ постійних резисторів скористаємось математичною моделлю наступного виразу

$$\lambda_{E(ПР)} = \lambda_{OC.Г} \cdot K_P \cdot K_E \cdot K_R \cdot K_M, \quad (3.18)$$

де K_R – це коефіцієнт, який залежить від величини номінального опору;

K_M – це коефіцієнт, який залежить від величини номінальної потужності.

$$\lambda_{E(ПР)} = 0.01 \cdot 10^{-6} \cdot 0.51 \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 0.7 = 2.86 \cdot 10^{-9} \text{ (1/год)}$$

Визначення ЕІВ підстроювальних недротяних резисторів згідно математичної моделі виду

$$\lambda_{E(ЗР)} = \lambda_{OC.Г} \cdot K_P \cdot K_C \cdot K_R \cdot K_{S1}, \quad (3.19)$$

$$\lambda_{E(ЗР)} = 0.01 \cdot 10^{-6} \cdot 0.6 \cdot 1 \cdot 1.4 \cdot 1 = 8.4 \cdot 10^{-9} \text{ (1/год)}$$

Визначимо загальну ЕІВ резисторів

$$\lambda_{E\Sigma\text{резист}} = 2.86 \cdot 10^{-9} + 8.4 \cdot 10^{-9} = 1.126 \cdot 10^{-8} \text{ (1/год)}.$$

Розрахунок інтенсивності відмов НЧ з'єднань. Для визначення ЕІВ НЧ з'єднань прямокутної форми для друкованого монтажу скористаємось математичною моделлю наступного виду [20]

$$\lambda_{EZ} = \lambda_{OC.Г} \cdot K_P \cdot K_{KK} \cdot K_{K3} \cdot K_C, \quad (3.20)$$

де K_{KK} – це коефіцієнт, який залежить від кількості задіяних контактів;

K_{KC} – це коефіцієнт, який залежить від кількості з'єднань-роз'єднань.

$$\lambda_{E3} = 0.005 \cdot 10^{-6} \cdot 0.51 \cdot 1.87 \cdot 0.39 \cdot 1 = 1.86 \cdot 10^{-9} \text{ (1/год)}$$

Розрахунок сумарної інтенсивності відмов.

Сумарна інтенсивність відмов смугового активного RC – фільтра (не враховуючи елементи пайки) буде рівна

$$\lambda_{E,CF} = 0.85 \cdot 0.6 \cdot (0.15 \cdot 10^{-6} + 6 \cdot 10^{-10} + 1.126 \cdot 10^{-8} + 1.86 \cdot 10^{-9}) = 6.9 \cdot 10^{-8} \text{ (1/год)}$$

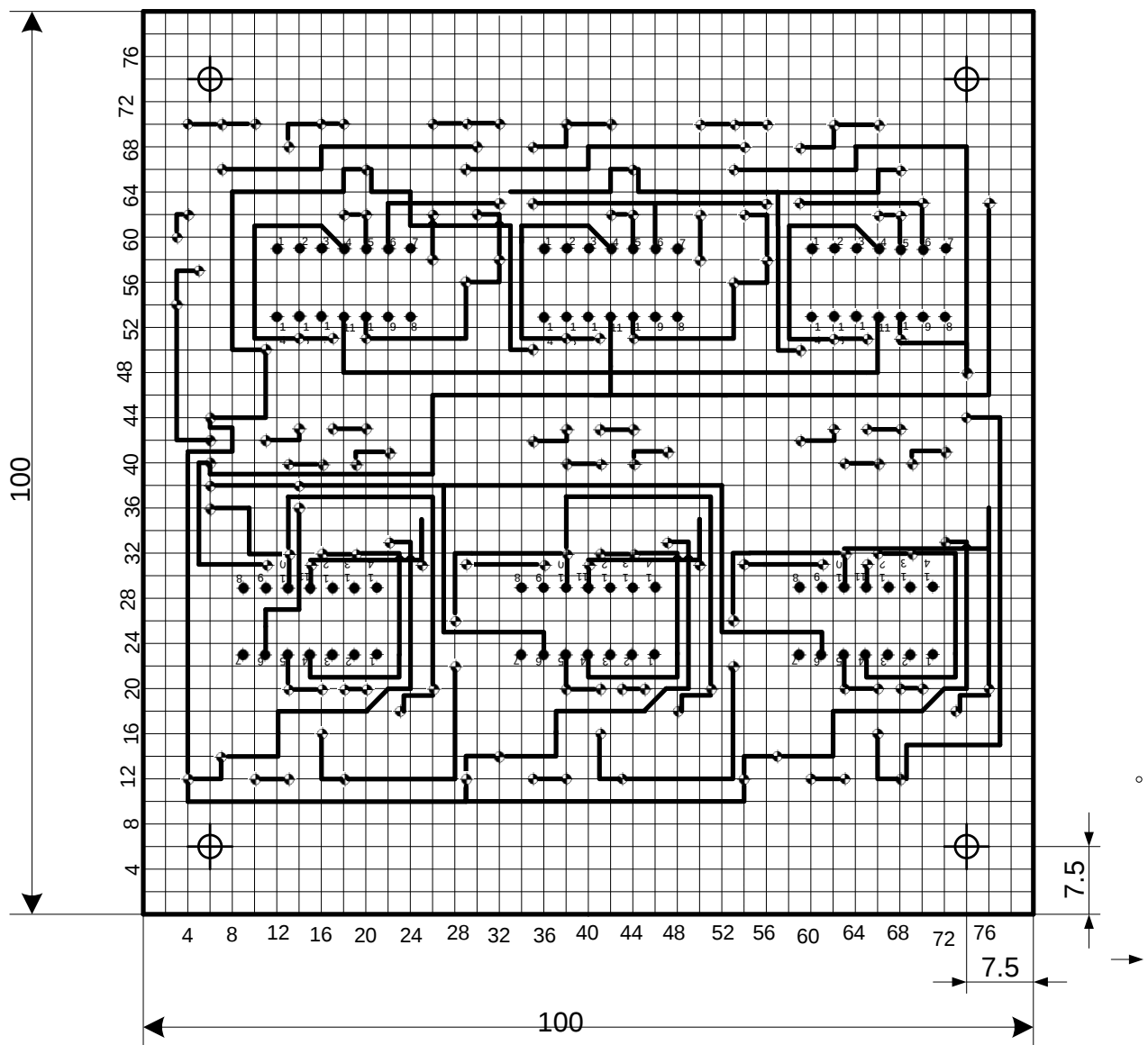


Рисунок 3.1 – Топологія друкованої плати пристрою

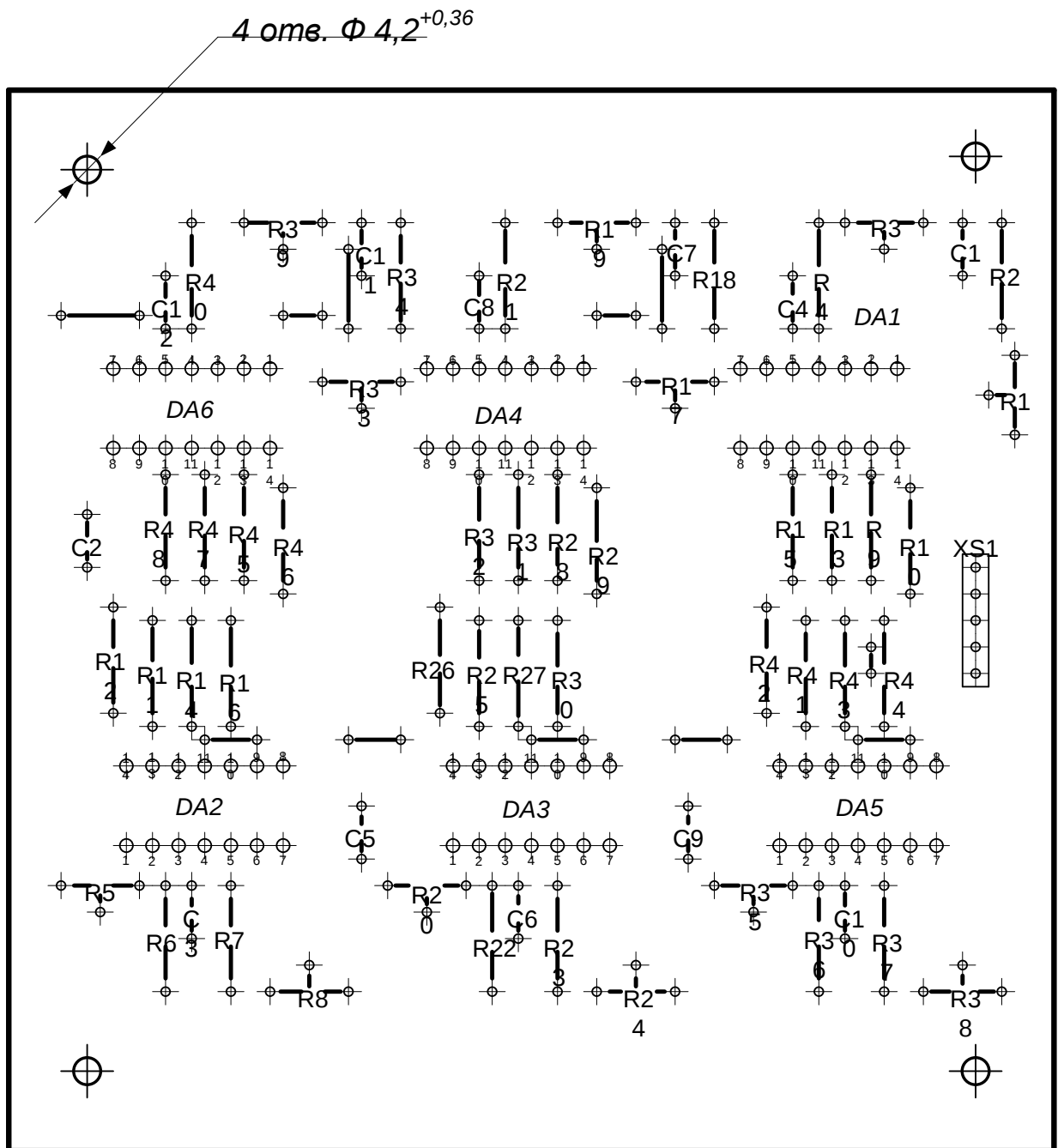


Рисунок 3.2 – Маркування місць встановлення радіокомпонентів на друкованій платі пристрою

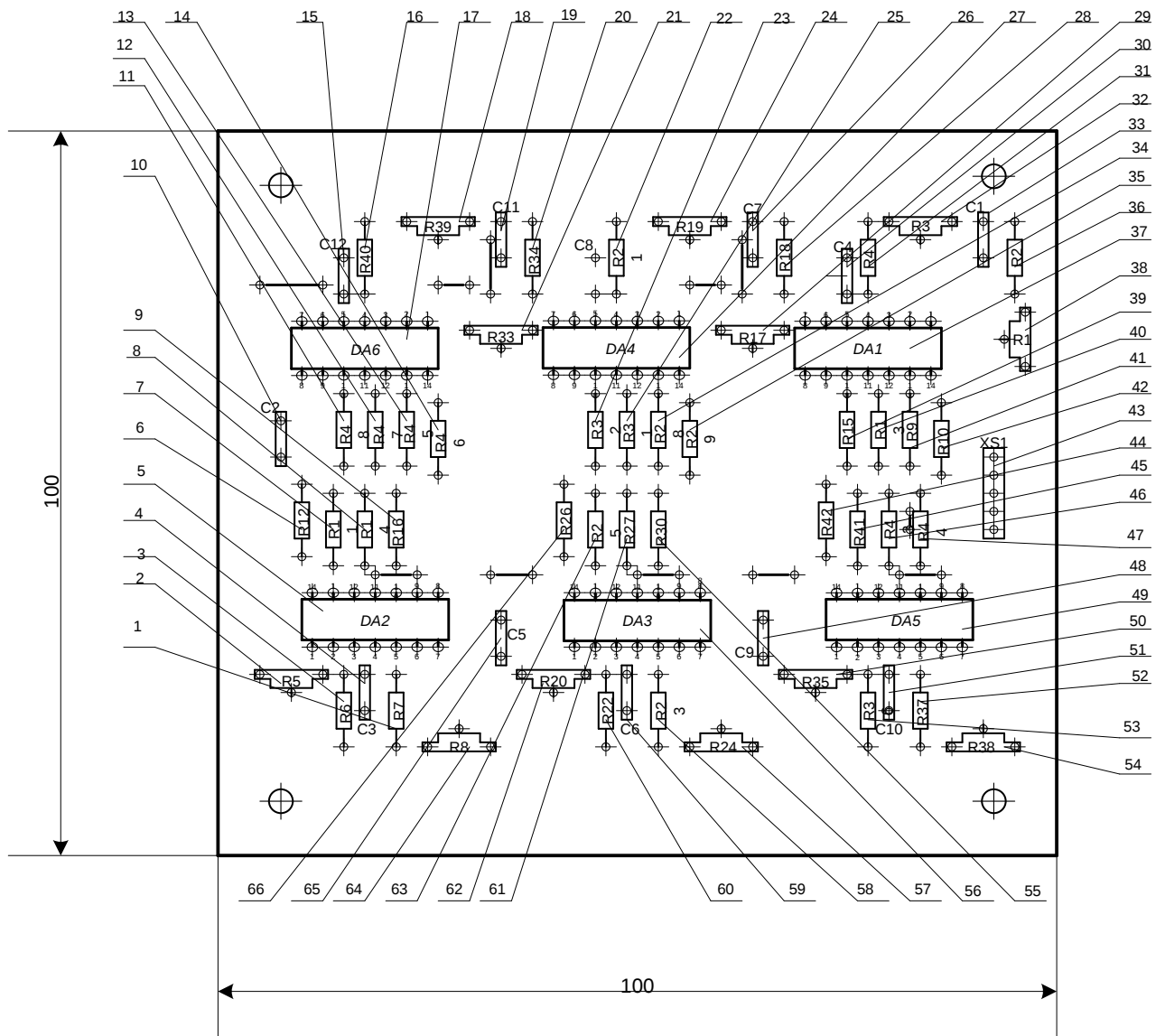


Рисунок 3.3 – Креслення встановлення радіокомпонентів на друкованій платі пристрою

4 РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КАСКАДІВ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА БЕССЕЛЯ

4.1 Створення проекту активного фільтра

Для комп'ютерного схемотехнічного моделювання було обрано програму Electronics Workbench 5.12 (EWB 5.12). Вікно програми EWB 5.12 містить поле меню, рядок контрольно-вимірювальних приладів і рядок бібліотек компонентів, одна із яких у розгорнутому виді показана у лівій частині вікна. У робочому полі програми розташовується модельована схема з підключеними до неї іконками контрольно-вимірювальних приладів і короткий опис схеми (description), лише англійською мовою. При необхідності кожний із приладів може бути розгорнутий для установки режимів його роботи й спостереження результатів. Лінійки прокручування використовуються тільки для переміщення схеми.

Вікно програми EWB 5.12 також містить меню Analysis, наявність лінійки інструментів. Крім того, рядок контрольно-вимірювальних приладів розташований в одному полі з бібліотеками компонентів. Також потрібно зазначити наявність підсвічування підказок призначення всіх кнопок.

Панель контрольно-вимірювальної апаратури розташована під рядком меню робочого вікна EWB (рис. 4.1), включаючи цифровий мультиметр, функціональний генератор, двоканальний осцилограф, таблицю амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик, слово генератор (генератор коду), а також 8-канальні логічні аналізатори та логічні перетворювачі (рис. 4.1). Загальний порядок роботи з пристроєм такий: за допомогою курсора перемістити значок пристрою в робочу область і підключити його провідниками до досліджуваного кола. Щоб перевести пристрій у робочий (розгорнутий) стан, двічі клацніть курсором по його значку. Розглянемо кожен прилад докладніше.



Рисунок 4.1 - Панель контрольно - вимірювальних приладів

Лицьова панель вимірника АЧХ-ФЧХ показана на ін. 3.7. Вимірник призначений для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці MAGNITUDE, включена за замовчуванням) і фазо – частотних (при натиснутій кнопці PHASE) характеристик при логарифмічній (кнопка LOG, включена за замовчуванням) або лінійної (кнопка LIN) шкалі по віс Y (VERTICAL) та по вісі X (HORIZONTAL). Настроювання вимірника полягає у виборі меж виміру коефіцієнта передачі варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях F – максимальне й I – мінімальне значення. Значення частоти й відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази індукується у віконцях у правому нижньому куті вимірника. АЧХ або значення заданої величини в окремих точках АЧХ можна отримати за допомогою вертикальної візирної лінії, яка знаходиться в початковому стані на початку координат, а також за допомогою миші або натисканням графічних кнопок переміщення <, >. Результати вимірювань також можна зберігати в текстових файлах. Для цього потрібно натиснути кнопку «Зберегти» та в діалоговому вікні вказати ім'я файлу (ім'я файлу схеми вказано за замовчуванням). В отриманому таким чином текстовому файлі з розширенням .bod АЧХ і ФЧХ представлені у вигляді таблиці. Пристрій підключається до тестової схеми за допомогою затискачів IN (вхід) і OUT (вихід). Ліві клема затискача підключаються до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві - до загальної шини. Функціональний генератор або інше джерело напруги змінного струму потрібно підключити до входу пристрою, але налаштування цих пристроїв не потрібно.

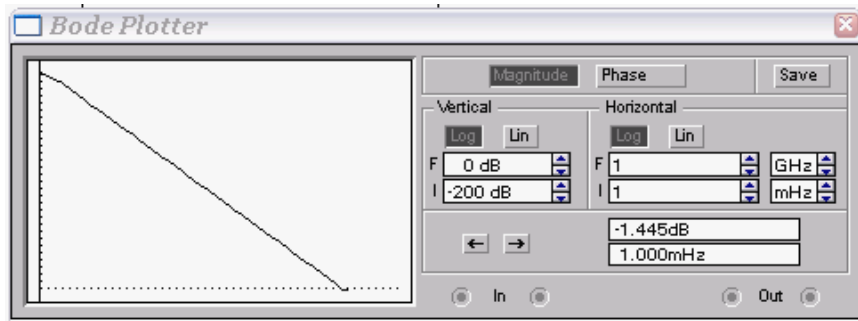


Рисунок 4.2 – Лицьова панель вимірника АЧХ і ФЧХ

4.2 Результати моделювання АЧХ каскадів активного фільтра Бесселя

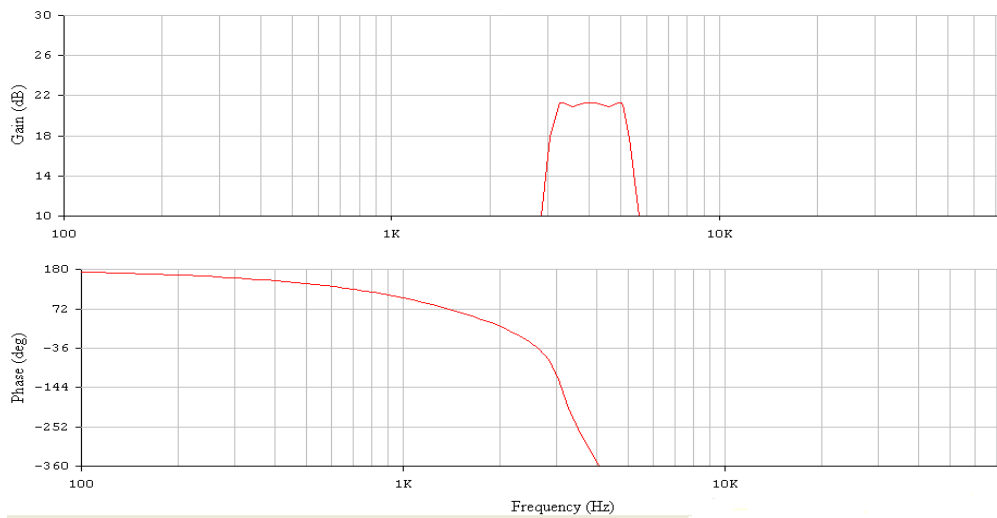


Рисунок 4.3 – АЧХ та ФЧХ активного фільтра Бесселя

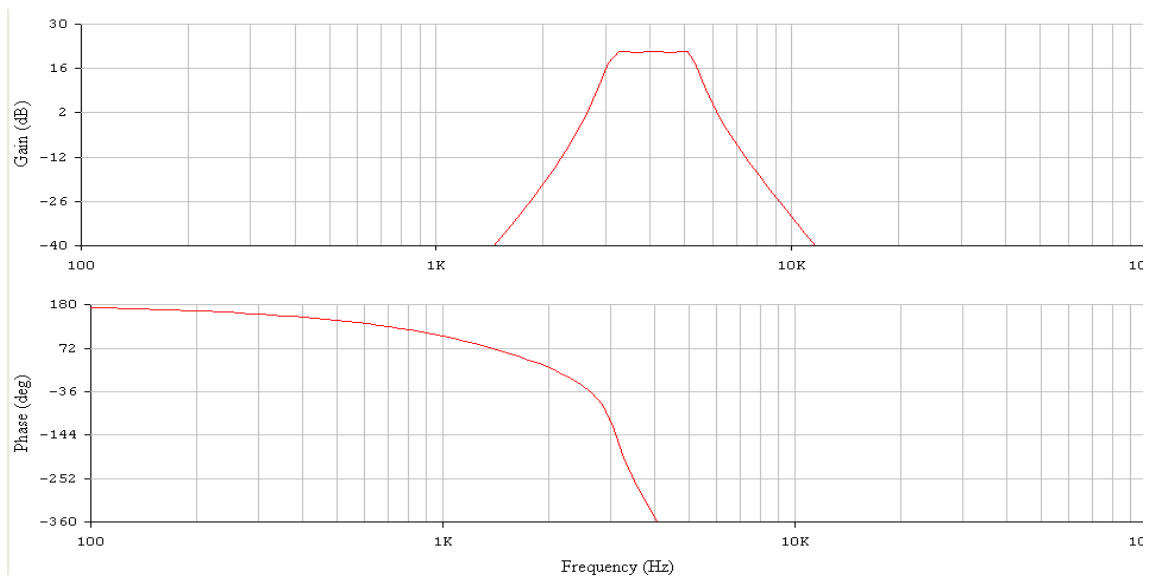


Рисунок 4.4 – АЧХ та ФЧХ безіндуктивного активного фільтра Бесселя

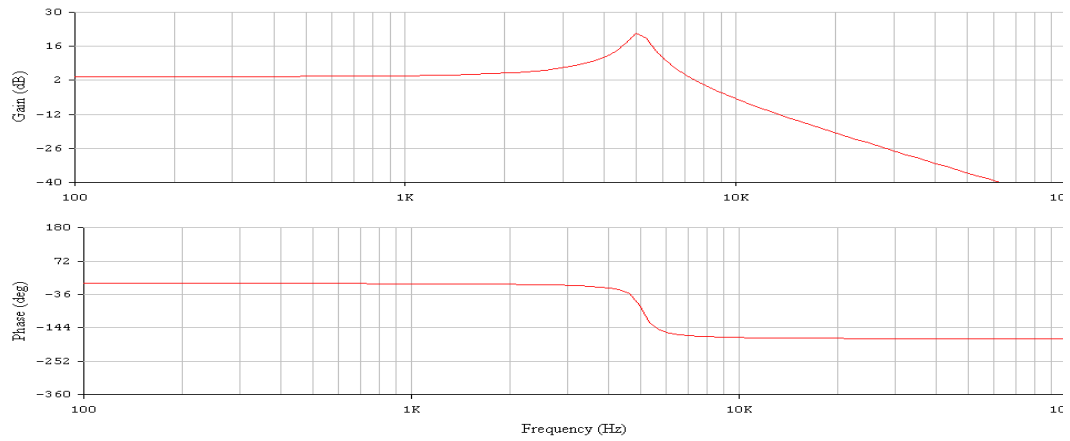


Рисунок 4.5 – АЧХ та ФЧХ 1-го каскаду ФНЧ

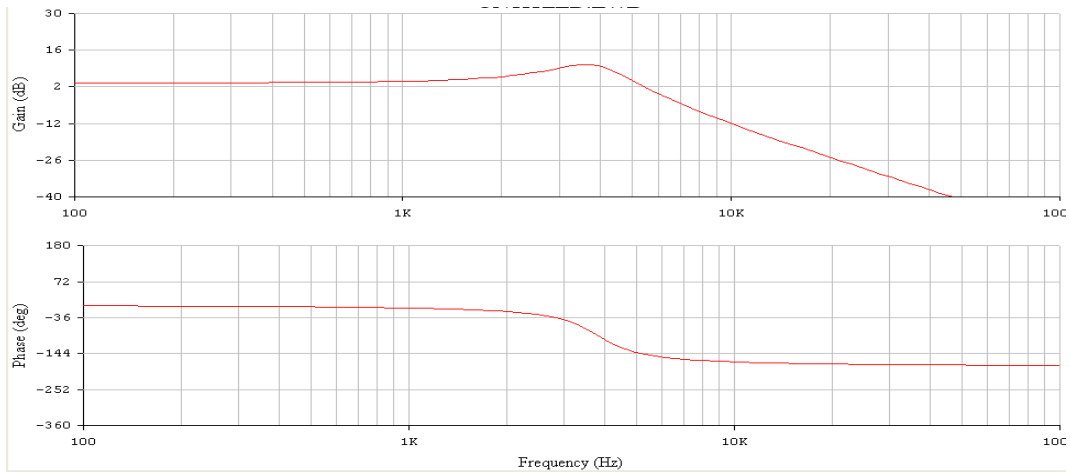


Рисунок 4.6 – АЧХ та ФЧХ 2-го каскаду ФНЧ

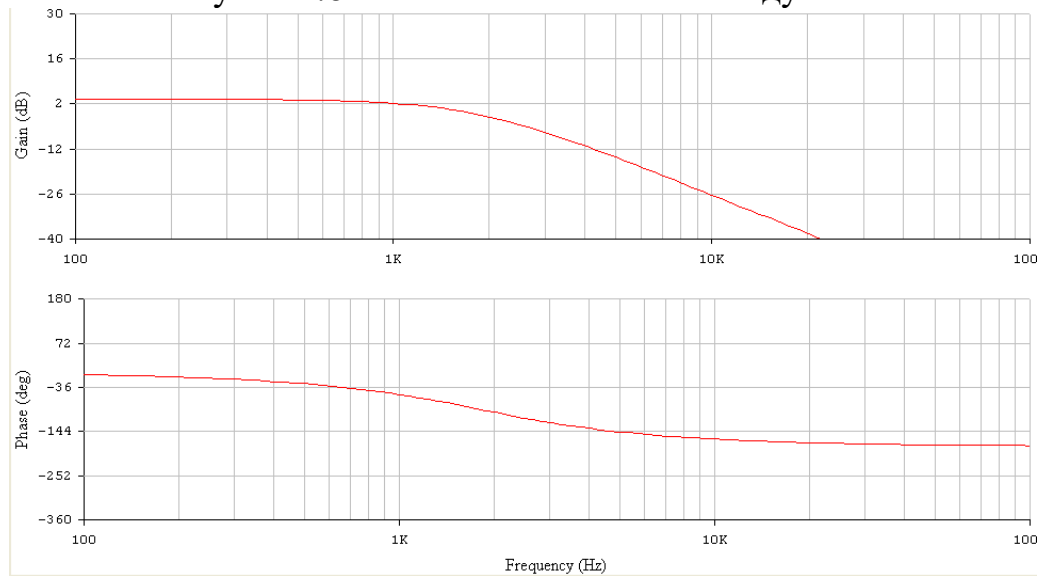


Рисунок 4.7 – АЧХ та ФЧХ 3-го каскаду ФНЧ

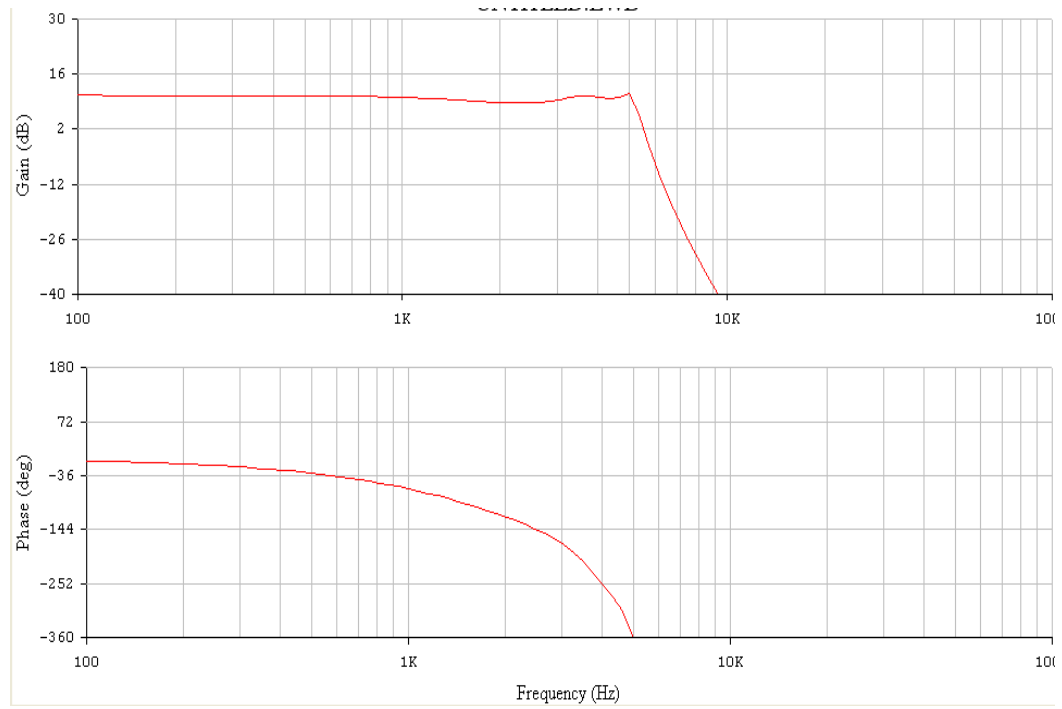


Рисунок 4.8 – АЧХ та ФЧХ трьох каскадів ФНЧ

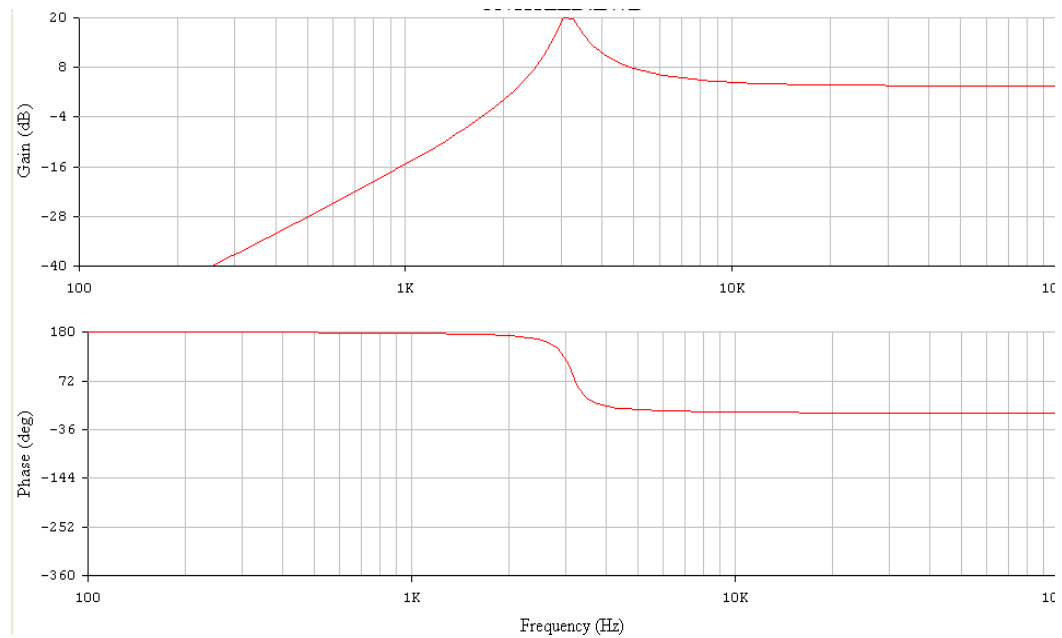


Рисунок 4.9 – АЧХ та ФЧХ 1-го каскаду ФВЧ

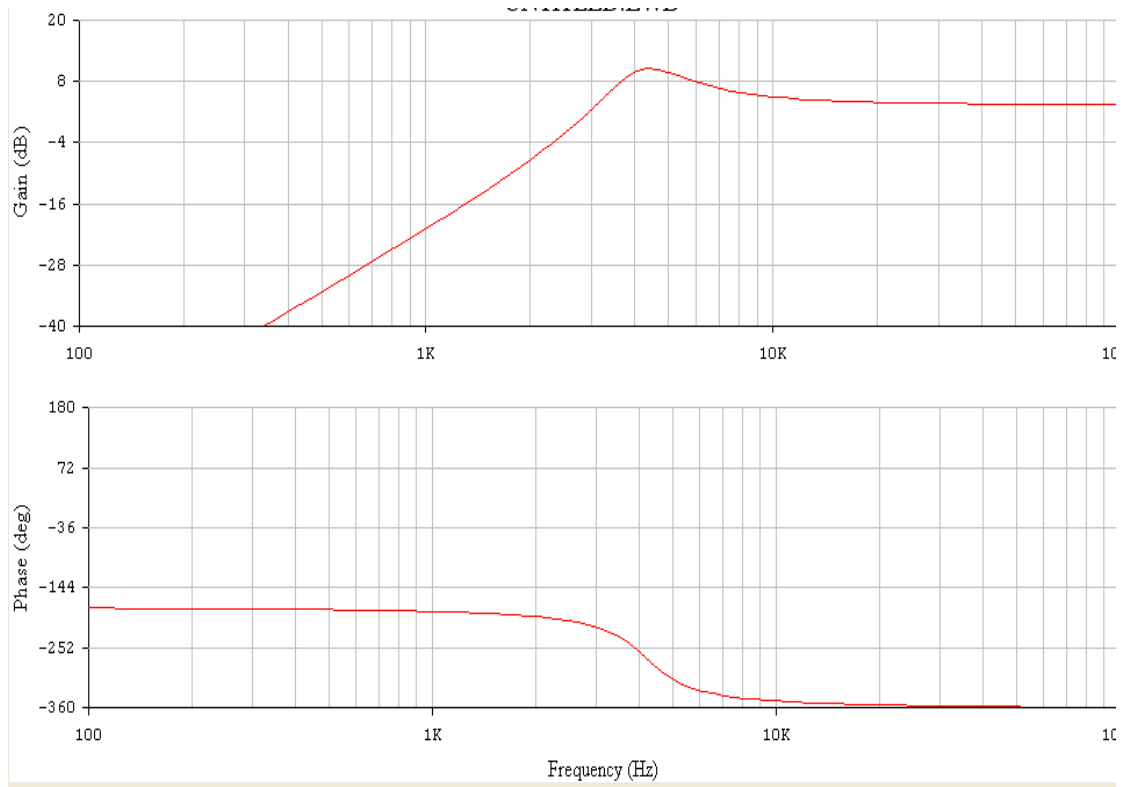


Рисунок 4.10 – АЧХ та ФЧХ 2-го каскаду ФВЧ

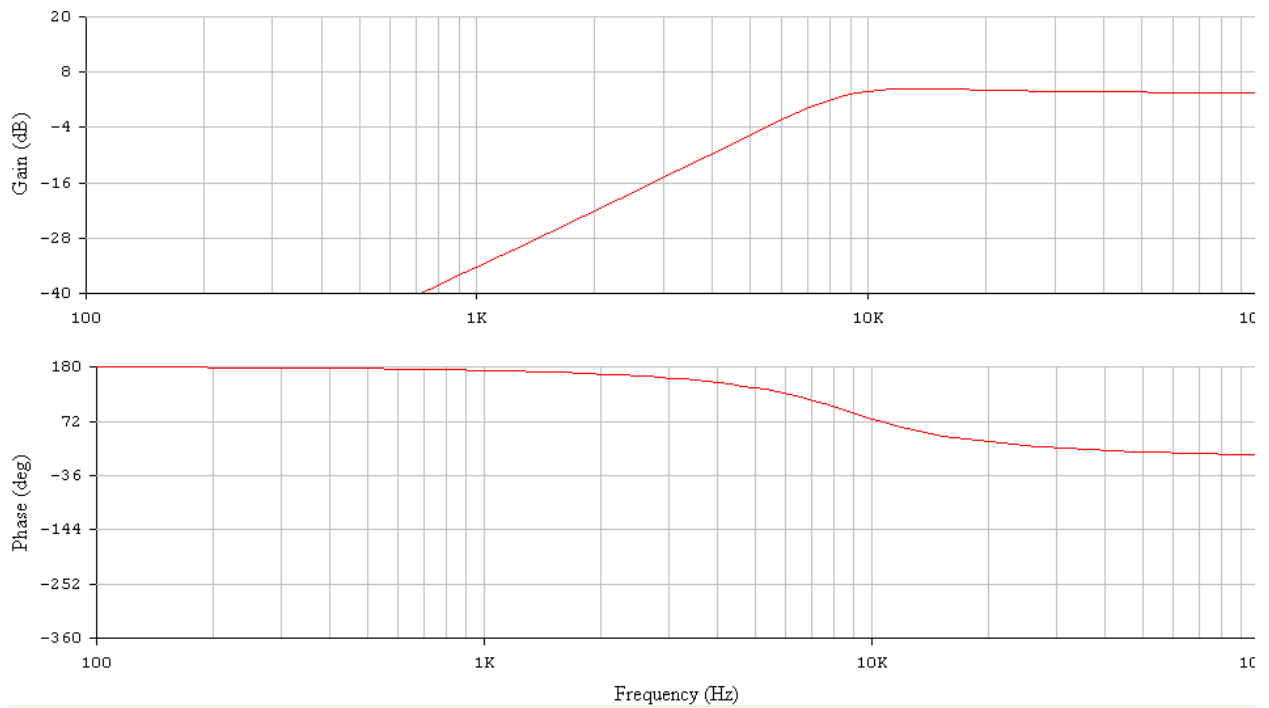


Рисунок 4.11 – АЧХ та ФЧХ 3-го каскаду ФВЧ

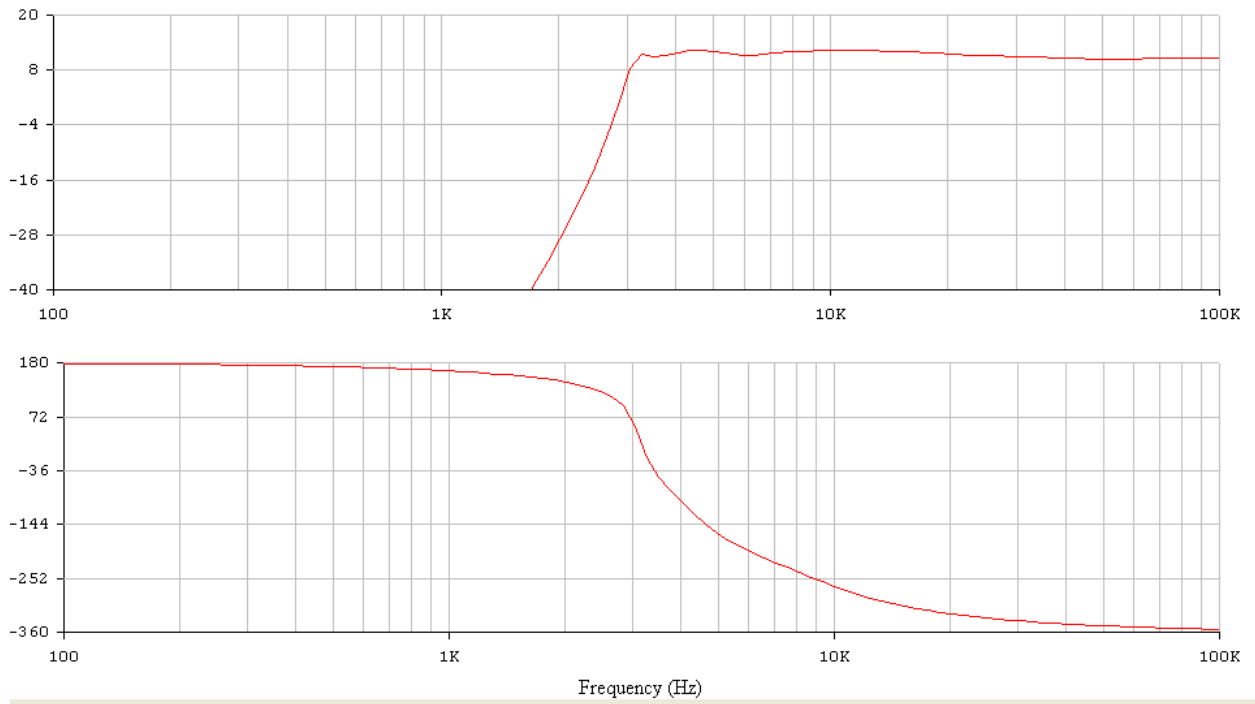


Рисунок 4.12 – АЧХ та ФЧХ трьох каскадів ФВЧ

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час проектування активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах на працівника, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21]: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму; підвищений рівень статичної електрики; підвищена напруженість електричного поля; недостатня освітленість повітря робочої зони; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо покращення умов праці на робочому місці.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

На робочому місці проектувальника активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи.

Проектування робочих місць, забезпечених ПК, відноситься до числа важливих проблем ергономічного проектування в області обчислювальної техніки.

Робоче місце і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектува-

льника повинні бути дотримані наступні основні умови: оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця і достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення [22].

Головними елементами робочого місця проектувальника є стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення працівника. Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і постійність розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібне для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Висота робочої поверхні столу для користувачів повинна регулюватися в межах 680-800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу повинна бути 725 мм. Модульними розмірами робочої поверхні столу для ПК, на підставі яких повинні розраховуватися конструктивні розміри, слід вважати: ширину 800, 1200, 1400 мм, глибину 800 і 1000 мм при нерегульованій висоті, що дорівнює 725 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною – не менше 500 мм, глибиною на рівні колін – не менше 450 мм і на рівні простягнутої ноги – не менше 650 мм. Робочий стілець (крісло) повинен бути підйомно-поворотним і регульованим по висоті і кутам нахилу сидіння і спинки, а також - відстані спинки до переднього краю сидіння. Робоче місце необхідно обладнати підставкою для ніг, має ширину не менше 300 мм, глибину не менше 400 мм, регулювання по висоті в межах до 150 мм і по куту нахилу опорної поверхні підставки до 20 градусів. Підставка повинна мати рифлену поверхню і бортик по передньому краю заввишки 10 мм. Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю, зверненого до користувача, або на спеціальній регульованій по висоті робочої поверхні, відокремленої від основної стільниці.

Електричний струм – являє собою прихований тип небезпеки, бо його важко визначити в токо- та неструмоведучих частинах устаткування, які є хорошими провідниками електрики. Смертельно небезпечним для життя людини вважають струм, величина якого перевищує 0,05 А, струм менше 0,05 А - без-

печний (до 1000 В). З метою попередження уражень електричним струмом до роботи повинні допускатися тільки особи, що добре вивчили основні правила з безпеки виконання роботи.

Приміщення, де експлуатуються ПК, належать до приміщень без підвищеної небезпеки ураження людини електричним струмом. Вимоги електробезпеки і пожежної безпеки у приміщеннях, де встановлені ПК і все устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження роботи їх, електропроводи і кабелі мають відповідати електробезпеці зони та мати апаратуру захисту від струму короткого замикання.

Лінії електромережі ПК, у приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників (заземлення або занулення), причому площі перерізу нульового робочого і нульового захисного провідника повинні бути не менші за площу перерізу фазового провідника.

Відповідно до правил електробезпеки в службовому приміщенні повинен здійснюватись постійний контроль стану електропроводки, запобіжних щитів, шнурів, за допомогою яких включаються в електромережу комп'ютери, освітлювальні прилади, інші електроприлади. Електричні установки, до яких відносяться практично все обладнання ПК, представляють для людини велику потенційну небезпеку, тому що в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок - струмоведучі провідники, корпуси стійок ПК і іншого устаткування, яка під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини. Виключно важливе значення для запобігання електротравматизму має правильна організація обслуговування діючих електроустановок ВЦ, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт.

Оскільки в приміщенні використовується понад п'ять ПК, тому на помітному місці встановлено аварійний резервний вимикач, який в разі небезпеки повністю знеструмлює електричну мережу (крім освітлення). В такому випадку при використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволено прокладати їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів, що ми і спостерігаємо у приміщенні.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року. Категорія виконуваних робіт під час проектування активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах- 1а [25] (табл.5.2.1).

Таблиця 5.2.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні	21 ... 25 ° С
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	до 0,1 м / с
Теплий	Температура повітря в приміщенні	22 ... 28 ° С
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	0,1 ... 0,2 м / с

Для підтримання у виробничих приміщеннях метеорологічних умов, які задовольняють нормативні вимоги використовують систему вентиляції. Приміщення обладнано системою загально обмінної припливно-витяжної вентиля-

ції. На кожную вентиляційну установку складений паспорт з технічною характеристикою та схемою установки.

Крім того, для підтримання температури в холодний період року використовують загальну систему опалення.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.2.

Таблиця 5.2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Оксид азоту	0,085	0,085	2
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Під час роботи на ПК важливо, щоб повітря мало певний іонний склад. Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ПК мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл.5.2.3).

Таблиця 5.2.3 – 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

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

5.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення на робочому місці проектувальника є бічне одностороннє.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (характеристика зорової роботи – дуже високої точності) зазначені у таблиці 5.2.4.

Таблиця 5.2.4 - 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

Для максимального використання природного освітлення в приміщенні слід систематично очищувати вікна від пилу та встановити жалюзі. Віконні прорізи не затемнюються іншими будівлями.

Як джерела світла для штучного освітлення в приміщенні застосовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення.

5.2.4 Виробничий шум

Рівні шуму на робочих місцях визначаються за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [26] (табл.5.2.5).

Таблиця 5.2.5 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звуку, еквівалентні рівні звуку, дБА/дБАек в.
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творча діяльність, обробка даних,	86	71	61	54	49	45	42	40	38	60

Рівень шуму на робочих місцях не має перевищувати 60 дБА, що досягається застосуванням мал шумного обладнання, використанням спеціальних матеріалів для обшивки приміщень, а також різноманітними звукопоглинальними пристроями (перегородки, кожухи, прокладки тощо).

5.2.5 Виробничі випромінювання

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях із ПК (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих [27] (табл.5.2.6).

Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень [24].

Таблиця 5.2.6 – Допустимі параметри електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусу відео термінала при будь-яких положеннях регульовальних пристроїв не повинна перевищувати ОД бер/год (100 мкР/год).

Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів комп'ютерних випромінювань необхідно застосовувати при екранні фільтри, локальні світло-фільтри (засоби індивідуального захисту очей) та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат (згідно Директиви № 90/270/ЕЄС [28]).

5.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а в разі його виникнення запобігається вплив на людей небезпечних факторів пожежі і забезпечується захист матеріальних цінностей. Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі і системою пожежного захисту.

Пожежна безпека приміщення повинна відповідати вимогам Кодексу цивільного захисту України [29] та «Правила пожежної безпеки в Україні» [30].

За вибуховою і пожежною небезпекою приміщення належить до категорії Д, згідно з нормами технологічного проектування «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [31]. У приміщенні знаходяться ПК та інша оргтехніка, що можуть спричинити пожежу.

Згідно даних наведених у таблиці 3.1 будівля, в якій знаходиться приміщення, має II ступінь вогнестійкості [32] приміщення можна віднести до категорії вибухопожежонебезпеки В (табл.5.2.7).

Таблиця 5.2.7 – Визначення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колонни	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (у т. ч. горіщні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки II-IIa (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.)

5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Для запобігання виникнення пожежі в приміщенні застосовують такі заходи:

- щорічне 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;

– своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

Електромережі, електроприлади і апаратура експлуатується тільки у справному стані з урахуванням вказівок та рекомендацій підприємств-виготовлювачів. У разі виявлення пошкоджень електромереж, вимикачів, розеток та інших електровиробів слід негайно вимкнути їх та вжити необхідних заходів щодо приведення в пожежобезпечний стан.

5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання пожежі, обмеження її розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у разі виникнення вогнища загоряння і в якому зазначено місця розташування пожежної техніки. Як відомо пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалювання. У робочому приміщенні присутні всі три основні чинники, необхідні для виникнення пожежі. Горючими компонентами є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін

Джерелами запалювання у ВЦ можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де внаслідок різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри та дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів. У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відведення надлишкової теплоти від ЕОМ служать системи вентиляції та кондиціонування

повітря. При постійному дії ці системи представляють собою додаткову пожежну небезпеку.

При проведенні обслуговуючих, ремонтних і профілактичних робіт використовуються різні мастильні речовини, легкозаймисті рідини, прокладаються тимчасові електропровідниками, ведуть пайку та чистку окремих вузлів. Виникає додаткова пожежна небезпека, яка потребує додаткових заходів пожежного захисту. Зокрема, при роботі з паяльником слід використовувати неспалену підставку з нескладними пристроями для зменшення споживаної потужності в неробочому стані.

Однією з найбільш важливих завдань пожежної захисту є захист будівельних приміщень від руйнувань та забезпечення їх достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. З огляду на високу вартість електронного устаткування приміщення, а також категорію його пожежної небезпеки, будинки для ВЦ і частини будинку іншого призначення, в яких передбачено розміщення ПК повинні бути 1 і 2 ступеня вогнестійкості.

Для виготовлення будівельних конструкцій використовуються, як правило, цегла, залізобетон, скло, метал та інші негорючі матеріали. Застосування дерева повинна бути обмежено, а в разі використання необхідно просочувати його вогнезахисними складами.

До засобів гасіння пожежі, призначених для локалізації невеликих загорянь, відносяться внутрішні пожежні водопроводи, вогнегасники, сухий пісок, азбестові ковдри і т. д. Застосування води в машинних залах ПК, сховищах носіїв інформації, приміщеннях контрольно-вимірювальних приладів, зважаючи на небезпеку пошкодження або повного виходу з ладу дорогого устаткування можливо у виняткових випадках, коли пожежа приймає загрозливо великі розміри. При цьому кількість води повинна бути мінімальною, а пристрої ПК необхідно захистити від попадання води, накриваючи їх брезентом або полотном.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях широко застосовуються вогнегасники. У приміщенні застосовуються головним чином вуглекислотні вогнегасники, перевагами якого є висока ефективність гасіння пожежі, схоронність еле-

ктронного устаткування, діелектричні властивості вуглекислого газу, що дозволяє використовувати ці вогнегасники навіть у тому випадку, коли не вдається знеструмити електроустановку відразу.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській дипломній роботі розроблений та досліджений активний низькочастотний фазовий фільтр Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах. Оскільки фільтр широкосмуговий, тому реалізовувати його довелося каскадним з'єднанням ланок ФНЧ і ФВЧ. Кожний зі складових фільтрів (каскадів ФНЧ і ФВЧ) дійсно є рівнохвильовим та в підсумку активний фільтр має шостий порядок. Результуючий смуговий активний фільтр не є рівнохвильовим через те, що на частоті біля 2,8 кГц максимумами обох фільтрів збіглися та виник виділений максимум АЧХ. Але цей виділений максимум АЧХ, який виник, не протирічить вимогам індивідуального завдання. Таким чином, результуючий порядок активного смугового фільтра дорівнює 12.

Запропоновані два варіанти реалізації резистивних елементів фільтра: 1) послідовне єднання постійних резисторів з номінальними значеннями опорів, які в сумі приблизно дають розрахункові значення; 2) послідовне з'єднання постійного резистора і підстроювального резистора.

Ємності окремих каскадів фільтра реалізовані паралельним з'єднанням конденсаторів з номінальними значеннями таким чином, щоб отримати значення ємності близькі до розрахункових. При цьому за рахунок розкиду ємностей конденсаторів запропоновано підібрати конденсатори з потрібним значенням ємності.

Комп'ютерне моделювання АЧХ окремих ланок і всього фільтра здійснене за допомогою програми Electronics Workbench. Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання підтвердили правильність отриманих чисельних розрахунків згідно теоретичним підходам і вимогам індивідуального завдання.

В конструкторському розділі проведено розрахунок друкованої плати для виготовлення фільтра на дискретних елементах з метою фізичного моделювання характеристик. Розроблена конструкція лабораторного макету активного низькочастотного фазового фільтра Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах.

Отримані в роботі результати будуть використані в лабораторному практикумі дисципліни „Теорія електричних кіл і сигналів”.

Також у бакалаврській дипломній роботі Розроблені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз та проектування активних фільтрів на операційних підсилювачах. Зеленін А. М., Костромицький А. І., Бондар Д. В. Навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2010. 160 с.
2. Аналогова схемотехніка: навчальний посібник / О. М. Кобяков, М. М. Ляпа, В. М. Лисенко та ін. Суми: СумДУ, 2007. 209 с.
3. Бенедюк С. В. Метод виявлення корисного сигналу у шумі в коротковильовому діапазоні радіохвиль: дипломна робота магістра за спеціальністю «172 – Телекомунікації та радіотехніка» / С. В. Бенедюк. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 114 с.
4. 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. К.: Вища школа, 2004. 366 с.
5. Бялобржеський О. В., Власенко Р. В. Зв'язок електроенергетичних параметрів режиму однофазного активного фільтру з параметрами його накопичувачів. Науковий вісник НГУ. 2015. № 148. С. 79–84.
6. Власенко Р. В., Бялобржеський О. В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму. Електротехніка та електроенергетика. 2014. № 2. С. 20–27.
7. Воробйова О. М. Основи схемотехніки: підручник. [2-ге вид.]. Одеса: Фенікс, 2009. 388 с.
8. Гребенко Ю. А., Чжо Зей Я. Комплексні активні ЛС-фільтри на ідентичних ланках. Радіотехніка, 2008. № 2. С. 61.
9. Гребенко Ю. А., Чжо Зей Я. Розрахунок аналогових комплексних фільтрів з послідовною структурою на ідентичних ланках. Радіотехнічні зошити. 2010. № 42. С. 45–48.

10. Заїкін І. П. Проектування антенних пристроїв систем зв'язку. Навч. керівництво. Харків: Нац. аеро-косм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2007. 78 с.
11. 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.
12. Савицька М. П. Аналогові електронні пристрої: навчальний посібник. М. П. Савицька, Л. Б. Ботнар. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2009. 108 с.
13. 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.
14. 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.
15. Чжо Зей Я. структуровані НЧ-прототипи для розрахунку аналогових ЛЗ-фільтрів на ідентичних ланках. Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика. Теза. XIII МНТК студентів і аспірантів – в 3-х т. М.: Видавничий дім MEI, 2007. Т. 1. С. 66–67.
16. Чжо Зей Я. Розрахунок аналогових комплексних фільтрів за структурованими НЧ-прототипами. Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика. Теза. XIV МНТК студентів та аспірантів. у 3-х т. М.: Видавничий дім MEI, 2008. Т. 1. С. 63–64.
17. Чжо Зей Я. структуровані НЧ-прототипи Баттерворта. Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика. Теза. XV МНТК студентів та аспірантів. у 3-х т. М.: Видавничий дім MEI, 2009. Т. 1. С. 80–81.
18. Чжо Зей Я. структуровані НЧ-прототипи без зворотних зв'язків, що охоплюють один базовий модуль. Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика. Теза. XVI МНТК студентів та аспірантів. у 3-х т. К.: КПІ, 2010. Т. 1. С. 85–86.
19. Bialobrzesky O., Vlasenko R., Gladyr A. Analysis of electric energy allocation processes in power elements of the active filter converter. Proceeding of scien-

tific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering. 2015. Vol. 4. P. 164–168.

20. 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. №.1. pp. 4–6.

21. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с

22. 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_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php

23. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

24. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

25. 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>

26. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitar-ni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

27. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>

28. Директива № 90/270/ЕЄС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/provisions-on-workload-ergonomical-and-psychosocial-risks/osh-directives/5>

29. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI

30. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
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. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-200

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

АКТИВНИЙ НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ФАЗОВИЙ ФІЛЬТР БЕССЕЛЯ ШОСТОГО ПОРЯДКУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Виконав: студент 2(4)-го курсу, групи ТКР-22мс
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Чуба

Чуба Ю.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

Савицький А.Ю.

(прізвище та ініціали)

«12»

06

2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

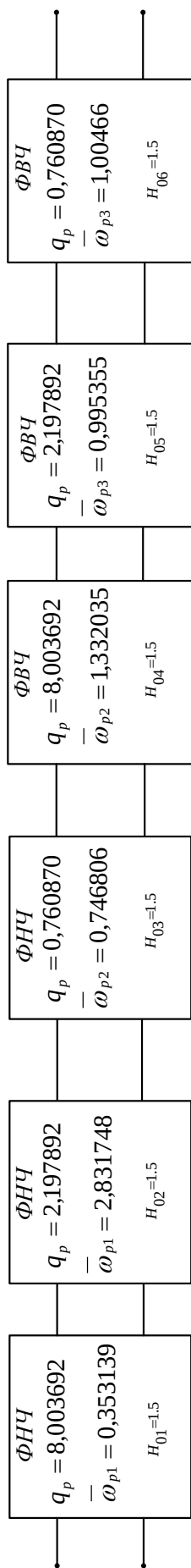


Рисунок 1 – Загальна структурна схема активного фільтра Бесселя

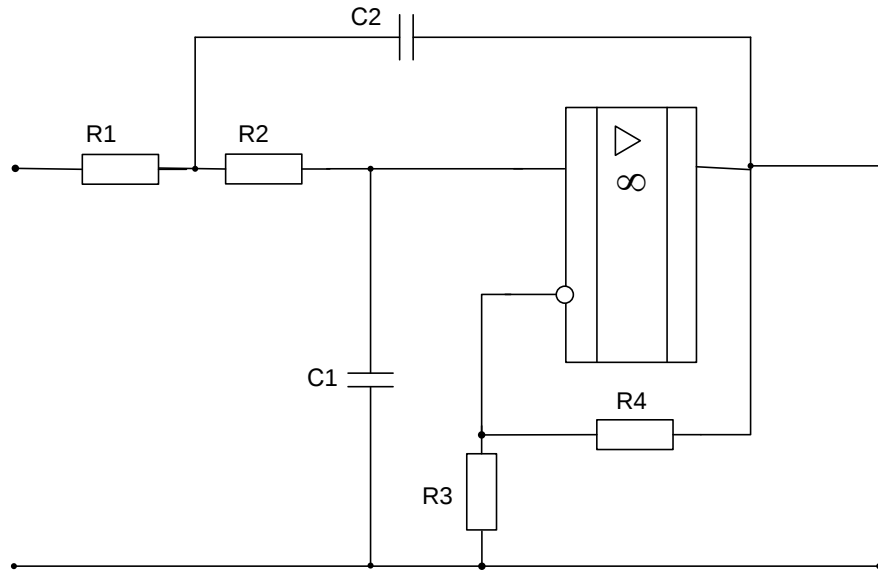


Рисунок 2 – Схема каскаду ФНЧ на ОП з обмеженим коефіцієнтом підсилення

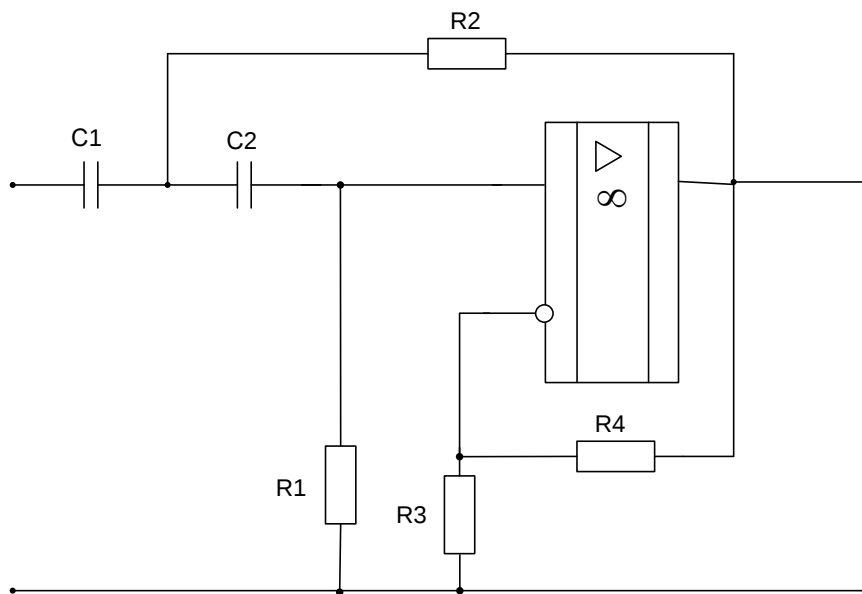


Рисунок 3 – Схема каскаду ФВЧ на ОП з обмеженим коефіцієнтом підсилення.

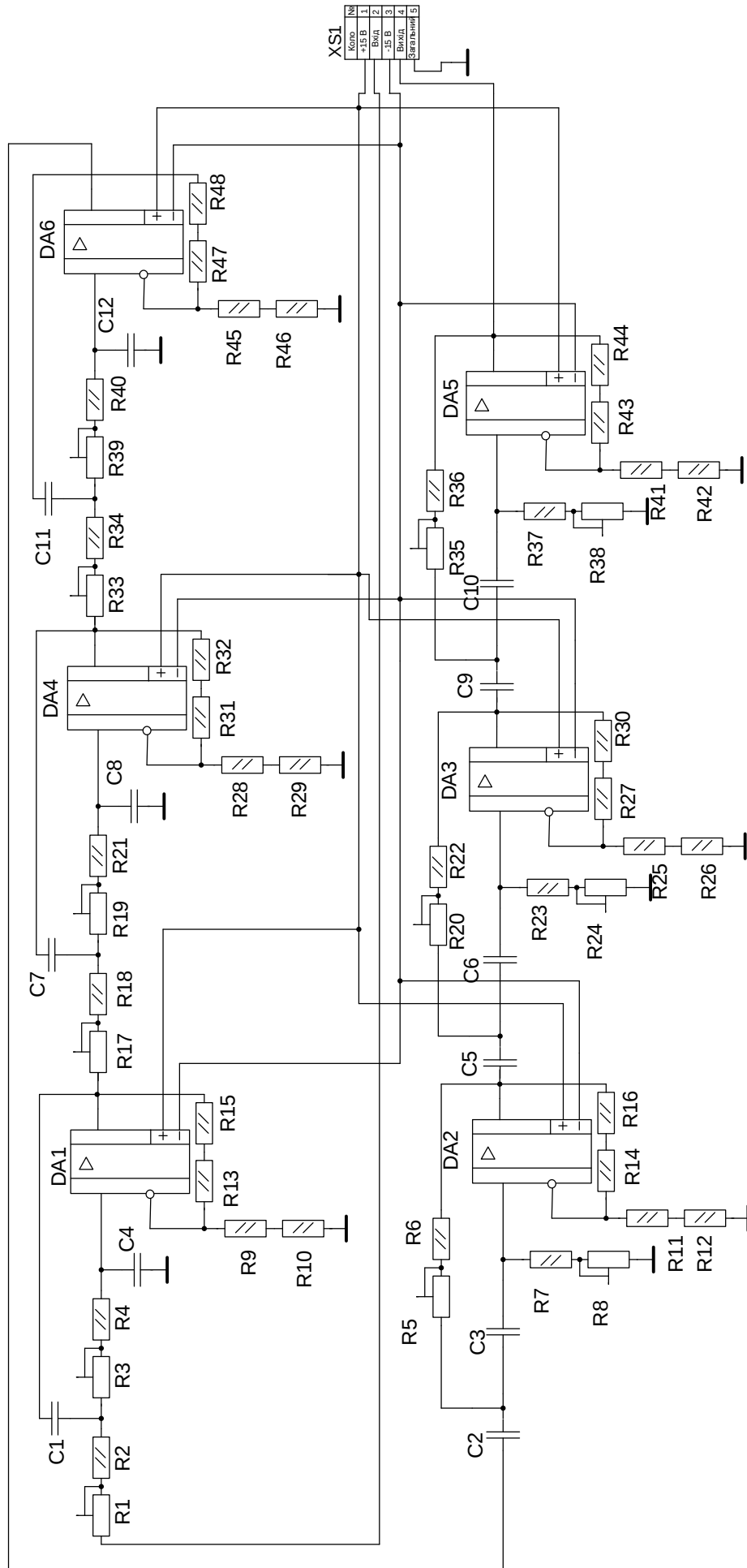


Рисунок 4 – Схема електрична принципова активного фільтра Бесселя

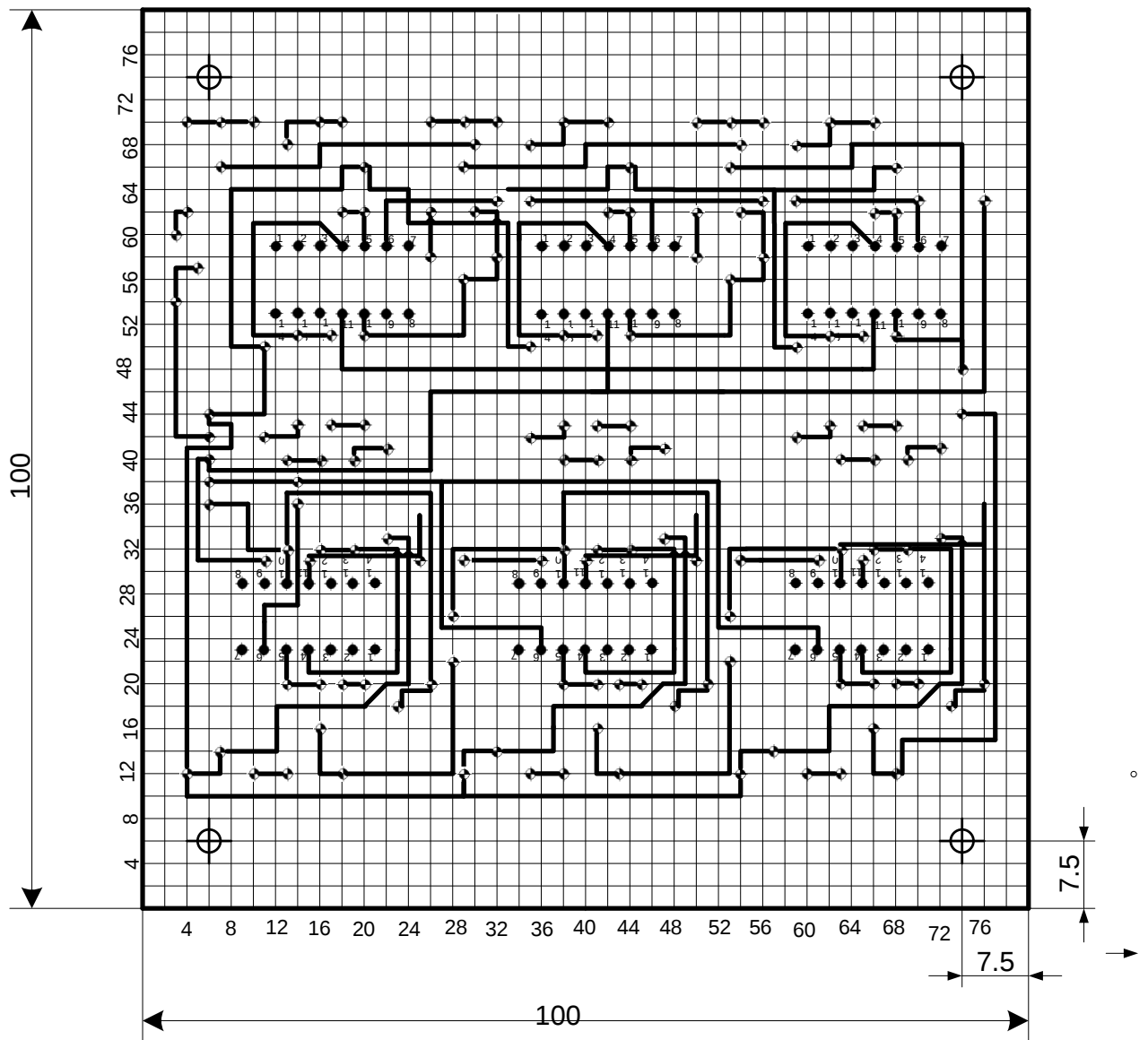


Рисунок 5 – Топологія друкованої плати активного фільтра Бесселя (вигляд знизу)

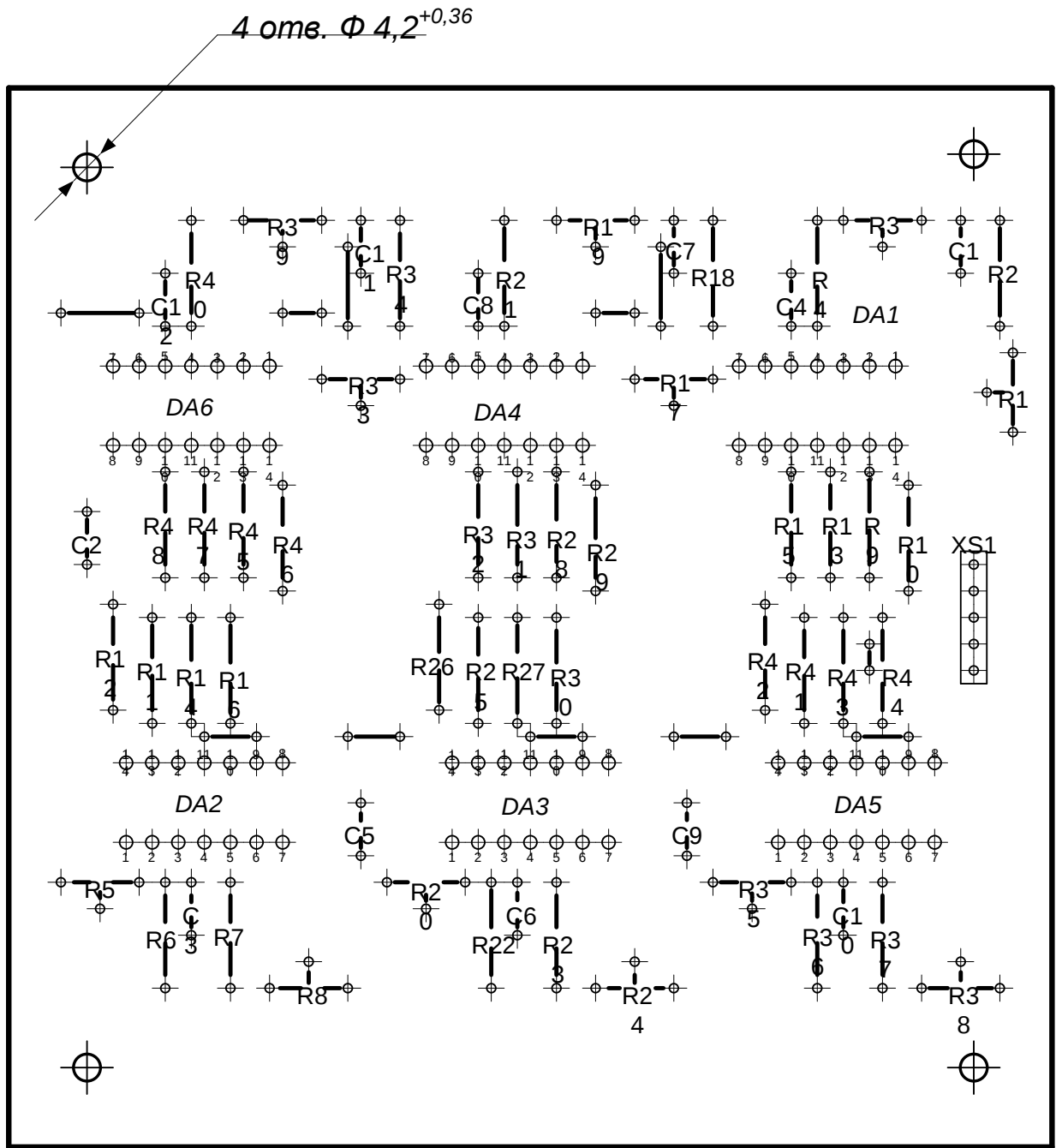


Рисунок 6 – Топологія друкованої плати активного фільтра Бесселя (вигляд згори)

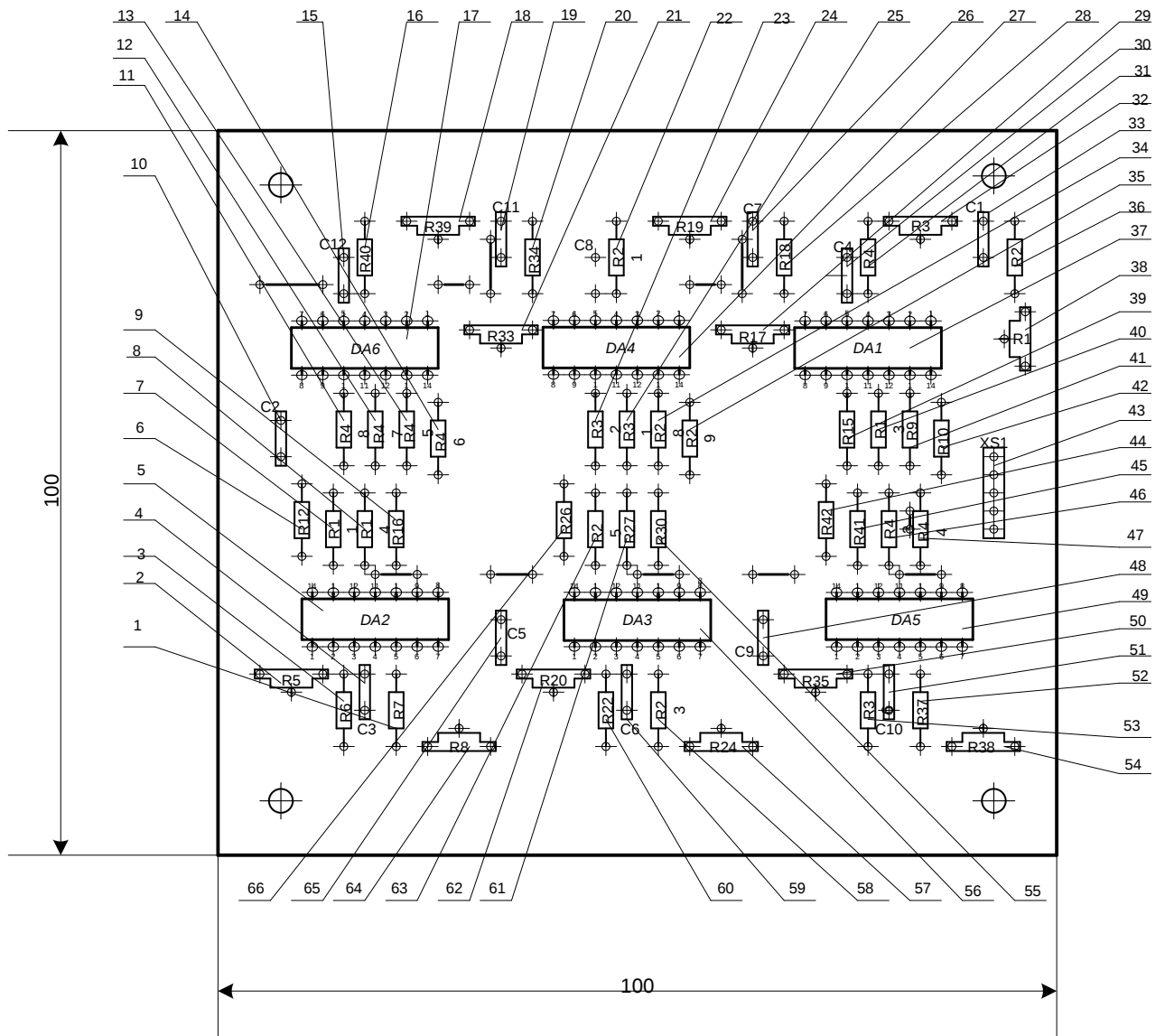


Рисунок 7 – Встановлення радіокомпонентів на друкованій платі активного фільтра Бесселя

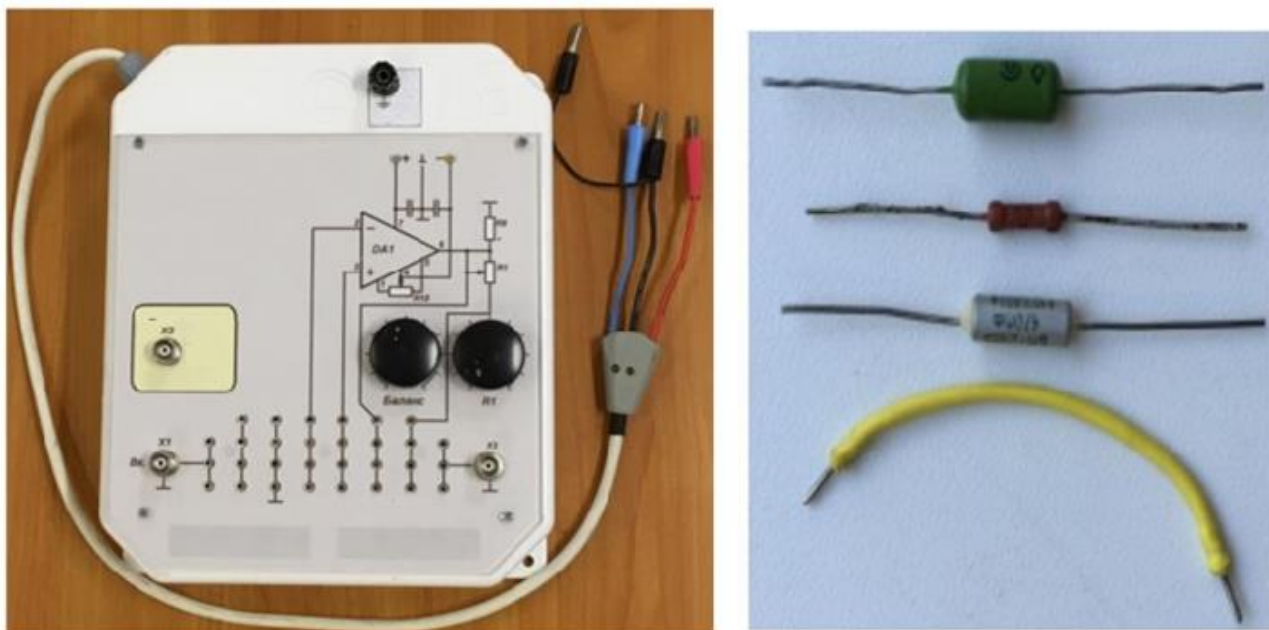


Рисунок 8 – Зовнішній вигляд макета та елементи електричної схеми і з'єднувальний провід



Рисунок 9 – Джерело живлення (стрілками вказані клеми для підключення ОП)

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**АКТИВНИЙ НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ФАЗОВИЙ ФІЛЬТР БЕССЕЛЯ
ШОСТОГО ПОРЯДКУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Активний низькочастотний фазовий фільтр Бесселя шостого порядку на операційних підсилювачах»

Тип роботи: БДР
(БДР, МКР)

Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

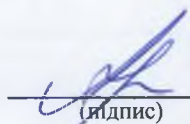
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 87,2% Схожість 12,8%

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)

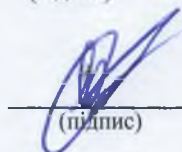
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Юрій ЧУБА
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

АНТОН САВИЦЬКИЙ
(прізвище, ініціали)