

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:

«ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИЙ СМУГОВИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ»

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Педан О.Р.
(прізвище та ініціали)

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

Звягін О.С.
(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

15.03. 202_ року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Педану Олександру Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Електрично керований смуговий активний фільтр на операційному підсилювачі»

керівник роботи Звягін Олександр Сергійович, к.т.н., доц., каф. ІРТС

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “11”03 2024 року № 80

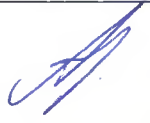
2. Строк подання студентом роботи 10 06 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення – 5 В; напруга керування 1,5 .. 3,0 В; діапазон зміни центральної частоти смуги пропускання 310 кГц .. 2,0 МГц; зміна ширини смуги пропускання у межах 50 кГц ... 500 кГц; коефіцієнт перекриття по частоті 2,0; затухання за межами смуги пропускання -40 дБ.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Огляд сучасного стану методів побудови електрично керованих активних фільтрів. Розробка та дослідження активних електрично керованих фільтрів. Комп'ютерне моделювання електрично-керованих фільтрів. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Різновиди схем аналогових керованих фільтрів. Різновиди схем дискретних керованих активних фільтрів на транзисторі КТ3101. Різновиди керованих НВЧ активних фільтрів з складною формою АЧХ. Залежність ємності C_v і добротності Q_v від прикладеної до нього напруги U . Еквівалентна схема варикапа в діапазоні УВЧ. Залежність ємності C і добротності Q_v варикапа від керуючої напруги. Активний керований електричний фільтр низької частоти. Схема смуго-пропускного фільтра на С-негатроні з електронним керуванням. Моделювання схеми активного електрично керованого фільтра низької частоти. Визначення температурної стабільності. Моделювання смуго-пропусканого фільтра на С-негатроні. АЧХ смуго-пропускного фільтра на С-негатроні.

6. Консультанти розділів роботи

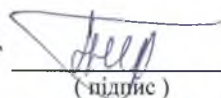
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС Звягін О.С.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.03 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

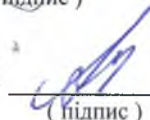
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-10.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	11.03.2024-31.03.2024	
4.	Попередня 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


(підпис)

Педан О.Р.

Керівник роботи


(підпис)

Звягін О.С.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396.6

Педан О. Р. Електрично керований смуговий активний фільтр на операційному підсилювачі. Бакалаврська дипломна робота / Звіт з переддипломної практики – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 83 с. Українською мовою. Бібліогр.: 20 . назв; Рис.: 21.

У бакалаврській дипломній роботі розроблені та досліджені електрично керовані фільтри. Розглянуто основні визначення й класифікації, актуальність електрично керованих фільтрів. Проаналізовано низку переваг та недоліків аналогів і прототипів. Досліджені основні елементи керування та способи управління частотними характеристиками електрично керованих фільтрів. Розроблені та змодельовані схеми електрично керованих фільтрів. Розглянутий принцип роботи цих пристроїв. В роботі запропоновані шляхи для вирішення основних недоліків активних фільтрів.

Ключові слова: активний фільтр, смуговий фільтр, електричне керування, керування напругою, амплітудно-частотна характеристика.

ABSTRACT

Pedan O. R. Electrically controlled bandpass active filter on an operational amplifier. Bachelor's thesis / Report on undergraduate practice - Vinnytsia: VNTU, 2024. 83 p. In Ukrainian. Bibliography: 20. titles; Figures: 21.

In the bachelor's thesis, electrically controlled filters were developed and investigated. The basic definitions and classifications, as well as the relevance of electrically controlled filters, are considered. A number of advantages and disadvantages of analogues and prototypes are analysed. The main controls and methods of controlling the frequency characteristics of electrically controlled filters are investigated. Circuits of electrically controlled filters are developed and modelled. The principle of operation of these devices is considered. The paper suggests ways to solve the main disadvantages of active filters.

Keywords: active filter, bandpass filter, electrical control, voltage control, amplitude-frequency characteristic.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ	9
1.1 Класифікація електричних фільтрів	9
1.2 Варіанти схемотехнічної реалізації електричних фільтрів	14
1.3 Висновки до розділу	24
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ ФІЛЬТРІВ	26
2.1 Керуючі елементи фільтрів	26
2.2 Розробка та дослідження активних електрично керованих фільтрів низької частоти.....	36
2.3 Розроблення та дослідження смуго-пропускательного фільтра на операційному підсилювачі	38
2.4 Висновки по розділу.....	43
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНО-КЕРОВАНИХ ФІЛЬТРІВ.....	45
3.1 Характеристики смугових фільтрів і вимоги до них	45
3.2 Комп'ютерне моделювання активних електрично керованих смугових фільтрів	49
3.3 Комп'ютерне моделювання смуго-пропускательного фільтра на операційному підсилювачі.....	51
3.4 Моделювання температурних режимів друкованої плати пристрою плати за допомогою програми THERMAL DESKTOP.....	53
3.5 Висновки по розділу.....	56
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	58
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	60
4.3 Пожежна безпека.....	66
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	71
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) дипломної роботи.....	81

ВСТУП

Актуальність теми. Електронні фільтри використовуються в системах багатоканального зв'язку, радіопристроях, пристроях автоматики, телемеханіки, радіовимірювальної техніки і т. д. - скрізь, де передаються електричні сигнали за наявності інших сигналів і шумів, що заважають і відрізняються від перших за частотним розподілом; вони застосовуються також в випрямлячах струму для згладжування пульсацій випрямленого струму. Область частот, в якій лежать складові вихідного сигналу електронного фільтра, називають смугою пропускання.

LC-фільтри використовуються в силових електричних ланцюгах для гасіння перешкод. У каскадах радіоелектронної апаратури часто застосовуються перебудовувані LC-фільтри, наприклад, простий LC-контур, включений на вході середньохвильового радіоприймача забезпечує настройку на певну радіостанцію.

Безперервний процес ускладнення радіоелектронних пристроїв та їх застосування на ультрависоких і надвисоких частотах (УВЧ і СВЧ) поставили перед розробниками апаратури два завдання першочергової важливості: підвищення надійності і зменшення габаритних розмірів при збереженні високих електричних параметрів. При вирішенні цих завдань найбільш значні труднощі виникли на етапі створення частотно-вибірних фільтрів в інтегральному виконанні.

Частотна вибірковість фільтрів залежить від добротності їх елементів. З підвищенням частоти добротність реактивних елементів зменшується, що призводить до погіршення вибірковості. Особливо сильно зменшується добротність котушок індуктивності.

Аналіз сучасного стану розвитку науки та техніки за тематикою роботи. При створенні активних УВЧ і НВЧ фільтрів використовується частотна залежність коефіцієнта передачі струму транзистора і вплив зворотних

зв'язків в транзисторі. Це дозволяє в широкому діапазоні частот використовувати транзистор як ОП для синтезу високодобротних реактивних і активних негативних динамічних опорів, а також управляти положенням полюсів функції передачі на комплексній площині. Порівняно з пасивними УВЧ і СВЧ фільтрами активні мають велику добротність, кращі масогабаритні характеристики і розширені функціональні можливості.

Частотні фільтри електричних сигналів призначені для підвищення завадостійкості різних електронних пристроїв і систем, у тому числі і систем управління на їх основі. Вони широко застосовуються в автоматичній, радіотехнічній, вимірювальній техніці, техніці зв'язку, електронній обчислювальній техніці і т.д. Фільтри забезпечують виділення сигналу з перешкод при наявності відмінностей у їх частотних спектрах.

Ідеальні фільтри не послаблюють сигнал у смузі пропускання і повністю виключають проходження сигналу в смузі затримання.

Метою роботи є розроблення та дослідження електрично керованого смугового активного фільтра на операційному підсилювачі.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії спектрального складу електричних сигналів.

Предмет дослідження – частотні параметри і характеристики електрично керованого смугового активного фільтра на операційному підсилювачі.

Для досягнення поставленої мети в бакалаврській дипломній роботі розв'язуються наступні задачі:

- провести аналіз сучасних досягнень;
- обрати структурну схему пристрою;
- розробити електричну схему пристрою;
- розробити модель пристрою;
- здійснити комп'ютерне моделювання;
- розробити топологію друкованої плати пристрою;
- здійснити конструкторські розрахунки пристрою;

- виконати розділ безпеки життєдіяльності.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики; основних положень теорії функції комплексної змінної; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл; теорії комп'ютерного схемотехнічного моделювання мікроелектронних пристроїв.

Наукова новизна одержаних результатів

Отримав подальший розвиток методу побудови активних смугових фільтрів на операційних підсилювачах.

Практичне значення одержаних результатів

Нова електрична схема та конструкція електрично керованого смугового активного фільтра на операційному підсилювачі.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська дипломна робота складається зі вступу, 4 розділи, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

1.1 Класифікація електричних фільтрів

Керованим НВЧ АФ називається фільтр, один або декілька параметрів X_{yi} якого можуть змінюватися за заданим законом $X_{yi} = f(F_y)$ під дією керуючого сигналу F_y при допустимій нестабільності $dX_{\phi i}$ в діапазоні переналадження відповідних параметрів $X_{\phi i}$. Закон керування може бути як лінійним (лінійне керування), так і нелінійним (нелінійне керування). У більшості практичних випадків інтерес представляють керовані НВЧ АФ з лінійним керуванням. Керовані НВЧ АФ, як і фіксовані, можуть бути взаємними і невзаємними. У разі плавної зміни керованого параметра X_{yi} їх відносять до групи аналогових, а в разі стрибкоподібної зміни X_{yi} - до групи дискретних керованих НВЧ АФ. За видом реалізованої АЧХ керовані НВЧ АФ поділяються на ФПЧ, СПФ, СЗФ і ФНЧ.

В [2] якості керованих параметрів X_{yi} смугових НВЧ АФ використовуються: квазірезонансна частота f_0 , абсолютна смуга пропускання dF , добротність $Q_T = f_0 / df_i$ і коефіцієнт передачі на квазірезонансній частоті K_0 . В якості керованих параметрів ФНЧ і ФВЧ використовується нижня і верхня граничні частоти, коефіцієнт передачі у смузі пропускання. Керовані активні ФНЧ і ФВЧ в діапазоні НВЧ у наш час широкого застосування не отримали і у подальшому не розглядаються. Найбільш часто виникає задача управління одним з параметрів X_{yi} фільтра при мінімальній зміні інших фіксованих параметрів. Такі керовані НВЧ АФ називаються однопараметричними. Якщо здійснюється одночасне синхронне керування декількома параметрами, то керовані фільтри є багато параметричними. Можлива побудова керованих фільтрів з незалежним керуванням кількома параметрами (керована НВЧ АФ з незалежним керуванням).

Застосування транзисторних УПІ дозволяє реалізувати всі перераховані типи керованих НВЧ АФ. Проектування цих фільтрів базується на сучасних методах теорії електричних кіл, а також методах, що застосовуються при проектуванні пасивних перестроювальних НВЧ фільтрів і низькочастотних перестроювальних RC-фільтрів і вибіркового підсилювачів. Керований НВЧ АФ у загальному випадку являє НВЧ АФ, кола керування і стабілізації. У окремому випадку у керованому НВЧ АФ не можна чітко розмежувати елементи, що забезпечують вибірковість, керування і стабілізацію.

При проектуванні керованих НВЧ АФ задаються не тільки вимоги, властиві перестроювальним фільтрам, але й додаткові вимоги, що враховують їх особливості, а саме:

- Діапазон управління D_y , що характеризується відношенням максимального значення керованого параметра $X_{y\max}$ до його мінімального значення $X_{y\min}$;

- Допустимі зміни фіксованих параметрів $dX_{\phi i}$;

- Закон керування $X_{yi} = f(F_y)$;

- Швидкодію, що характеризується максимальною швидкістю зміни керованого параметра за одиницю часу $U_y = (X_{y\max} - X_{y\min}) / dt_{\min}$, де $dt_{\min}$ - мінімальний час, необхідний для змін керованого параметра від $X_{y\min}$ до $X_{y\max}$;

- Потужність, яка витрачається на керування P_{yi} ;

- Простота пристрою керування;

- Запас стійкості НВЧ АФ у діапазоні керування K_y ;

- Стабільність пристрою керування до впливів різних дестабілізуючих факторів. Введення в схему НВЧ АФ додаткових кіл керування і стабілізації призведе до погіршення його надійності, масогабаритних характеристик та вартості. Як показують експериментальні та теоретичні дослідження [14, 15], головні чинники, що визначають ефективність керованого НВЧ АФ, це

метод, який використовується для керування параметрами, і простота схеми керування і стабілізації.

Для управління параметрами електричних схем застосовують прямі і непрямі методи. Прямі методи передбачають зміну керованого параметра шляхом безпосереднього впливу керуючого сигналу P_y на елементи схеми. При непрямому методі необхідний закон управління реалізується шляхом додаткового перетворення керуючого сигналу. Використання непрямих методів призводить до значного ускладнення схем, додаткових нелінійних спотворень; при цьому зберігається необхідність застосування прямих методів. Враховуючи все сказане, при побудові НВЧ АФ більш доцільне застосування прямих методів керування. Особливості їх здійснення у НВЧ АФ (на відміну від пасивних керованих фільтрів) - це можливість використання з метою керування та стабілізації залежності коефіцієнта перетворення УПІ від режиму роботи, можливість реалізації на його основі негативних і позитивних активних і реактивних елементів, а також можливість вибірково підвищувати добротність реактивних елементів. Це дозволяє використовувати при побудові керованих НВЧ АФ методу узгодженої перебудови LC-елементів. Можливості методу найбільш повно реалізуються при побудові керованих НВЧ АФ у вигляді різних комбінацій керуючих двополіусників (варикапів, $p-i-n$ діодів тощо) і чотириполіусників у вигляді УПІ. Метод узгодженої перебудови полягає в узгодженому налаштуванні керуючих елементів і зміні параметрів схеми таким чином, щоб вона у всьому діапазоні управління працювала близько межі стійкості, не переходячи її. Перевагою методу є можливість забезпечити стабільність параметрів схеми у діапазоні зміни керованого параметра і підвищити ефективність схеми при забезпеченні необхідної стійкості. Відомо, що система є стійкою, якщо корені її характеристичного рівняння розташовуються у лівій напівплощині комплексної площини частоти $p, = A + j\omega$. На підставі критерію Гурвіца-Рауса [16] необхідна умова стійкості

полягає у позитивному значенні всіх коефіцієнтів b_1 характеристичного рівняння системи. Достатня умова полягає у позитивному значенні деяких діагональних мінорів матриці Гурвіца, складеної з коефіцієнтів характеристичного рівняння. При цьому, для систем, які описуються характеристичними рівняннями другого, третього і четвертого порядків, до яких можна привести більшість одно- резонаторних керованих НВЧ АФ, достатня умова полягає у позитивності передостаннього діагонального мінору A_{n-1} , матриці Гурвіца ($d_{n-1} > 0$) ;

$$\begin{aligned} b_1 = c_1 &\rightarrow 0, \text{ при } n=2 ; \\ b_1 b_2 - b_3 b_0 &= c_2 \rightarrow 0, \text{ при } n=3 ; \\ b_3 (b_1 b_2 - b_3 b_0) - b_4 b_1^2 &= c_3^3 \rightarrow 0, \text{ при } n=4 , \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $C1, C2, C3$ - постійні.

При цьому поблизу границі стійкості квазірезонансна частота керованого НВЧ АФ

$$w_0 \approx \sqrt{b_0 / b_2} , \text{ при } n=2 ; \quad (1.2)$$

$$w_0 = \sqrt{b_1 / b_3} , \text{ при } n=3,4 .$$

Таким чином, якщо параметри елементів керованого НВЧ АФ узгоджено змінювати за таким законом, щоб чисельне значення лівої частини рівнянь (1.1) залишалося незмінним, то запас стійкості керованого НВЧ АФ залишатиметься також постійним при зміні або квазіре- зонансної частоти w за законом, що визначається рівняннями (1.2), або абсолютної смуги пропускання D_0 , або добротності Q , керованого НВЧ АФ.

Властивості [10] фільтра кількісно визначаються відносною величиною загасання, що вноситься ним в складові спектру електричних коливань: чим більше відмінність загасань в смузі затримання і смузі пропускання, тим сильніше виражені його фільтруючі властивості. По вигляду кривої залежності

загасання від частоти (по взаємному розташуванню смуг пропускання і затримання) розрізняють електричні фільтри:

- нижніх частот (ФНЧ), пропускає коливання з частотами не вище деякою граничної частоти f і пригнічує коливання з частотами вище f ;
- верхніх частот (ФВЧ), пропускає коливання з частотами вище за деяку граничну частоту f і пригнічує коливання з частотами нижче f ;
- смугово-проникні (СПФ) або смугові, пропускають коливання лише в кінцевому інтервалі частот від f_h до f_l ;
- смугово-затримуючі (СЗФ) або режекторні фільтри, зворотні СПФ по своїх частотних характеристиках.

Типи фільтрів. Фільтри, що знаходять застосування в обробці сигналів, бувають:

- аналоговими або цифровими;
- пасивними або активними;
- лінійними і нелінійними;
- рекурсивними і нерекурсивними.

Серед безлічі рекурсивних фільтрів окремо виділяють наступні фільтри (за виглядом передавальної функції):

- фільтри Чебишева
- фільтри Бесселя
- фільтри Баттерворта
- еліптичні фільтри

По тому, які частоти фільтром пропускаються (затримуються), фільтри підрозділяються на:

- фільтри нижніх частот (ФНЧ);
- фільтри верхніх частот (ФВЧ);
- смугові фільтри (смугово-пропускні, СПФ);
- смугово непропускні (режекторні) фільтри (СНФ);
- фазові фільтри.

Таблиця 1.1 - Фільтри нижніх частот[11]

	Фільтр Баттерворта	Фільтр Бесселя		Фільтр Чебишева (0.5Дб)		Фільтр Чебишева (0.2Дб)	
	К	f_n	К	f_n	К	f_n	К
2	1.586	1.274	1.268	1.231	1.842	0.907	2.114
4	1.152	1.432	1.084	0.597	1.582	0.471	1.924
	2.235	1.606	1.759	1.031	2.660	0.964	2.782
6	1.068	1.607	1.040	0.396	1.537	0.316	1.891
	1.586	1.692	1.364	0.768	2.448	0.730	2.648
	2.483	1.908	2.023	1.011	2.846	0.983	2.904
8	1.038	1.781	1.024	0.297	1.522	0.238	1.879
	1.337	1.835	1.213	0.599	2.379	0.572	2.605
	1.889	1.956	1.593	0.861	2.711	0.842	2.821
	2.610	2.192	2.184	1.006	2.913	0.990	2.946

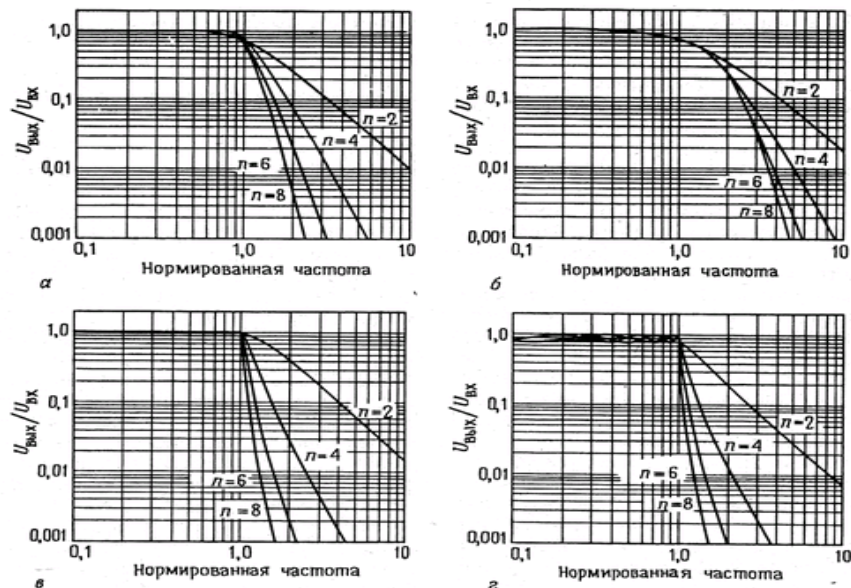


Рисунок 1.1 –Графіки нормованих частотних характеристик 2 - , 4 - , 6 - і 8 - полюсних фільтрів з табл. 1.1. Характеристики фільтрів Баттерворта (а) та Бесселя (б) нормовані приведенням ослаблення 3 дБ до одиничної частоти, а фільтри Чебишева - приведенням до цієї частоти ослаблення 0,5 дБ (в) і 2 дБ (г) відповідно

1.2 Варіанти схемотехнічної реалізації електричних фільтрів

У загальному випадку керований НВЧ АФ утворюється транзисторним УПІ і пасивними елементами, частина яких виконує функцію керуючих елементів. У окремому випадку номінали всіх пасивних елементів можуть

бути фіксованими, а функції керуючого елемента реалізуються за допомогою УПІ. В якості найпростішого керуючого НВЧ АФ використовується однорезонаторний взаємний НВЧ АФ, еквівалентна схема якого зображена на рис. 1.2а.

Тут $G'_r = G_r + G_c$, $G'_h = G_h + G_L$, G_c і G_L - активні провідності, що характеризують дисипативні втрати у ємності C та індуктивності L .

Фільтр являє собою паралельний коливальний контур, утворений LC елементами і включений паралельно НВЧ тракту. Основні параметри цього фільтра пов'язані з параметрами його елементів співвідношеннями

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} ; \quad (1.3)$$

$$Q_T = \omega_0 / d\omega = 1/G ; \quad (1.4)$$

$$K_0 = 4G'_r G'_h / G_E^2 . \quad (1.5)$$

Аналіз цих виразів дозволяє визначити, які елементи фільтра і по якому закону необхідно змінювати, щоб здійснювати керування одним з параметрів ω_0 , K_0 , чи Q_T , зберігши постійними інші параметри.

З табл. 1.2. випливає, що з метою керування у більшості випадків необхідно узгоджено змінювати параметри не тільки реактивних, а й активних елементів. Використання УПІ для перетворення імітансу керуючого елемента дозволяє реалізувати необхідний закон зміни імітансу з обмеженою кількістю керуючих елементів. Розглянемо це на прикладі використання УПІк з підключеним керуючим елементом.

Таблиця 1.2 – Способи керування параметрами активних фільтрів

Керуючий параметр фільтра	Стабілізуючий параметр фільтра	Необхідна залежність провідності еквівалентної схеми фільтра в процесі керування		
		L	C	G_t
$w_0 = 2\pi f_0$	K_0, df	—	—	—
$dw = 2\pi df$	K_0, f_0	↓	↑	—
K_0	df, f_0, Q_t	↓	↑	↓
$w_0 = 2\pi f_0$	K_0, Q_t	↑	↑	—

Примітка: ↑ збільшення, ↓ зменшення, — стабільність.

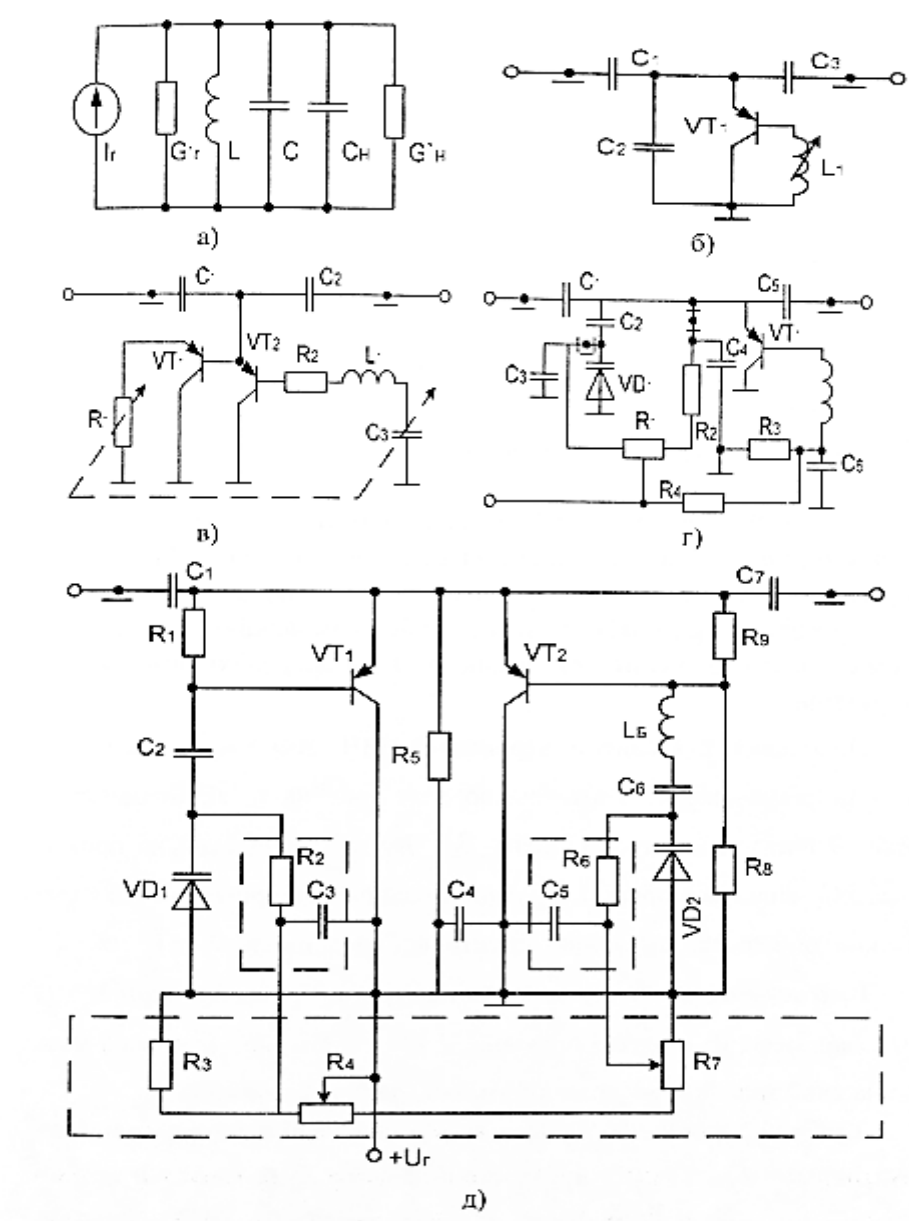


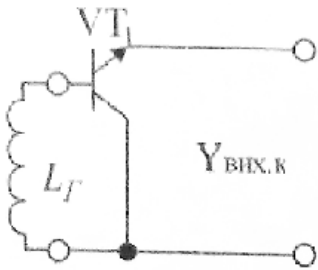
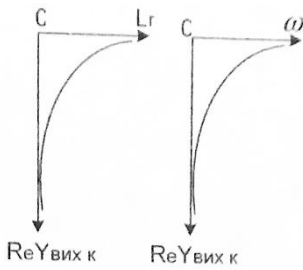
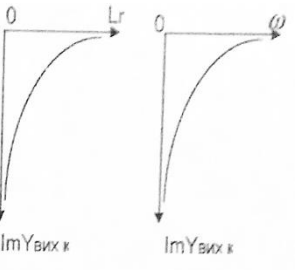
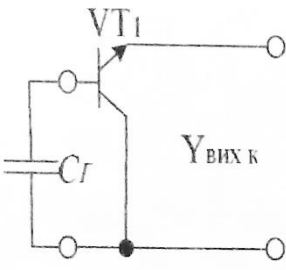
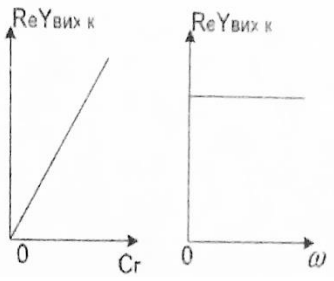
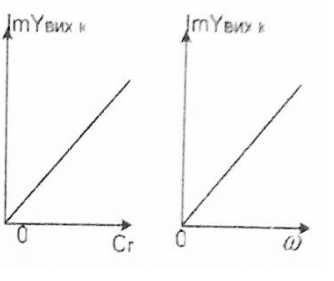
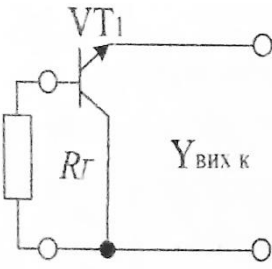
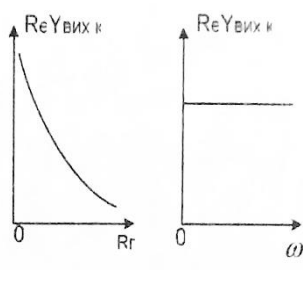
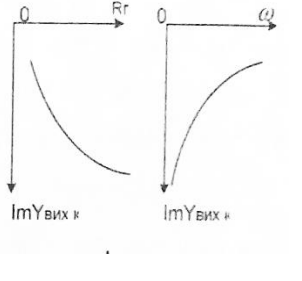
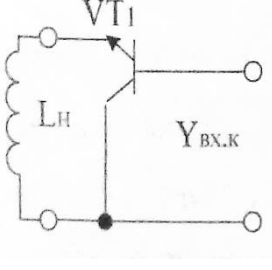
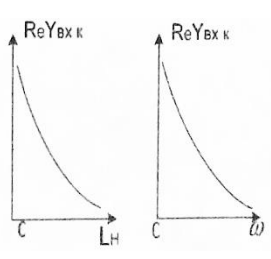
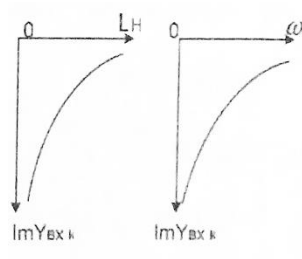
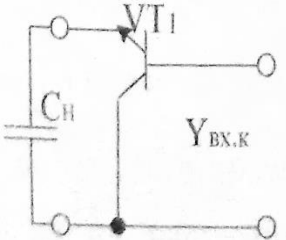
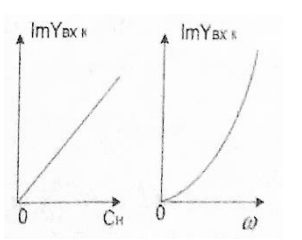
Рисунок 1.2– Різновиди схем аналогових керованих фільтрів

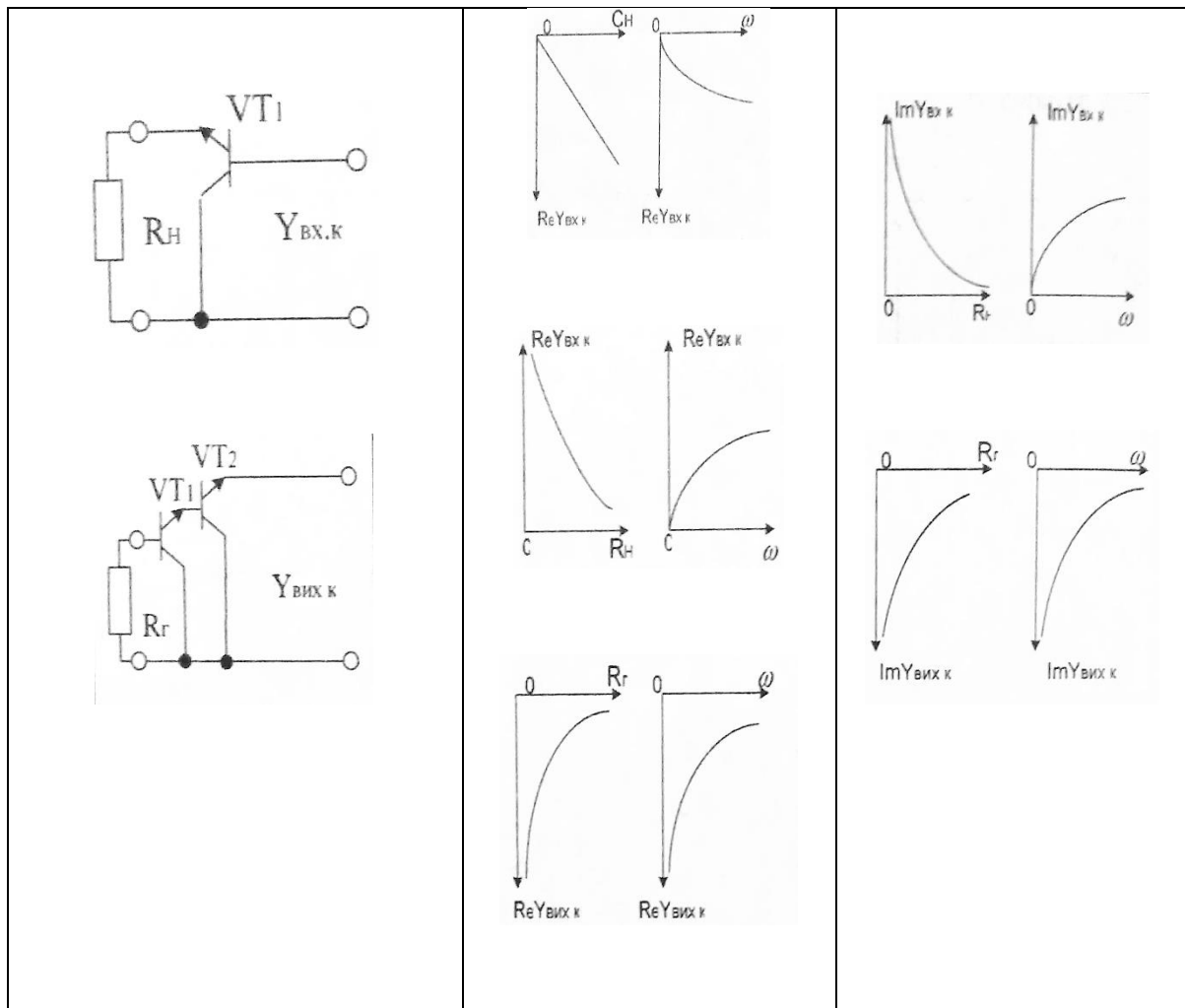
В табл. 1.3. наведені графічні залежності від частоти і параметра керуючого елемента, включеного на вході чи на виході УПк дійсною і уявною складових перетвореної провідності УПк. Аналізуючи їх, можна знайти потрібну комбінацію УП з керуючим елементом для синтезу керованого УП АФ з необхідним законом керування.

Наприклад, для синтезу керованого НВЧ АФ з постійним K_0 і dw та регульованою центральною частотою f у відповідності з табл. 1.3. необхідно, щоб ємнісна $B_c = j\omega C$ і сумарна дійсна провідність G_e фільтра у процесі керування залишались постійними, а перебудова здійснювалась зміною індуктивної провідності $B_L = 1 / j\omega L$.

Враховуючи, що частота ω змінюється оберненопропорційно L для забезпечення сталості провідності G необхідно, щоб вона мала однаковий знак приросту як від зміни L , так і від зміни ω_0 . З табл. 1.3. видно, що це досягається при зміні перетворюваної індуктивності L_r . Таким чином, схема фільтра буде мати вигляд, зображений на рис. 1.2б. В якості керованої індуктивності L_2 може бути використаний керуючий елемент виду УПк+ R_r .

Таблиця 1.3 – Реалізація закону зміни імітансу на прикладі використання УПШк

Схема керуючого елементів на базі УПШ	Перетворена дійсна провідність $ReY_{вих.к}, ReY_{вх.к}$	Перетворена уявна провідність $ImY_{вих.к}, ImY_{вх.к}$
		
		
		
		
		



Якщо стоїть задача реалізації аналогічного керованого НВЧ АФ з регульованим коефіцієнтом передачі K_0 при незмінній dw і w_0 , то з табл. 1.3. знаходимо, що потрібно виконувати узгоджене регулювання всіх реактивних і активних провідностей еквівалентної схеми керованого НВЧ АФ. Однак використання УПП_К дозволяє виконати ці зміни шляхом синхронного регулювання всього двох керуючих елементів схеми - активного опору R_1 і ємності C_3 (див. рис. 1.3 в).

Оскільки опір - jx_c ємності C_3 обирається меншим опору jx_l індуктивності, еквівалентний опір між базою і колектором транзистора VT_2 є індуктивним $Z_b = R_2 + j\omega L_b$ де $L_b = (X_L - X_c) / \omega$. Цей опір, трансформуючись у ланцюг емітера транзистора, визначає індуктивний характер його вихідної провідності з еквівалентною індуктивністю.

Враховуючи, що вхід першого транзистора з'єднаний з виходом другого,

при одночасному збільшенні керуючої ємності C_3 і зменшенні керуючого активного опору R_1 відбувається зростання негативної провідності $G_{вих2}^{(-)}$ і еквівалентної індуктивності $L_{вих2}$. В результаті частота передачі АФ зростає. Використання в якості керуючого елемента варикапа типу KB114 і $p-i-n$ діода типу 2A515A в УВЧ АФ, виконаних на транзисторах КТ3101, забезпечує стабільність резонансної частоти $\approx 1200 \pm 1$ МГц і смуги пропускання $df = 10 \pm 0,5$ МГц у діапазоні керування коефіцієнтом передачі dK від $+10$ до -10 дБ.

З метою стабілізації параметрів у процесі електричної перебудови фільтра можна використовувати узгоджене регулювання робочої точки транзистора, застосовуваного в якості УПН. Такий принцип стабілізації використовується в однорезонаторному НВЧ АФ (див. рис. 1.3 г),

Розглянуті керуючі НВЧ АФ відносяться до однопараметричних. При побудові багатопараметричних фільтрів ускладнюється в основному низькочастотний ланцюг керування. На рис. 1.3д наведена схема смуго-пропускнуго НВЧ АФ, у якому забезпечується роздільне керування смуг пропускання dw при фіксованих значеннях w_0 і k_0 частотою < 4 при фіксованих значеннях A_{ϕ} і K_0 . Не розглядаючи детально зміни імітансів схеми, які можна прослідкувати за допомогою табл. 1.2 і 1.3, обговоримо порядок роботи ланцюгів керування.

При подачі управляючого сигналу $U_{кер}$ емітерний перехід відкривається і інжектує у базу носії, щільність яких змінюється за законом зміни високочастотної складової напруги на колекторному переході, а струм відстає від нього внаслідок впливу індуктивності L_1 і резистора R_1 .

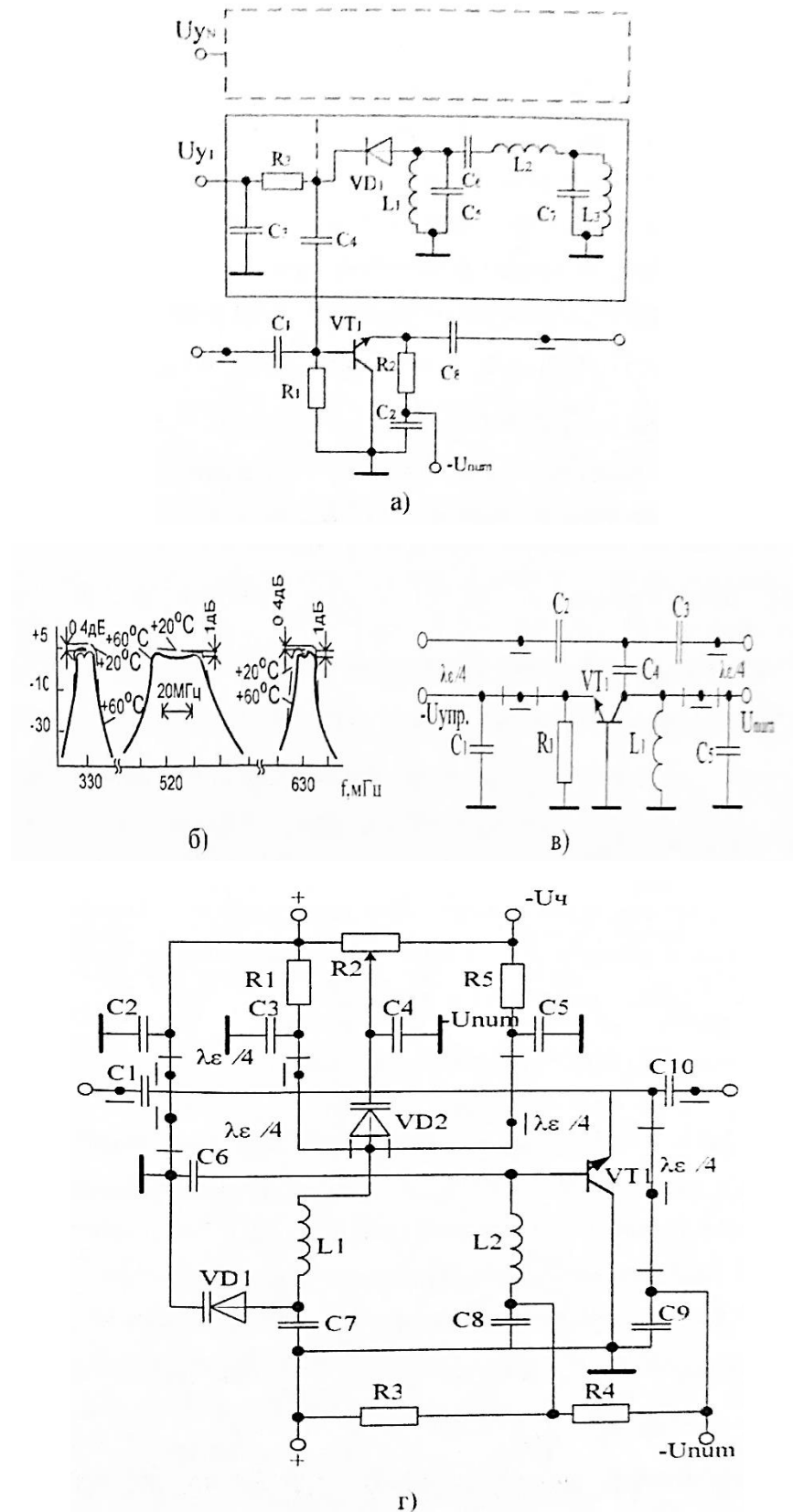


Рисунок 1.3 – Різновиди схем дискретних керованих активних фільтрів на транзисторі КТ3101

Внаслідок цього повний опір вихідного ланцюга транзистора має індуктивний характер з негативною дійсною складовою. Еквівалентна індуктивність такого ланцюга, резонуючи з ємністю $C3$, визначає вибіркові властивості НВЧ АФ, а активний опір $\operatorname{Re} Y_{\text{вих.б}}^{(-)}$ компенсуючи втрати, забезпечує потрібний коефіцієнт передачі K_0 .

Можливість синтезу за допомогою УПІ негативного опору знімає обмеження на коефіцієнт перекриття K_c , який пов'язаний зі спадом добротності варикапа до $Q, = 1$. У схемі фільтра на рис. 1.3г ця властивість використовується для керування частотою f_0 у діапазоні від значень, які знаходяться нижче граничної частоти транзистора $f_{01} \leftarrow f_T$ значень f_{02} які знаходяться вище його максимальної частоти генерації $f_{\text{макс}}$.

Фільтр працює таким чином. При переміщенні движка потенціометра $R2$ вліво варикапи $VD1$ і $VD2$ мають великий ємнісний опір. На низьких частотах виконуються нерівності

$$f_{01} < f_T; |X_{L2}| - |X_{VD1}| > |X_{L1}| - |X_{VD2}| \quad (1.6)$$

де $|X_{L1}|, |X_{L2}|, |X_{VD1}|, |X_{VD2}|$ - модулі уявних опорів індуктивностей $L1$ і $L2$ та варикапів $VD1$ і $VD2$. З урахуванням цих нерівностей повний опір між базою і колектором транзистора $VT1$ є індуктивним, що обумовлює індуктивний характер з негативною дійсною складовою ланцюга емітер-колектор транзистора $VT1$, яка, резонуючи з ємкісним опором $X_{VD}-X_L$ забезпечує частотно-вибіркове пропускання сигналу на частоті $f_{01} < f_T$.

При переміщенні движка потенціометра $R2$ вправо варикап $VD1$ відкривається і його активний опір стає низьким, а варикап $VD2$ ще більше закривається напругою джерела. Його ємність зменшується, що приводить до збільшення резонансної частоти паралельного контуру, який створений індуктивністю $L2$ і ємністю варикапа $VD1$. Опір контуру зростає, що обумовлює розрив ланцюга між базою і колектором транзистора по змінному

струму на частоті $f_{02} > f_{\max}$. В цьому випадку повний опір між емітером і колектором транзистора $VT1$ має позитивну дійсну і ємнісну уявну складові на частоті f_{02} . Ємнісна складова резонує з індуктивністю $L1$, забезпечуючи фільтрацію сигналу.

В [4] розглянуті НВЧ АФ, які одночасно реалізують характеристики ПЗФ на частоті f_{01} і ППФ на частоті f_2 (рис. 1.4). В НВЧ АФ на рис. 1.4а це досягається шляхом використання декількох УПШк, що дозволяє розширити смугу пропускання. В пристрої, який описаний в [4], застосовуються один УПШк (рис. 1.4в), що забезпечує простоту реалізації, але звужує смугу пропускання. Введення до схеми ключів $S1-S3$, виконаних, наприклад на $p-i-n$ діодах, дозволяє керувати формою АЧХ (рис. 1.4 б г).

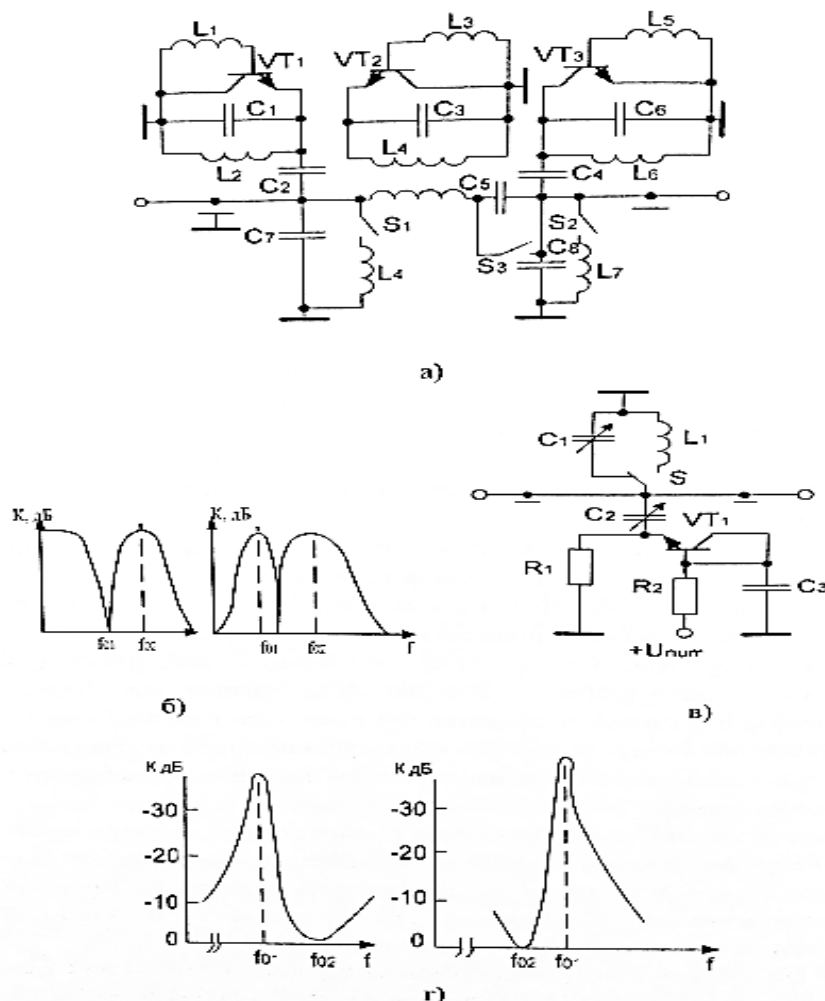


Рисунок 1.4 – Різновиди керованих НВЧ активних фільтрів з складною формою АЧХ

1.3 Висновки до розділу

У даному розділі були розглянуті види фільтрів та їх особливості. Ми дізнались як відбувається керування і яких типів воно буває. У більшості практичних випадків інтерес представляють керовані НВЧ АФ з лінійним керуванням. Керовані НВЧ АФ, як і фіксовані, можуть бути взаємними і невзаємними. У разі плавної зміни керованого параметра x_{yi} їх відносять до групи аналогових, а в разі стрибкоподібної зміни x_{yi} - до групи дискретних керованих НВЧ АФ.

В [2] якості керованих параметрів x_{yi} смугових НВЧ АФ використовуються: квазірезонансна частота f_0 , абсолютна смуга пропускання dF , добротність $Q_T = f_0 / df_i$ і коефіцієнт передачі на квазірезонансній частоті K_0 . В якості керованих параметрів ФНЧ і ФВЧ використовується нижня і верхня граничні частоти, коефіцієнт передачі у смузі пропускання. Керовані активні ФНЧ і ФВЧ в діапазоні НВЧ у наш час широкого застосування не отримали і у подальшому не розглядаються.

Найбільш часто виникає задача управління одним з параметрів x_{yi} фільтра при мінімальній зміні інших фіксованих параметрів. Такі керовані НВЧ АФ називаються однопараметричними. Якщо здійснюється одночасне синхронне керування декількома параметрами, то керовані фільтри є багато параметричними. Можлива побудова керованих фільтрів з незалежним керуванням кількома параметрами (керована НВЧ АФ з незалежним керуванням).

Застосування транзисторних УПІ дозволяє реалізувати всі перераховані типи керованих НВЧ АФ. Проектування цих фільтрів базується на сучасних методах теорії електричних кіл, а також методах, що застосовуються при проектуванні пасивних перестрою вальних НВЧ фільтрів і низькочастотних перестрою вальних RC-фільтрів і вибіркового підсилювачів. Керований НВЧ

АФ у загальному випадку являє НВЧ АФ, кола керування і стабілізації. У окремому випадку у керованому НВЧ АФ не можна чітко розмежувати елементи, що забезпечують вибірковість, керування і стабілізацію.

Також, були розглянуті основні вимоги до проектування та конструювання електрично керованих фільтрів, варіанти схемо технічної реалізації. Були досліджені особливості наведених схем і принцип їх роботи.

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ ФІЛЬТРІВ

2.1 Керуючі елементи фільтрів

При створенні НВЧ пасивних і низькочастотних RC активних аналогових керованих фільтрів в якості керуючих елементів використовуються електрично керовані індуктивності L та ємності C . Застосування з цією метою активних опорів R є небажаним, бо це призводить до зниження добротності пасивного і зменшення стабільності активного RC -фільтрів. У НВЧ пасивних дискретно керованих фільтрах використовуються електрично керовані активні опори, що дозволяє збільшити діапазон керування D_y але призводить до зниження вибіркової фільтра. Наявність у керованому НВЧ АФ від'ємного дійсного імпедансу $\operatorname{Re}W^{(-)}$ дозволяє не лише зберегти потрібну вибіркковість фільтра при використанні в якості керуючого елемента активного опору, але і здійснювати керування параметрами шляхом зміни $\operatorname{Re}W^{(-)}$. Тому, в якості керуючих елементів НВЧ АФ використовуються як активні, так і реактивні LC -елементи [7, 8].

В діапазоні НВЧ отримали застосування такі керуючі елементи: варикапи, $p-i-n$ діоди, лавинно-пролітні діоди (ЛПД), сегнетоелектрики, ферити, біполярні і польові транзистори, їх можна розподілити за числом електродів на двоелектродні (варикапи, $p-i-n$ діоди, сегнетоелектрики, ферити, ЛПД) і трьохелектродні (біполярний і польовий транзистори). Наявність третього електрода дещо ускладнює схему керування, але розширює функціональні і схемотехнічні можливості керуючого елемента. У залежності від вигляду управляючого сигналу F_y всі керуючі елементи поділяються на ті, що керують напругою $U_{уп}$ (варикап, сегнетоелектрик, польовий транзистор) і струмом $I_{уп}$ ($p-i-n$ діод, ферит, біполярний транзистор, ЛПД). Крім того, параметрами біполярного транзистора і ЛПД можна керувати шляхом зміни напруги

зворотно зміщеного p - n переходу. З точки зору електричних характеристик перевага надається керуючим елементам, які керуються напругою $U_{\text{упр}}$, бо при цьому у колі керування звичайно протікають струми менші 10^{-6} А. Вони, як правило, мають і більшу швидкодію, ніж керуючі елементи з керуванням струму $I_{\text{упр}}$.

Основні вимоги, що ставляться до керуючих елементів АФ: можливість електричної зміни керуючого параметра ємності, опору, індуктивності; наявність великого діапазону зміни керуючого параметра; висока добротність (для реактивних елементів); мала споживана потужність; висока швидкодія; висока температурна стабільність; малі габаритні розміри і маса. З точки зору як промислового випуску УВЧ АФ, так і радіоаматорської практики найбільш повно цим вимогам відповідають $p-i-n$ діоди і варикапи.

Варикапом називається напівпровідниковий діод, який використовується в якості електричної керованої ємності. Найбільш широке застосування для електронного налагодження отримала p - n -структура варикапу. Ємність такої структури залежить від прикладеної напруги, як показано на рис. 2.1.

При відсутності напруги зміщення рухомі носії заряду у такому напівпровідниковому діоді залишають область, що безпосередньо прилягає до p - n -переходу, в результаті чого утворюється вузька область некомпенсованого нерухомого заряду, який носить назву збідненого шару чи шару просторового заряду (рис. 2.2).

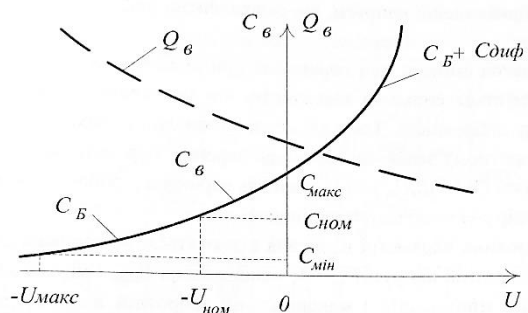


Рисунок 2.1 – Залежність ємності C_B і добротності Q_B від прикладеної до нього напруги U

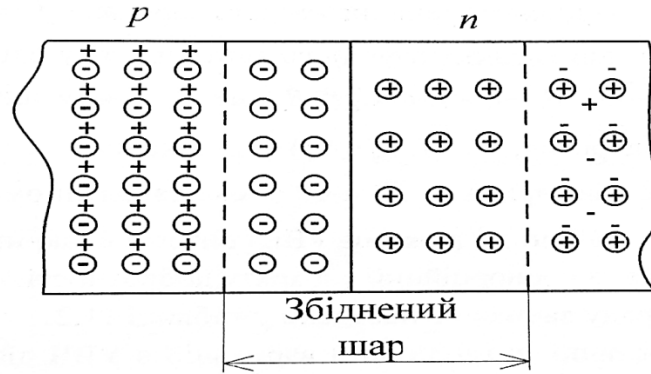


Рисунок 2.2 – Розподіл зарядів у напівпровідниковому діоді

Якщо прикласти до діода напругу зворотного зміщення, рухомі носії заряду перемістяться у напрямку від переходу, тим самим розширяючи збіднений шар. Це явище призводить до появи залежної від прикладеної напруги зарядної ємності переходу. При прикладанні до діода прямого зміщення, внаслідок зниження потенціального бар'єру p - n -переходу, відбувається рух дірок з p -області в n -область і зустрічний рух електронів. В результаті заряд в p - і n -областях змінюється під дією прикладеної напруги, що еквівалентно дифузійній ємності p - n переходу.

Дифузійна ємність, яка переважає при прямому включенні характеризується сильною залежністю від температури і частично має низьку добротність. Тому варикапи в основному використовуються при зворотному зміщенні, коли має перевагу бар'єрна ємність добротність якої $Q = 1/\omega R_s C_v$, де C_v — ємність варикапа у робочій точці; R_s — омичний опір p - і n - областей напівпровідника.

До основних параметрів варикапа відносяться: номінальна ємність $C_{ном}$ при зворотній напрузі $u_{зв} = 4$; максимальна $C_{макс}$ і мінімальна $C_{мін}$ ємності при мінімальній і максимальній зворотній напрузі; добротність Q при зворотному зміщенні 4 В; температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ), що характеризує відношення відносної зміни ємності при заданій напрузі до абсолютної зміни температури, яку вона викликала, коефіцієнт перекриття по ємності $K_c = (C_{макс} + C_k)/(C_{мін} + C_k)$, де C_k ємність корпусу варикапа; гранична частота варикапа $f_{гр} = 1/2R_s C_{мін}$; якість варикапа, що характеризує його можливості у схемах

комутатора, $K_B = (\sqrt{A_3 - 1}) / (A_n - 1) = 1/w^2 C_B^2 R_S^+ R_S^-$, де A_3 - затухання комутатора у режимі «відкрито»; $w_0 = 1/\sqrt{L_S C_B}$ - резонансна частота; L_S - індуктивність виводів варикапа; R_S^- і R_S^+ - еквівалентні омичні опори p - і n -областей відповідно до режимів «Відкрито» і «Закрито». Коефіцієнт якості варикапа пропорційний квадрату добротності.

Параметри ряду варикапів наведено у таблиці 2.1.

При використанні p -і- n діодів і варикапів в УВЧ діапазоні необхідно враховувати не лише розглянуті параметри, але і елементи корпусу, опори яких стають сумірними з опорами напівпровідникової структури. Урахування цих елементів здійснюється за допомогою фізичної еквівалентної схеми, зображеної на рис. 2.3, яка в УВЧ діапазоні може бути застосована як до p -і- n діодів, так і до варикапів.

На цій схемі L_S і C_K — індуктивність і ємність виводів і корпусу діода. Їх значення залежить від виконання корпусу діода і складає: $L_S \approx (2-5)$ нГн, $C_K \approx (0,1-0,5)$ пФ. У безкорпусному варіанті виконання, що використовується у гібридних мікросхемах із загальною герметизацією, в УВЧ діапазоні цими величинами можна знехтувати.

Таблиця 2.1—Параметри ряду варикапів

Тип пристрою	C_e			K_c	Q_B			$I_{зв},$ мкА	Максимальна потужність сигналу		
	пФ	при $U_{зв},$ В	При $f,$ МГц		Одиниць	при $U_{зв},$ В	При $f,$ МГц		мВт	При $t^\circ C$	при $U_{зв},$ В
KB109A	2,3-2,8	25	1-10	4-5,5	300	3	50	0,5	5	50	25
KB112A	9,6-14,4	4	1	1,8	200	4	50	1	-	-	25
KB110A	12-18	4	1-10	2,5	300	4	50	1	100	50	45
KB102A	14-23	4	1-10	2,5	40	4	50	1	90	50	45
Д901A	22-32	4	50	3,6-4,4	25	4	50	1	90	50	45
KB107A	26,4-39,6	4	1-10	5-7	180	4	50	1	90	50	45
KB107A	10-40	2-9	1-10	1,5	20	2,9	10	100	100	50	5,5-16

Таблиця 2.1–Параметри ряду варикапів

KB113A	54,4-81,6	4	1	4,4	300	-	10	1	100	25	45
KB114A	90-120	4	1	4,4	300	-	10	10	2	2	150
KB104A	100-700	4	1-10	2,5	100	4	10	5	100	50	45
KB115A	168-252	0	-	-	-	-	-	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-	100
KB101A	400-600	1	1-10	1,1-1,2	12	0,8	10	1	-	-	4
KB116	168-252	1	1	18	100	1	1	1	-	-	10
KB119A	400-600	4	1-10	18	100	1	1	1	-	-	12

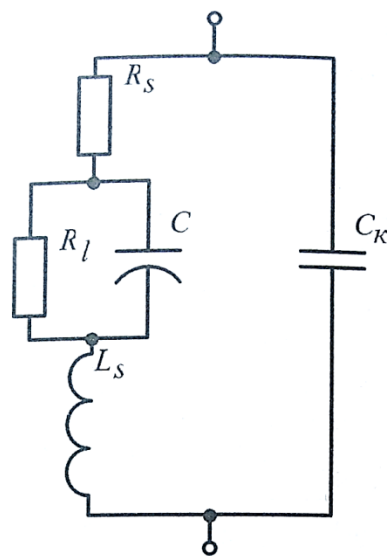


Рисунок 2.3– Еквівалентна схема варикапа в діапазоні УВЧ

Теорія і практика застосування двохелектродних керуючих елементів широко описана у літературі. Тому розглянемо параметри керуючих елементів на базі транзисторних УПІ. Вони можуть використовувати як однокаскадні, так і багатокаскадні УПІ, а також їх комбінації з двохелектродними керуючими елементами (рис. 2.3).

Використовуючи різноманітні схеми включення біполярного і польового транзисторів, можна реалізувати 24 типи однокаскадних керуючих елементів. Найбільш практичний інтерес викликають керуючі елементи, що мають динамічний від'ємний опір. Широке практичне застосування отримали три види керуючих елементів: УПІ_к із закороченим по змінному струму вхідним

колом (рис. 2.4а), УПІ_к із закороченим по постійному струму вхідним колом (рис. 2.4в), УПІ_к із розімкнутим по постійному струму вхідним колом (рис. 2.4е). Керуючі елементи перших двох видів мають динамічний від'ємний опір на частотах $f < f_{\text{макс}}$, керуючий елемент третього виду - на частотах $f > f_{\text{макс}}$. Повний опір керуючого елемента першого виду у діапазоні частот $f < 0,5f_T$, де $1/\omega C_K \gg r_B$, дорівнює $Z_{\text{вих.к}} = r_B(1 - h_{21})$ [5]. З останньої формули видно, що відбувається зворотне перетворення омичного опору бази r_B , Зміна робочої точки транзистора незначно змінює цей опір, але призводить до суттєвої зміни коефіцієнта конверсії $(1 - h_{21})$.

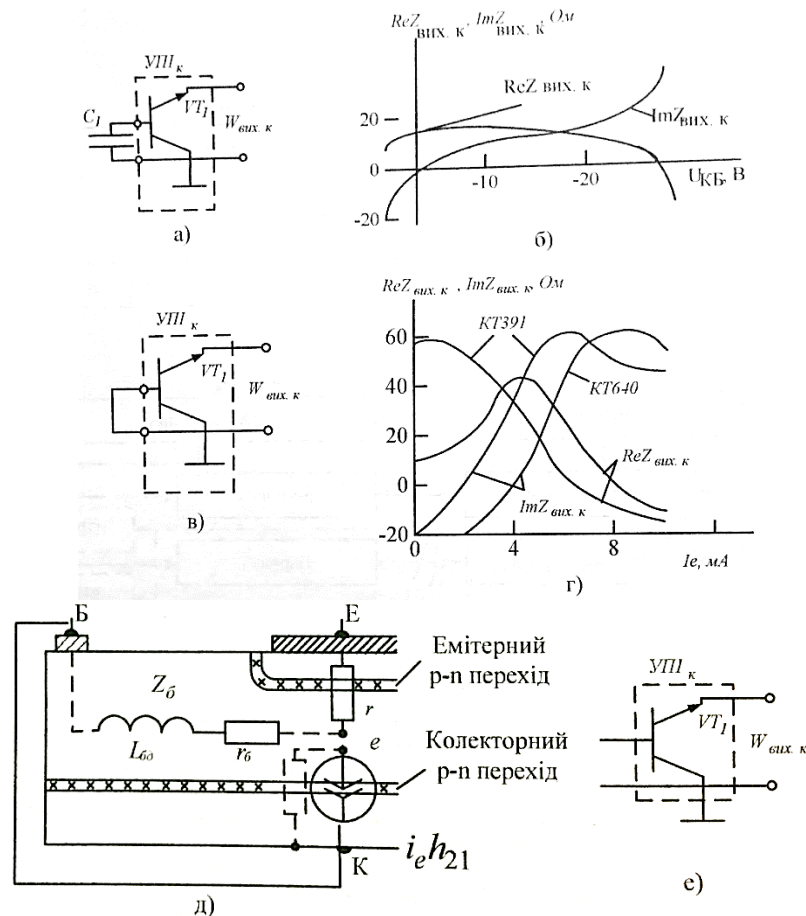


Рисунок 2.4– Керуючі елементи (а, в, д, е) на базі одно каскадних транзисторних узагальнених перетворювачах імітансу та їх характеристики (б, г)

При наближенні до межі пробією виникає лавинне помноження носіїв струму у колекторному переході ($h_{210} > 1$), і при коефіцієнті лавинного помноження $M_{\text{л}} > 2/h_{210}(1 - wC_{\text{к}}r_{\text{б}})$ маємо $\text{Re}Z_{\text{вих.к}} < 0$ (Рис. 2.4б) [2, 3]. Як видно з графіка, змінюючи напругу на колекторному переході $U_{\text{кб}}$ можна керувати повним опором цього керуючого елемента від позитивних до від’ємних значень. Недоліки розглянутого керуючого елемента — його низька температурна стабільність і надійність, які характерні для всіх напівпровідникових пристроїв, що працюють у лавинному режимі. Використання точкових або одноперехідних транзисторів, в яких у номінальному режимі $h_{210} > 1$, дозволяє реалізувати керуючі елементи з аналогічними властивостями, без використання режиму лавинного помноження.

В керуючому елементі другого виду (рис. 2.4. в) внаслідок закорочування виводів бази і колектора зростає ширина бази W_6 транзистора. При великому рівні інжекції повний опір бази $Z_6 = r_6 + j\omega L_{\text{БД}}$ стає індуктивним.

Оскільки вивід бази з’єднаний з виводом колектора, то опір Z_b включений паралельно колекторному переходу (рис. 2.4д) і перетворюється у повний опір вихідного кола транзистора

$$Z_{\text{вих.к}} = Z_6(1 - h_{21}) = r_b \text{Re}(1 - h_{21}) - \omega L_{\text{БД}} \text{Im}(1 - h_{21}) + j[\omega L_{\text{БД}} \text{Re}(1 - h_{21}) + r_b \text{Im}(1 - h_{21})]. \quad (2.1)$$

При $r_b \text{Re}(1 - h_{21}) < \omega L_{\text{БД}} \text{Im}(1 - h_{21})$, що забезпечується підвищенням струму емітера, маємо $\text{Re}Z_{\text{вих.к}} < 0$ (рис. 2.4г).

Таким чином, розглянутий елемент має властивості керуючого елемента першого виду, але не використовує режим лавинного помноження, що підвищує його температурну стабільність і надійність. Недолік цього елемента — необхідність забезпечувати режим високого рівня інжекції, що призводить до росту потужності, яка витрачається на керування (більше 10 мВт при використанні транзистора типу КТ371А).

В керуючому елементі третього виду (рис. 2.4е), внаслідок розриву по

змінному струму кола бази транзистора, поява динамічного від'ємного опору між виводами транзистора можлива лише на частотах, вищих його максимальної частоти генерації $f_{\max}$ [4]. У такому керуючому елементі відбувається зворотне перетворення опору бар'єрної ємності колекторного переходу $1/wC_k$ у повний опір вихідного кола УПІ: $Z_{\text{вих.к}} = -j(1 - h_{21})/wC_k$. Найбільша крутизна керування перетвореним опором $Z_{\text{вих.к}}$ спостерігається при зміні напруги $U_{\text{кб}}$ яка впливає як на коефіцієнт конверсії $(1 - h_{21})$, так і на значення перетвореного опору $-j/wC_k$. Зміна струму емітера не впливає на значення C_k , а впливає лише на параметр $(1 - h_{21})$, що обмежує діапазон зміни перетвореного імітансу $Z_{\text{вих.к}}$.

Розглянуті види однокаскадних керуючих елементів суттєво змінюють свою добротність у діапазоні регулювання керованого параметра, що є його недоліком. Але реалізація керуючого елемента з використанням лише одного УПІ забезпечує їх високу технологічність.

Багатокаскадні керуючі елементи на основі УШ [4], або у вигляді комбінації УШ з двоелектродним керуючим елементом. Керування багатокаскадним керуючим елементом здійснюється зміною режимів живлення транзисторного УПІ [4] та двоелектродного керуючого елемента. Звернемо увагу на переваги, які надає використання УШ.

Відомо [5], що діапазон переналаштування параметрів частотно-вибіркових пристроїв визначається коефіцієнтом перекриття K_x по керуючому параметру (наприклад, для варикапа це коефіцієнт перекриття по ємності K_c).

Одним з обмежень значень K_c є зменшення добротності керуючого елемента. Враховуючи, що УПІ дозволяє синтезувати динамічний від'ємний опір $\text{Re}Z^-$, можливе підвищення добротності керуючого елемента, яке призведе до росту коефіцієнта перекриття K_c . Покажемо це на прикладі керуючого елемента виду $\text{УПІ}_n = 1 + C_h$.

Відомо, що $K_c = \left(\frac{C_{\max}}{C_{\min}}\right)$ де ємність $C_{\min}$ обмежена напругою пробою

варикапа (рис. 2.5), а ємність $C_{\text{макс}}$ відповідає добротності варикапа $Q_e = 1$. Враховуючи, що $Q_e = l/a > R_s C$, знаходимо $C_{\text{макс}}(Q_v = 1) = 1/R_s \omega$. При підключенні варикапа до УПІ його добротність підвищується до $Q_{el} = l/C(R_s - \text{Re}Z)$. Звідси знаходимо $C_{\text{макс1}}(Q_v = 1) = 1/\omega(R_s - \text{Re}Z^{(-)})$.

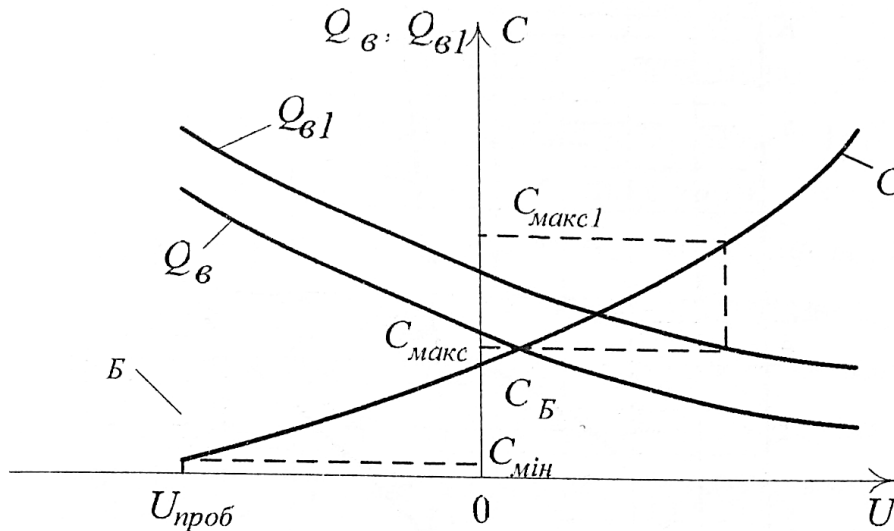


Рисунок 2.5 – Залежність ємності C і добротності Q_v варикапа від керуючої напруги

Враховуючи, що при цьому $C_{\text{мін}}$ не змінюється, визначаємо $\frac{K_{c1}}{K_{c1}} \left[\frac{R_s}{R_s - \text{Re}Z^{(-)}} \right]^{\frac{1}{2}} = m^{1/2}$, тобто коефіцієнт перекриття по ємності варикапа збільшився в $\sqrt{m}$ разів, де m - коефіцієнт збільшення добротності.

Отримане відношення є наближеним, бо не враховує зниження власної добротності варикапа Q_v внаслідок зменшення диференціального опору $p-n$ переходу, яке при прямому зміщенні змінюється оберненопропорційно струму. Експериментальні дослідження з використанням варикапів типу KB109 і УПІ_к на транзисторі КТ391 показали можливість збільшення його K_c в 1,2—1,5 рази.

Зміна перетвореного імітансу УПІ від від'ємних до позитивних значень забезпечує високу якість таких керуючих елементів. Якість однокаскадного керуючого елемента (див. рис. 2.4а) при зміні струму емітера I_e досягає $K_1 = 200$ одиниць (рис. 2.3).

Використання двокаскадних УПІ_к з $Z_r = R_6$ і багатокаскадного керуючого елемента типу УПІ_к + L_r при тому ж керуючому впливі забезпечує $K_2 = K_3 = 800$ одиниць. Для порівняння - якість $p-i-n$ діодів у розглянутому діапазоні частот складає 150-200 одиниць. Керовані елементи на базі УПІ мають ще одну важливу перевагу - широкий діапазон керованих впливів (див. рис. 2.3).

При використанні перерахованих керованих елементів з широким діапазоном перетвореного імпедансу спостерігається зміна знака дійсної складової перетвореного імпедансу (див. рис. 2.4б,г), що призводить до суттєвої зміни його добротності. Цей недолік відсутній у керуючому елементі, в якому використовується спосіб управління шляхом зміни полярності постійних напруг, прикладених до електродів транзистора [5].

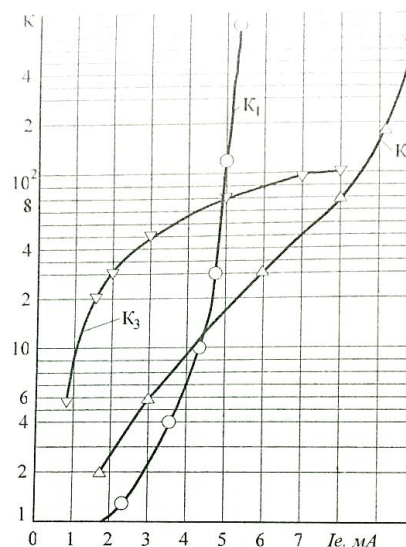


Рисунок 2.6 – Залежність якості керуючих елементів на базі УПІ_к на транзисторі ГТ 318 від струму емітера ($f = 0,5 \text{ ГГц}$, $U_{кб} = -5\text{В}$)

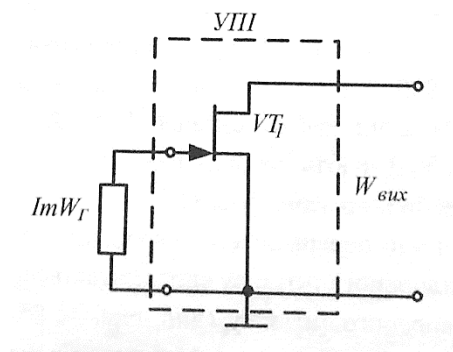


Рисунок 2.7 – Керуючий елемент на польовому транзисторі

У початковому стані робоча точка польового транзистора VT_1 знаходиться в активній області. Індуктивна провідність $-j/\omega L_T$ конвертується у вихідну провідність $Y_{П_С}$, яка містить від'ємну дійсну $\text{Re}Y_{\text{вих}С} < 0$ і індуктивну уявну $\text{Im}Y_{\text{вих}С} < 0$ складові. При зміні полярності напруги між витком і стоком завдяки відносній симетрії напівпровідникової структури польового транзистора відносно затвора реалізується $Y_{П_В}$, вихідний імітанс стає ємнісним $\text{Im}Y_{\text{вих}В} > 0$ з дійсною складовою $\text{Re}Y_{\text{вих}В} < 0$. Наприклад, при використанні транзистора Шотткі типу АП325 і перетвореного імітансу $R_l \text{Im}Y_T = -5,9$ керуючий елемент у нормальному режимі живлення на частоті 1 ГГц має $R_l \text{Im}Y_T = -1,5 - j3,8$, а при інвертуванні полярності напруги живлення $R_l Y_{\text{вих}Х} = -3,2 + j6$. Якщо задавати визначений струм стоку, то у кожному з режимів реалізується однакове значення динамічної від'ємної провідності, що забезпечує постійність добротності керуючого елемента при перебудові його уявної провідності від ємнісних до індуктивних значень.

2.2 Розробка та дослідження активних електрично керованих фільтрів низької частоти

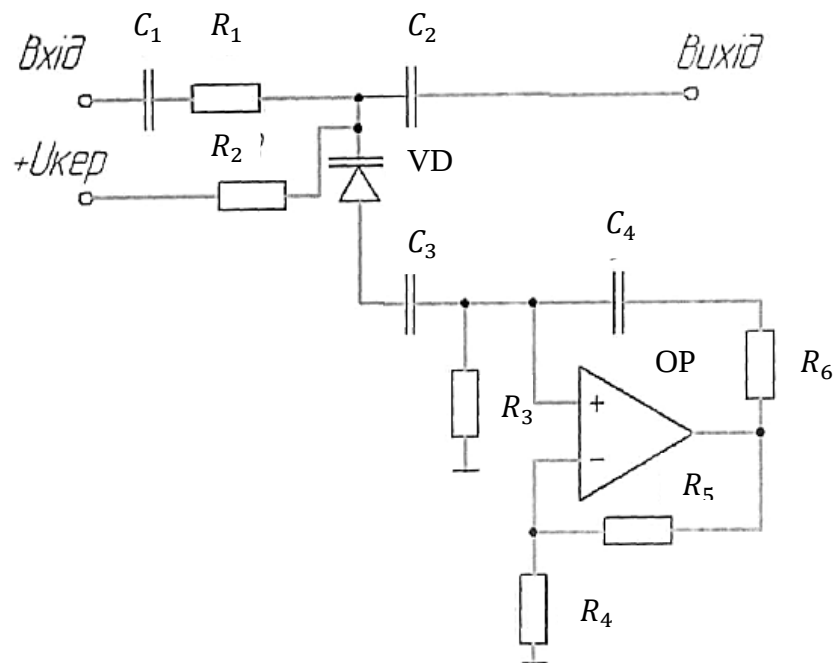


Рисунок 2.8 – Активний керований електричний фільтр низької частоти

Дана модель належить до області радіотехніки і може бути використана як активний фільтр з електричним керуванням.

Відомий пристрій, що пропускає низькі частоти та затримує частоти, що розташовані вище частоти зрізу фільтра, складається з послідовно з'єднаних конденсатора і резистора. Недоліком такого пристрою є відсутність електричного керування частоти зрізу, що призводить до неможливості електричного керування смугою пропускання електричного фільтра, що обмежує функціональні можливості пристрою.

В основу корисної моделі поставлена задача створення активного керованого електричного фільтра низької частоти, в якому за рахунок введення нових елементів і зв'язків між ними, розширюється діапазон переналаштування частоти зрізу та підсилення корисного сигналу в смузі пропускання, що розширює функціональні можливості пристрою.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій, який містить C_1 і C_2 , R_1 і R_2 та варикап введено операційний підсилювач, R_3, R_4, R_5, R_6 та C_3 і C_4 , причому перший вивід C_1 утворює входну клему, а його другий вивід з'єднаний із першим виводом R_1 , другий вивід R_1 з'єднаний із другим виводом R_2 , першим виводом варикапа та першим виводом C_2 , перший вивід R_2 утворює входну клему напруги керування, другий вивід варикапа з'єднаний із першим виводом C_3 , другий вивід C_2 утворює вихідну клему, другий вивід C_3 з'єднаний із першим виводом R_3 , C_4 і першим входним виводом операційного підсилювача, другий вивід R_3 з'єднаний із землею, другий входний вивід операційного підсилювача з'єднаний із першим входом R_4 і R_5 , причому другий вхід R_4 з'єднаний із землею, а R_5 із вихідним виводом операційного підсилювача та другим виводом R_6 , перший вивід R_6 з'єднаний із другим виводом C_4 .

Активний керований електричний фільтр низьких частот працює наступним чином. При подачі входного сигналу, який проходить через C_1 , сигнал надходить на вхід активного керованого електричного фільтра низької

частоти, де він фільтрується. Завдяки тому, що варикап має малий реактивний опір на високих частотах, шунтуючи струми високих частот, а на низьких частотах він має значний реактивний опір завдяки R_1 і R_2 , утворюється фільтруюча ланка, через яку не проходять коливання високої частоти. Постійна напруга керування подається на варикап через R_2 . Завдяки включенню в схему послідовно до варикапа від'ємної ємності, яка реалізована на операційному підсилювачі, R_3, R_4, R_5, R_6 та C_3 і C_4 , забезпечується можливість керування частотою зрізу в більш широкому частотному діапазоні.

2.3 Розроблення та дослідження смуго-пропускательного фільтра на операційному підсилювачі

Визначимо $f_{B.зр.}$ (рівень частотних спотворень 3дБ) повторювача напруги на операційному підсилювачі (рис. 2.9), якщо операційний підсилювач має внутрішню корекцію, а його параметри: $f_{од.} = 2\text{МГц}$; $K_0 = 10^5$. (Інші параметри ОП відповідають ідеальному ОП).

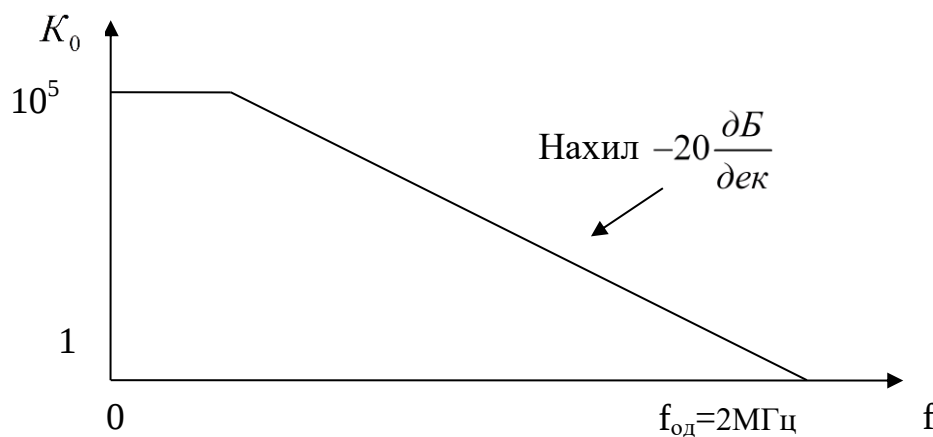


Рисунок 2.9 – Логарифмічна АЧХ операційного підсилювача з внутрішньою корекцією

На частоті $f_{B.зр.}$ коефіцієнт передачі повторювача дорівнює

$$K_{\beta_B} = \frac{K_{OB}}{1 + K_{OB} \cdot \beta},$$

де K_{OB} - коефіцієнт підсилення ОП з розімкненим колом ВЗЗ на $f_{B.зр.}$;

$\beta=1$ коефіцієнт передачі кола ВЗЗ.

Необхідно визначити потрібне K_{OB} з умови

$$K_{\beta_B} = 0,707; \beta=1.$$

$$K_{\beta_B} + K_{\beta_B} \cdot K_{OB} \cdot \beta = K_{OB}.$$

$$K_{OB} = \frac{K_{\beta_B}}{1 - K_{\beta_B} \cdot \beta} = \frac{0,707}{1 - 0,707 \cdot 1} = 2,41.$$

Оскільки ОП має внутрішню корекцію, його АЧХ при розімкнутому колі ВЗЗ має вигляд рис. 2.9. З наведеної АЧХ

$$K_{OB} = \frac{f_{od}}{f_{B.зр.}}.$$

$$f_{B.зр.} = \frac{f_{od}}{K_{OB}} = \frac{2MГц}{2,41} = 0,829 (MГц).$$

Електрична схема активного елемента смугового фільтра на операційному підсилювачі наведена на рисунку 2.10.

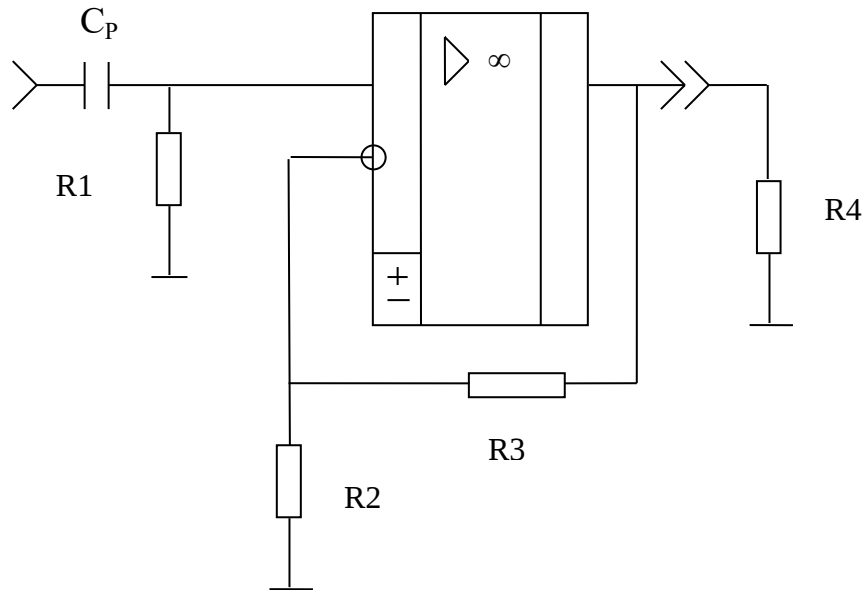


Рисунок 2.10 – Електрична схема активного елемента смугового фільтра на операційному підсилювачі

Для забезпечення $R_{\text{ex}} = 100 \text{ кОм}$, $R1$ обираємо з умови $R_{\text{ex}} \approx R1 = 100 \text{ кОм}$.

Для забезпечення $K_{\beta_0} = 26 \text{ дБ} = 20 \text{ раз}$ обираємо $R2$ та $R3$ з умови

$$K_{\beta_0} \approx \frac{R2 + R3}{R2}.$$

Відповідно обираємо $R2 = 100 \text{ кОм}$, $R3 = 1900 \text{ кОм}$.

Визначаємо

$$C_p \geq \frac{1}{2\pi \cdot F_n \cdot R_{\text{ex}} \sqrt{M_n^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^5 \sqrt{(\sqrt{2})^2 - 1}} \approx 0,016 \text{ (мкФ)}.$$

Перевіримо M_B на частоті $F_{B.зр} = 10 \text{ кГц}$.

$$M_B = \frac{K_{\beta_0}}{K_{\beta_B}},$$

де K_{β_B} - коефіцієнт підсилення підсилювача на частоті $F_{B.зр} = 10 \text{ кГц}$.

$$K_{\beta_B} = \frac{K_{OB}}{1 + K_{OB} \cdot \beta},$$

де K_{OB} - коефіцієнт підсилення ОП з розімкненим колом ВЗЗ на $F_{B.зр} = 10 \text{ кГц}$;

$$\beta - \text{коефіцієнт передачі кола ВЗЗ, } \beta = \frac{1}{K_{\beta_0}} = \frac{1}{20} = 0,05.$$

З графіку АЧХ можна визначити K_{OB} для частоти $F_{B.зр}$.

При нахилі АЧХ $-20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$

$$K_{OB} = \frac{f_{od}}{F_{B.зр}} = \frac{2 \text{ МГц}}{10 \text{ кГц}} = 200.$$

Визначаємо

$$K_{\beta_B} = \frac{200}{1 + 200 \cdot 0,05} \approx 18,2.$$

Відповідно

$$M_B = \frac{20}{18,2} \approx 1,1, \text{ тобто менше } 1,41 \text{ (3дБ)}.$$

Смуго-пропускаючий фільтр з електронним керуванням являє собою паралельний коливальний контур, що складається з варікапа розділової ємності та паралельно підключеної до них індуктивності. З метою збільшення його частотного діапазону роботи, що визначається коефіцієнтом перекриття ємності варікапа $K_{пер.}$, було введено паралельно варікапу С-негатрон – прилад з від'ємною ємністю, який реалізований на операційному підсилювачі.

При паралельно включеній від'ємній ємності $C^{(-)}$, коефіцієнт перекриття визначається виразом: $K'_{\text{пер.}} = C_{\text{вар.мах}} + C^{(-)} / C_{\text{вар.мін}} + C^{(-)}$, де $C_{\text{вар.мах}} + C^{(-)}$ і $C_{\text{вар.мін}} + C^{(-)}$ – сумарна ємність кола, $C_{\text{вар.мах}}$ і $C_{\text{вар.мін}}$ – відповідно максимальна та мінімальна ємність варікапа, $C^{(-)}$ – від'ємна ємність негatrona. Так як $C^{(-)} < 0$ відбудеться збільшення коефіцієнта перекриття в:

$$\frac{K'_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}} = \frac{C_{\text{вар.мах}} + C^{(-)}}{C_{\text{вар.мін}} + C^{(-)}} \cdot \frac{C_{\text{вар.мін}}}{C_{\text{вар.мах}}}, \text{ разів.}$$

Електрична схема смуго-пропускнуго фільтра на операційному підсилювачі з електронним керуванням наведена на рис. 2.11.

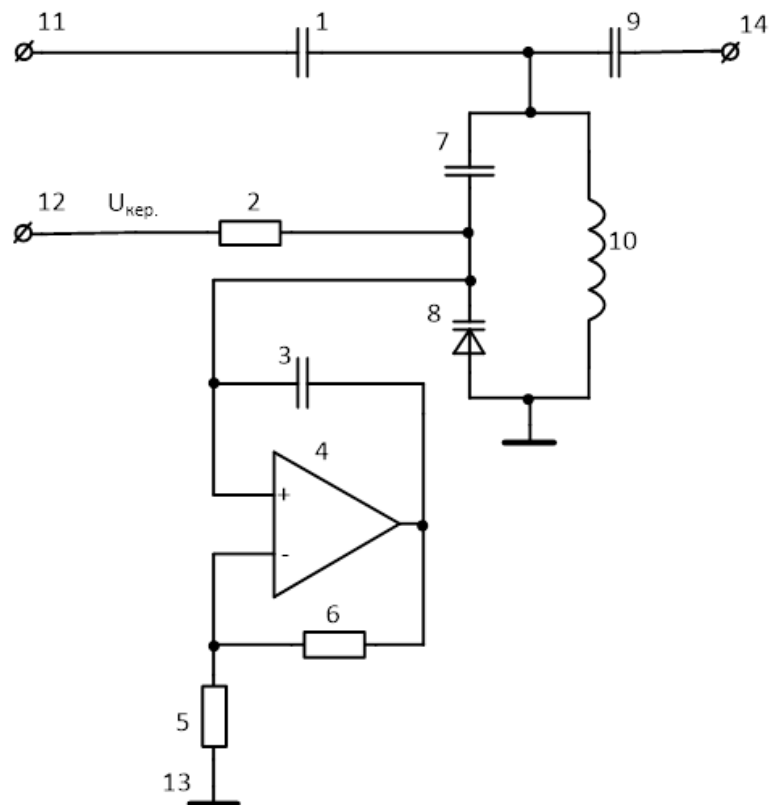


Рисунок 2.11 – Електрична схема смуго-пропускнуго фільтра на операційному підсилювачі з електронним керуванням

Графіки АЧХ без (а) та з введеною (б) від'ємною ємністю смуго-пропускнуго фільтра на операційному підсилювачі з електронним керуванням наведені на рис. 2.12.

Як видно з графіку (б) на рис. 2.12, при введенні С-негатрона відбулося

збільшення коефіцієнта переналаштування фільтру в 3 рази, що збільшує частотний діапазон роботи смуго-пропускного фільтру.

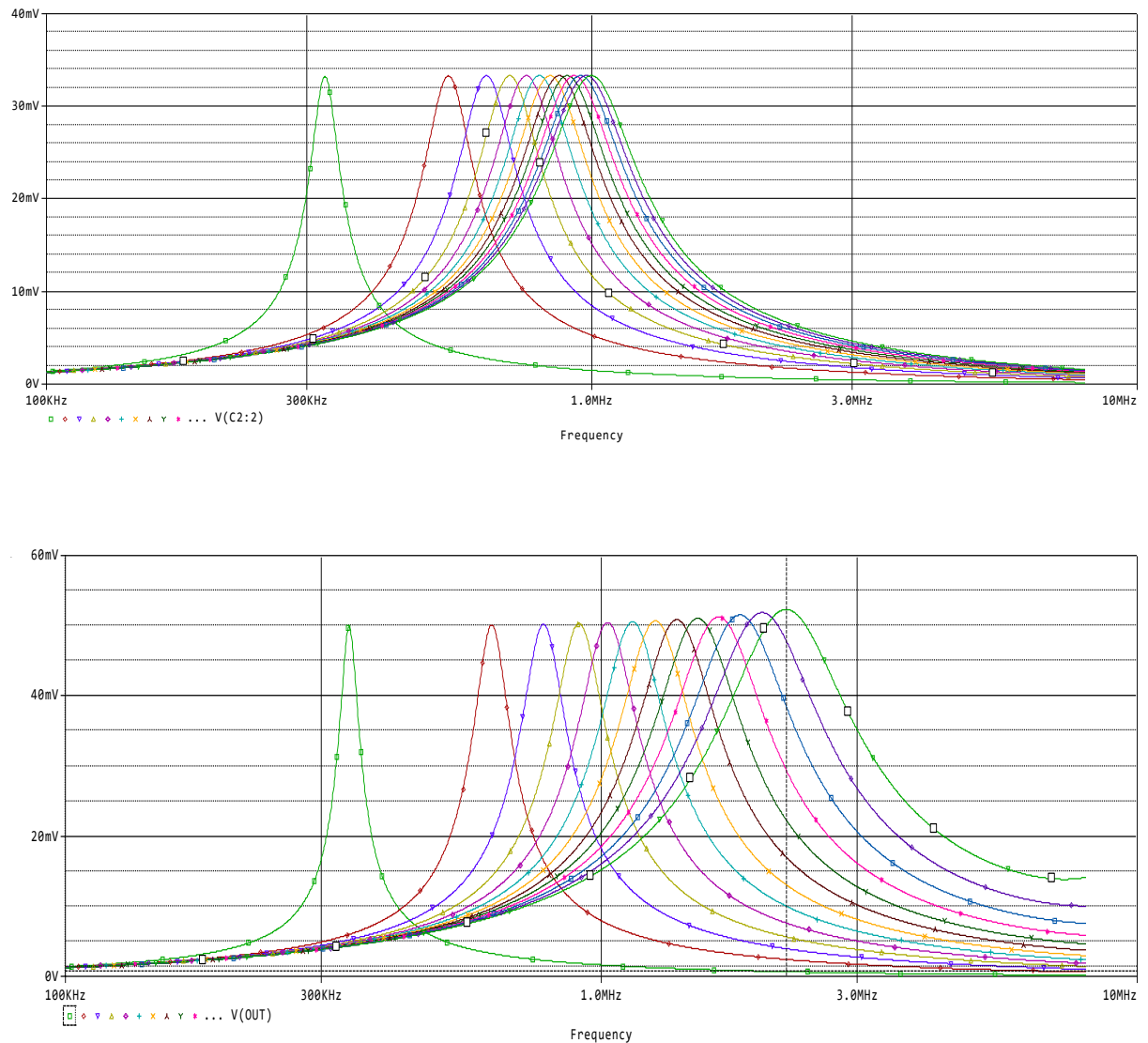


Рисунок 2.12 – Графіки АЧХ без (а) та з введеною (б) від’ємною ємністю смуго-пропускного фільтру на операційному підсилювачі з електронним керуванням

2.4 Висновки по розділу

У даному розділі були розглянуті і дослідженні основні характеристики керуючих елементів фільтрів, та шляхи керування ними. Розглянуто основні вимоги, що ставляться до керуючих елементів АФ, таких як можливість

електричної зміни керуючого параметра ємності, опору, індуктивності; наявність великого діапазону зміни керуючого параметра; висока добротність (для реактивних елементів); мала споживана потужність; висока швидкодія; висока температурна стабільність; малі габаритні розміри і маса. Наведено основні параметри варикапів, параметри керуючих елементів на базі транзисторних УПП. Також були розглянуті схемо технічні варіанти реалізації керуючих елементів на різних базах. Визначено основні переваги та недоліки розглянутих схем. Ми дослідили вплив напруги та її використання для зміни та управління різними елементами.

Було розроблено та досліджено активні електрично керовані фільтри низької частоти. Розглянуто їхні основні недоліки та наведені шляхи вирішення цих проблем. Описано принципи функціонування цих пристроїв. Оскільки фільтри широко використовуються в наш час, проведені дослідження є надзвичайно актуальними. А особливу увагу виділяють саме фільтрам з можливістю керування та зміною параметрів.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНО-КЕРОВАНИХ ФІЛЬТРІВ

3.1 Характеристики смугових фільтрів і вимоги до них

Досить довгий час проектування фільтрів здійснювалось на базі характеристичних параметрів чотириполюсників [2] і лише з появою швидкодіючих комп'ютерів проектування здійснюється за робочими параметрами [6]. На рис. 3.1 зображена частотна залежність робочої постійної ослаблення смугового фільтра з рівнохвильовою АЧХ,

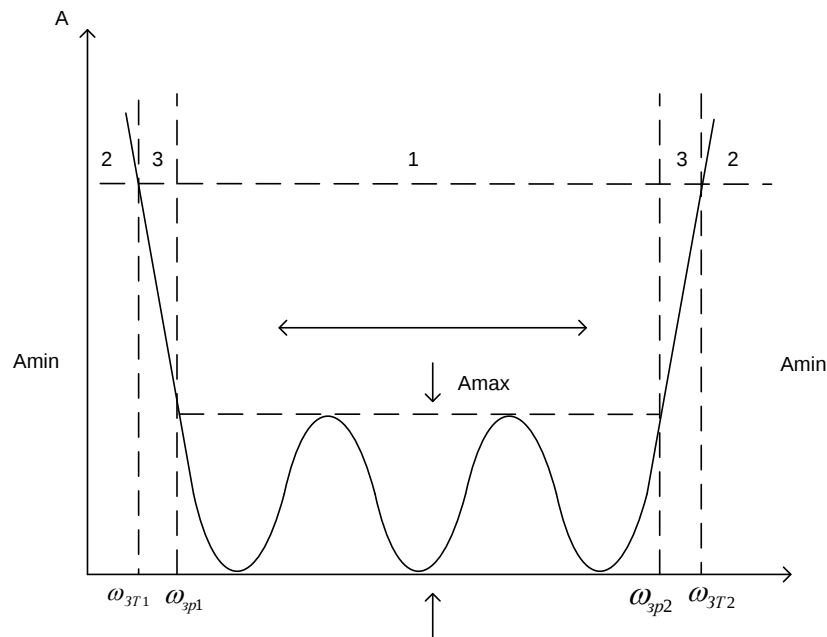


Рисунок 3.1 - Частотна залежність постійної ослаблення СФ з рівнохвильовою АЧХ

де $\omega_{зр1}$ і $\omega_{зр2}$ - граничні частоти смуги пропускання (частоти зрізу) $\Delta\Omega = \omega_{зр2} - \omega_{зр1}$ - смуга пропускання, (область 1 на рис.3.1) $\omega_{зт1}$ і $\omega_{зт2}$ - граничні частоти смуги затримування, якій відповідають частоти $\omega < \omega_{зт1}$ і $\omega > \omega_{зт2}$ (області 2 на рис.3.1), а проміжки частот $(\omega_{зт1}, \omega_{зр1})$ і $(\omega_{зр2}, \omega_{зт2})$ - називаються перехідними смугами (області 3 на рис.3.1). Основна вимога до

частотної залежності робочої постійної ослаблення полягає в тому, що в межах смуги пропускання її значення не повинне перевищувати максимальне допустиме значення $A_{\max}$ ($A \leq A_{\max}$), в межах смуги затримування вона не повинна приймати значення менше мінімально допустимого ($A \geq A_{\min}$), а в межах перехідної смуги частотна залежність постійної ослаблення не контролюється. (6)

В залежності від характеру частотної залежності постійної ослаблення в межах смуги пропускання і затримування виникають різновиди фільтрів: фільтр Батерворта - частотна залежність постійної ослаблення монотонна і максимально плоска в смузі пропускання; фільтр Чебишева – частотна залежність постійної ослаблення рівнохвильова в смузі пропускання і монотонна в смузі затримування (див. рис.3.1) ; фільтр Золотарьова-Кауера постійної ослаблення рівно хвильова в смузі пропускання і затримування. Існують і інші типи фільтрів, проектування яких здійснюється на підставі вимог до частотної залежності постійних ослаблення або фази. [6].

Аналітично зв'язок між постійною ослаблення і амплітудно – частотною характеристикою фільтра (АЧХ) визначається виразом (3.1)

$$A = 20 \lg \frac{1}{H(\omega)} \quad (\text{дБ}) \quad (3.1)$$

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

На підставі виразу (3.1) вимоги до постійної ослаблення (див. рис.3.1) перераховуються в вимоги до АЧХ (рис.3.2), де

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1 \max} - 1} \quad (3.2)$$

нерівномірність АЧХ в смузі пропускання

$$\delta = \sqrt{10^{0,1\min} - 1} \quad (3.3)$$

- крутизна АЧХ в перехідній смузі

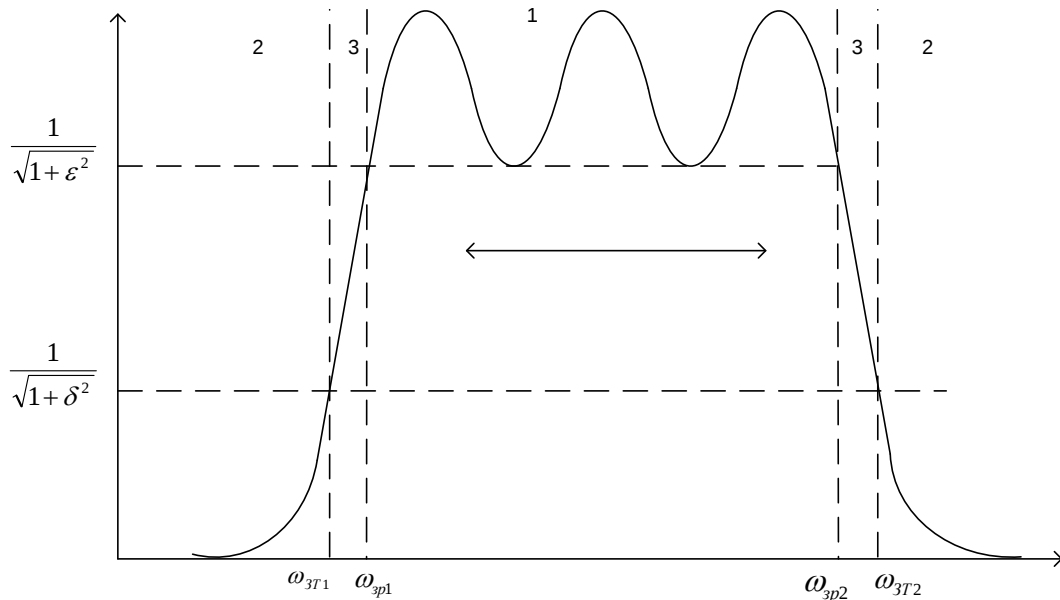


Рисунок 3.2 - Передатна рівно хвильова АЧХ СФ

В залежності від співвідношення між частотами зрізу розрізняються смугові фільтри – вузько смугові ($\omega_{зр2}/\omega_{зр1} < 1,5$) і широкосмугові ($\omega_{зр2}/\omega_{зр1} > 1,5$). Широкопasmові фільтри можна розглядати як комбінацію двох окремих фільтрів – фільтра низьких частот (ФНЧ) і фільтра високих частот (ФВЧ) [3]. В разі реалізації смугового фільтра (СФ) каскадним з'єднанням ФНЧ і ФВЧ на підставі активних РС – ланок, взаємний вплив ланок практично відсутній якщо вихід кожної ланки є виходом ОП з низьким вихідним опором. Оскільки при розв'язанні каскадній реалізації постійні ослаблення каскадів додається, то вимоги до ФВЧ і ФНЧ, як складових ланок СФ, визначається на підставі вимог до СФ. Так на підставі частотної залежності постійної ослаблення СФ рис. 3.2 вимоги до ФНЧ і ФВЧ визначаються

$$\text{ФНЧ:} \quad \omega_{зрнч} = \omega_{зр2} , \quad A_{\max нч} = 1/2 A_{\max с} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{3Tнч} &= \omega_{3T2} , & A_{\min нч} &= A_{\min с} \\
 \text{ФВЧ:} \quad \omega_{3Рвч} &= \omega_{3Р1} , & A_{\max вч} &= 1/2 A_{\max с} \\
 \omega_{3ТВч} &= \omega_{3Т1} , & A_{\min вч} &= A_{\min с}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

При визначені вимог до ФНЧ і ФВЧ постійна ослаблення СФ в межах смуги пропускання розділена порівну між обома складовими ланками але можливі і інші варіанти. В межах смуги затримування постійна ослаблення СФ задовольняє умові $A_{\min с} = A_{\min} + 0,5 A_{\max}$, тобто вимоги до постійної ослаблення СФ в смузі затримування задовольняють з запасом.

При реалізації СФ з рівно хвильовою АЧХ каскадним з'єднанням ФНЧ і ФВЧ виникає систематична похибка, в реалізації частот зрізу, пов'язана з тим що на своїй частоті зрізу обидва фільтри мають постійну ослаблення $0,5 A_{\max с}$, до якої додається постійна ослаблення з смуги пропускання не другого фільтра, яка через коливання не обов'язково прийме значення $0,5 A_{\max с}$, наведені причини сприяють збільшенню смуги пропускання СФ. Тому для отримання заданої СП необхідна додаткова настройка. Порядок ФНЧ визначається виразом (3.6)

$$n \geq \frac{\lg\left(\frac{\delta}{\varepsilon} + \sqrt{\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^2 - 1}\right)}{\lg(\varpi_{3T} + \sqrt{\varpi_{3T}^2 - 1})} \tag{3.6}$$

Оскільки проектування фільтрів здійснюється за умов ідеалізації властивостей існуючої елементної бази, то виникають відхилення характеристик фільтра від запланованих. Тому при проектуванні фільтра використовують метод „перед спотворень” тобто до фільтра висувають більш жорсткі вимоги порівняно з заданими в технічному завданні. Наприклад якщо треба спроектувати фільтр з $A \leq A_{\max} - \Delta A$, де ΔA – запас на не ідеальність

елементів методом „перед спотворень” неможливо забезпечити „запас” на смугу пропускання, якщо незадані межі зміни смуги пропускання. При їх відсутності обов’язкова настройка фільтра з метою отримання заданої смуги пропускання, про що вже йшла мова вище.

3.2 Комп’ютерне моделювання активних електрично керованих смугових фільтрів

На основі схем розроблених та наведених у другому розділі було проведено моделювання активного електрично керованого фільтра низької частоти в програмі MicroCap.

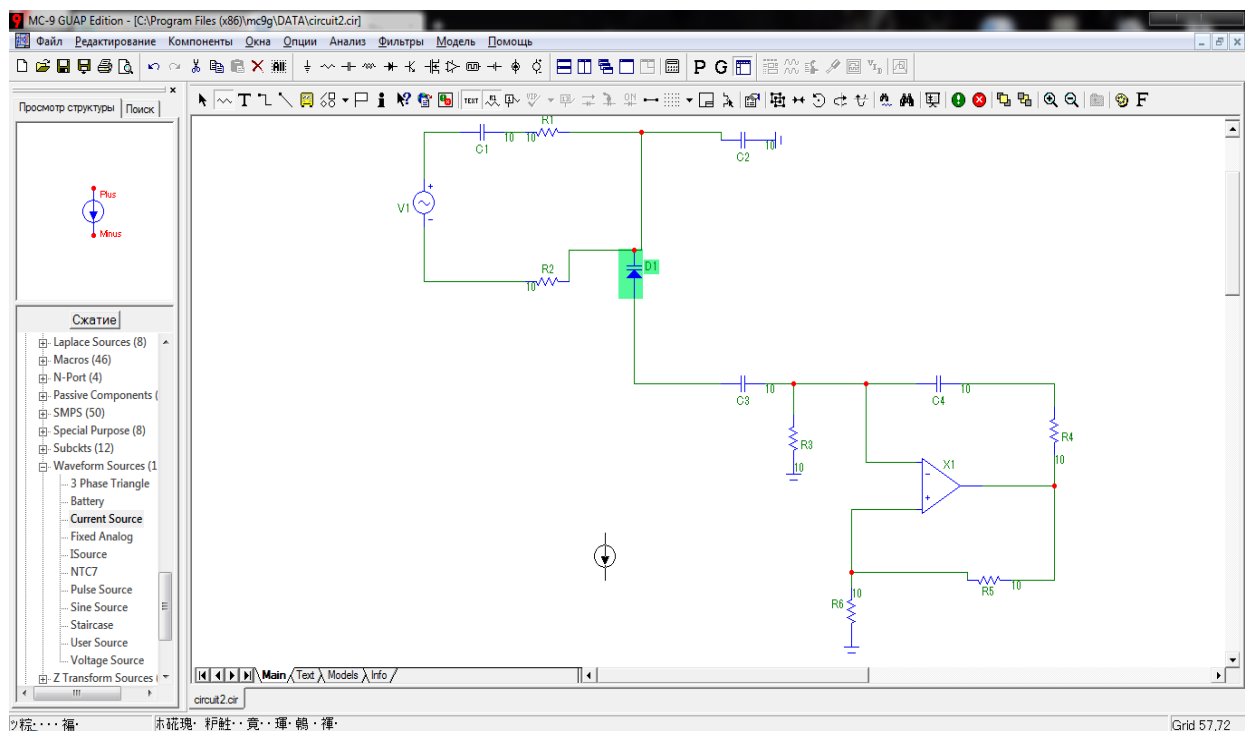


Рисунок. 3.3— Моделювання схеми активного електрично керованого фільтра низької частоти

Були проведені аналіз перехідних процесів схеми активного електрично керованого фільтра низьких частот.

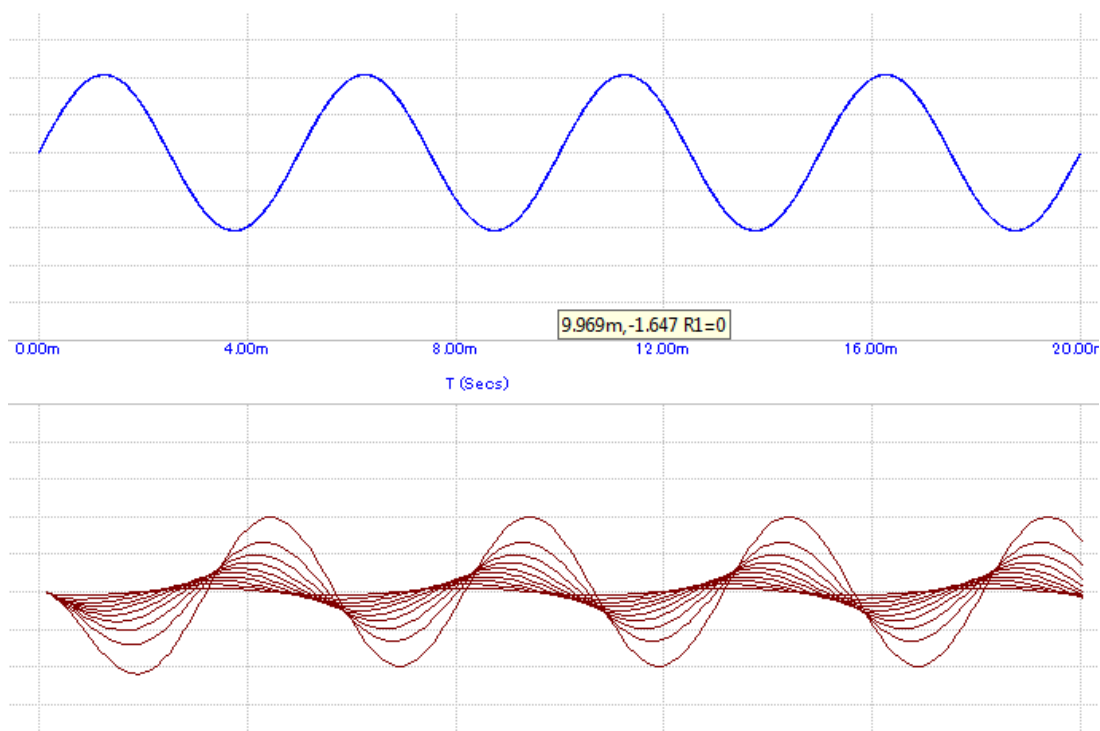


Рисунок 3.4– Аналіз перехідних процесів

На рис 3.5 ми бачимо залежність амплітуди вихідного сигналу від вхідної частоти.

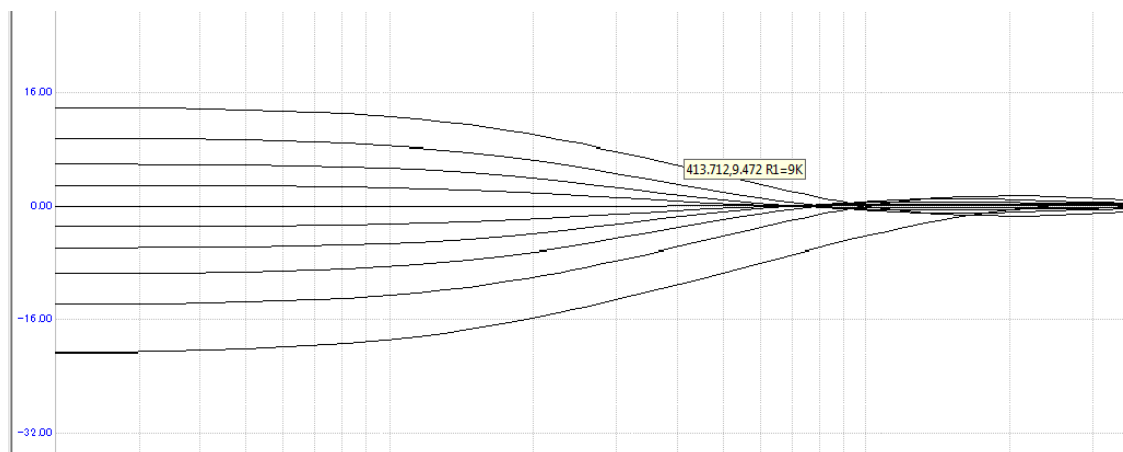


Рисунок 3.5– АЧХ фільтра

Також було проведено моделювання та визначення температурної та режимної стабільності.

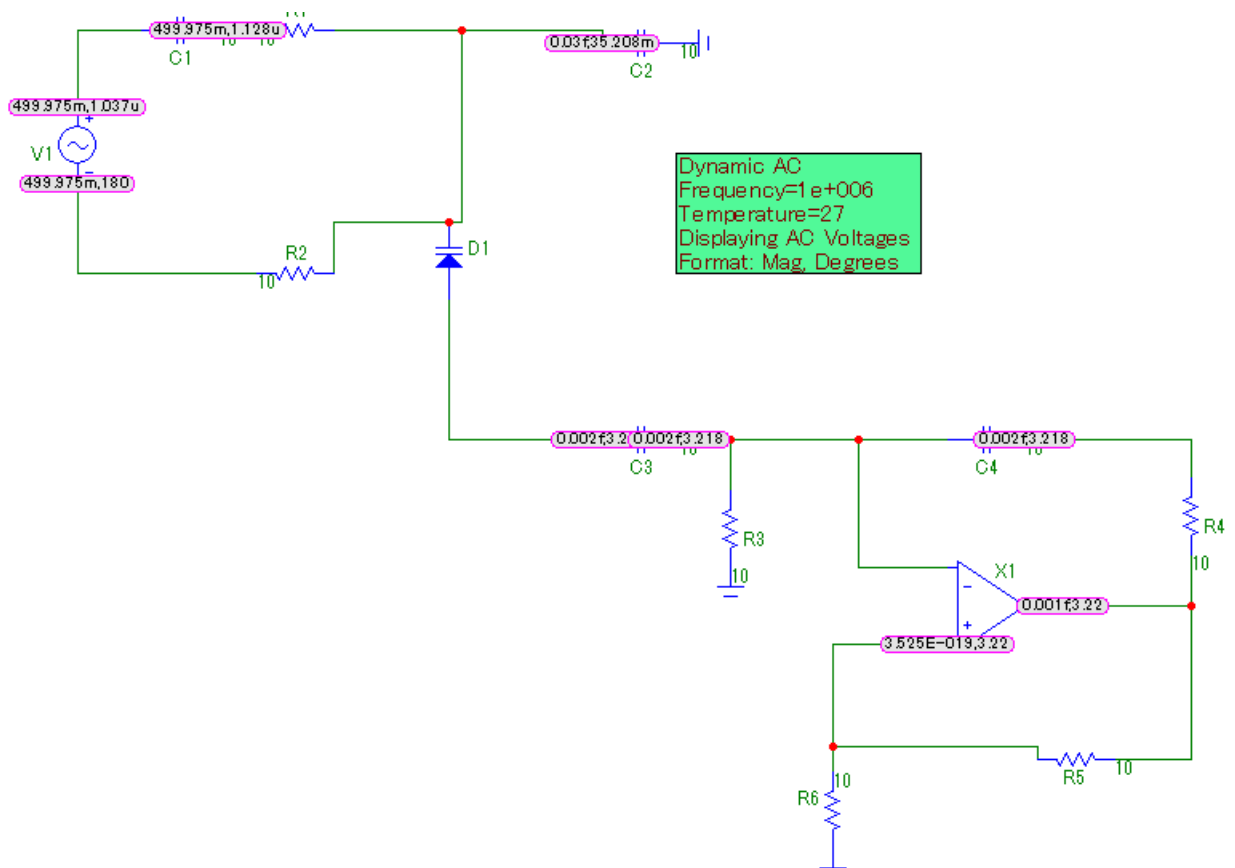


Рисунок 3.6– Визначення температурної стабільності

3.3 Комп'ютерне моделювання смуго-пропускального фільтра на операційному підсилювачі

Texas Instruments пропонує безкоштовну програму Active Filter Design (FILTERPRO) v3.1 з розрахунку активних фільтрів англійською мовою, після безкоштовної реєстрації на сайті. FilterPro®; MFB and Sallen-Key Low-Pass Filter Design Program User Guide (Rev. C) <http://www.ti.com/litv/pdf/sbfa001c>.

Підставляються активні елементи виробництва Texas Instruments.

Якщо потрібний вільний, від виробника, вибір елементів, Micro-Cap 9, доступні демо на сайті <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>.

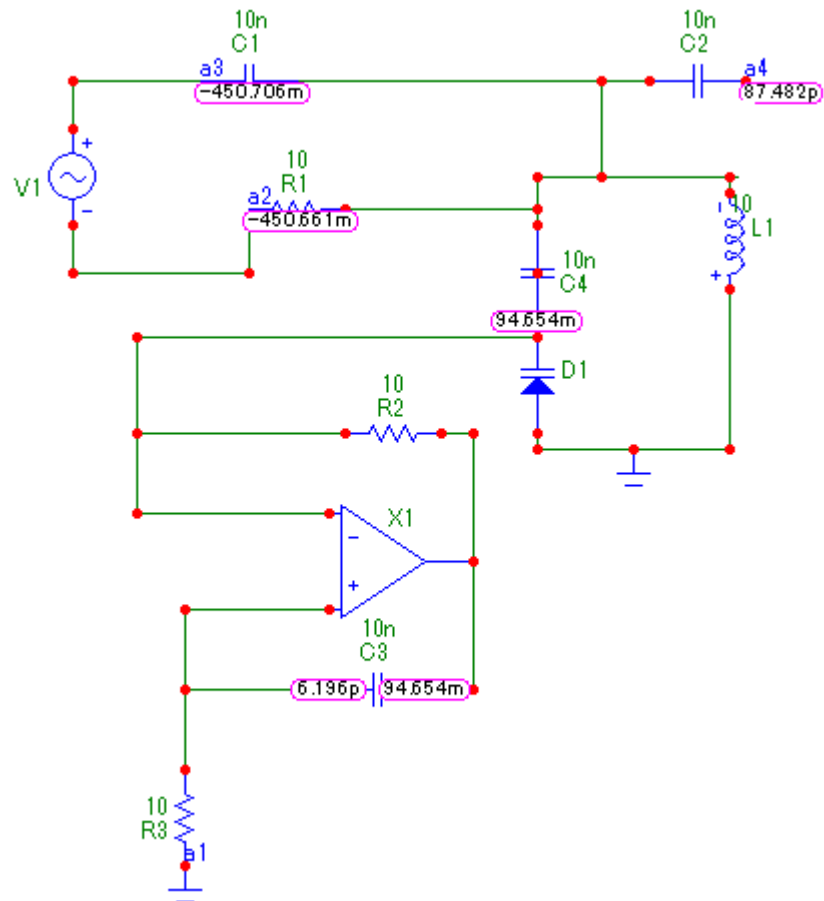


Рисунок 3.7 – Моделювання смуго-пропускального фільтра на операційному підсилювачі

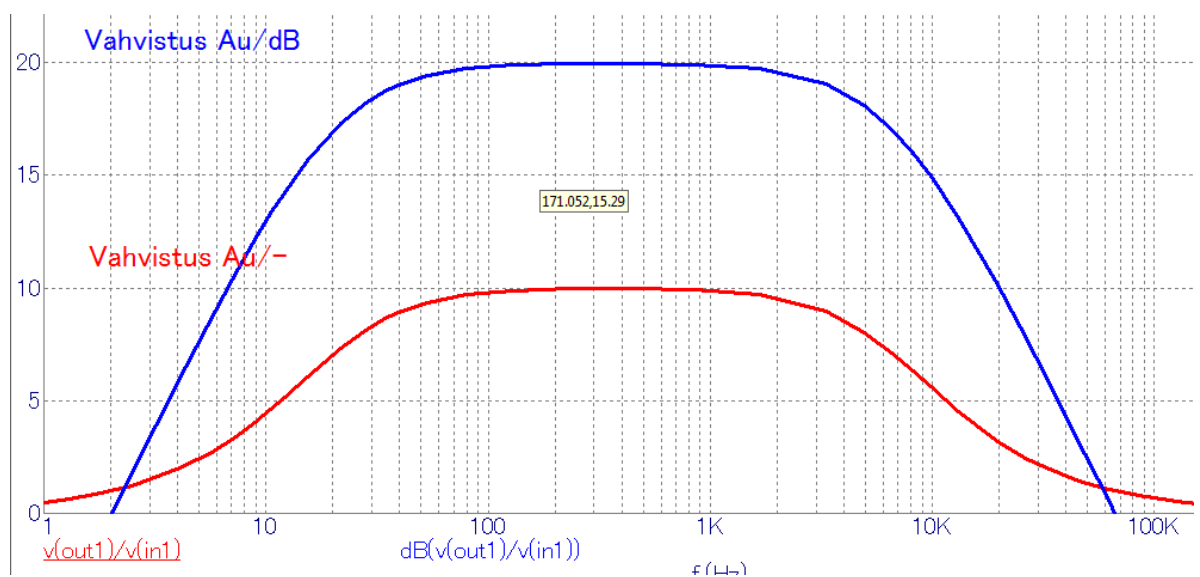


Рисунок 3.8 – АЧХ смуго-пропускального фільтра на операційному підсилювачі

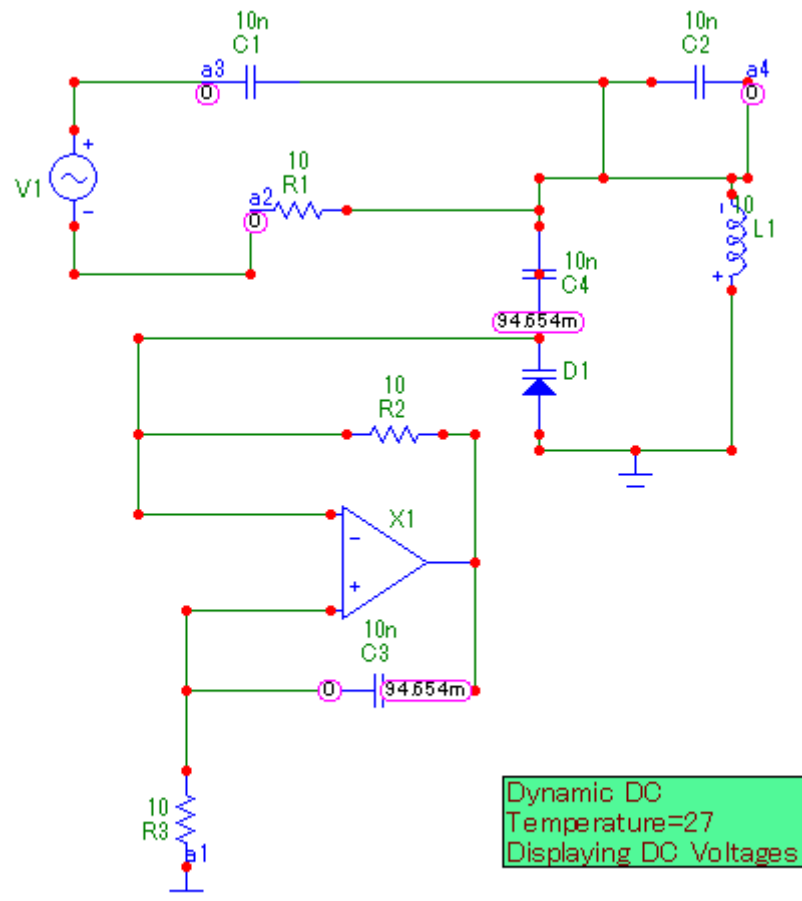


Рисунок 3.9 – Визначення температурної стабільності

3.4 Моделювання температурних режимів друкованої плати пристрою плати за допомогою програми THERMAL DESKTOP

Конструювання – один із видів проектування за допомогою ЕОМ, що полягає у втіленні рішень схемотехніки. Послідовність етапів конструювання визначена ЄСКД. Основне завдання конструювання – реалізація схеми, при якій забезпечуються параметри пристрою, встановлені в технічному завданні. Конструкція – це сукупність електрично і механічно зв'язаних елементів, у якій реалізується електрична схема машини або системи. Якість конструкції визначається її відповідністю технічним вимогам.

Існують показники, що відображають споживчі властивості конструкції:

- складність конструкції;

- кількість елементів конструкції;
- об'єм пристрою;
- маса пристрою;
- площа, яку займає пристрій;
- споживана потужність;
- власна частота коливань пристрою;
- імовірність безвідмовної роботи.

Вимоги державних стандартів забезпечуються виконанням конструкторських документів відповідно до ЄСКД.

В зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки в наш час виникає потреба вдосконалення компонентів та елементної бази пристроїв. Комп'ютерна техніка давно перетворилася на техніку масового вжитку. Даний розвиток призвів до того, що вимоги до комп'ютерних систем значним чином розширились. Для користувача важливими стали не тільки основні характеристики електронно-обчислювальних машин, таких як тактова частота процесора, об'єм кеш пам'яті, тощо. До визначальних факторів при виборі комп'ютера додалися характеристики відтворення мультимедіа файлів, якість зображення, якість та потужність звуку. Отже, можна прийти до висновку, що мультимедійні можливості комп'ютерних систем є дуже важливими в наш час.

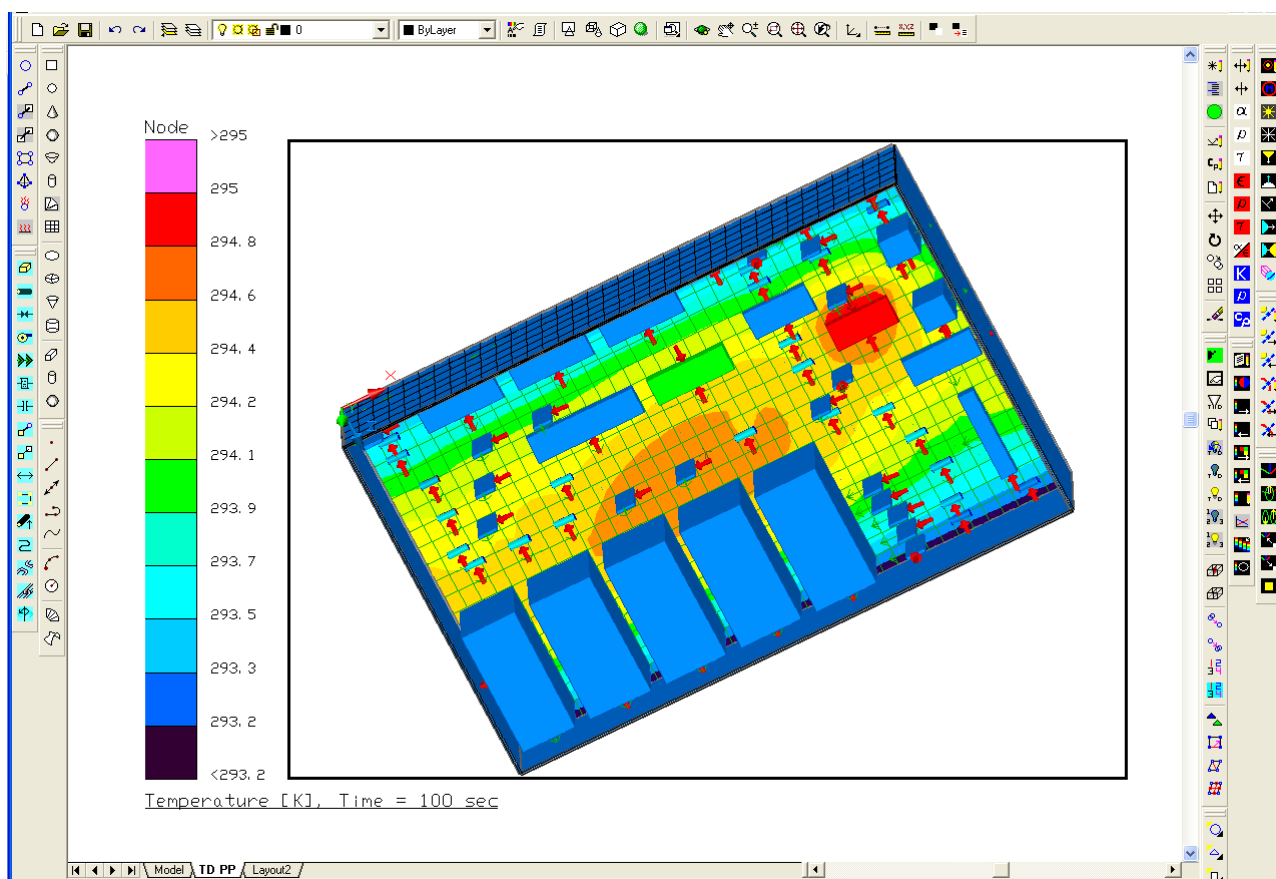


Рисунок 3.10 - Зміна температурних полів пристрою під час його нагрівання в динамічному режимі

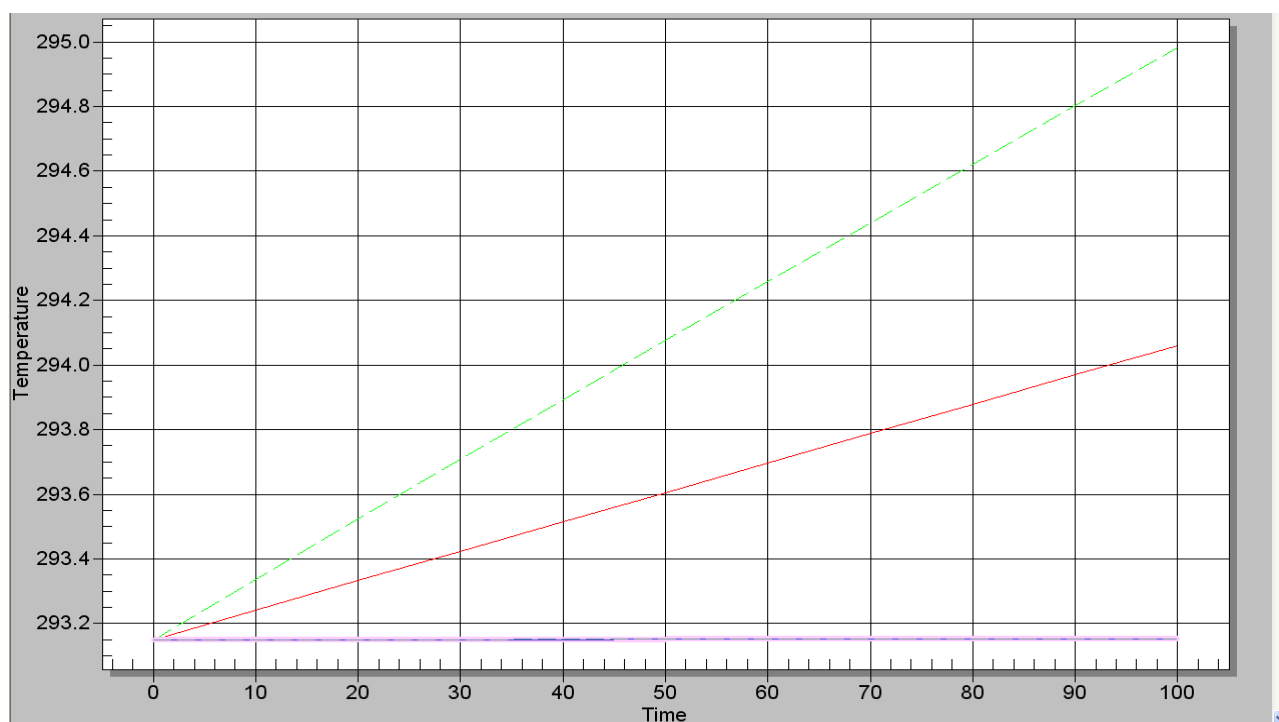


Рисунок 3.11 - Графіки залежності температури від часу для елементної бази плати в корпусі

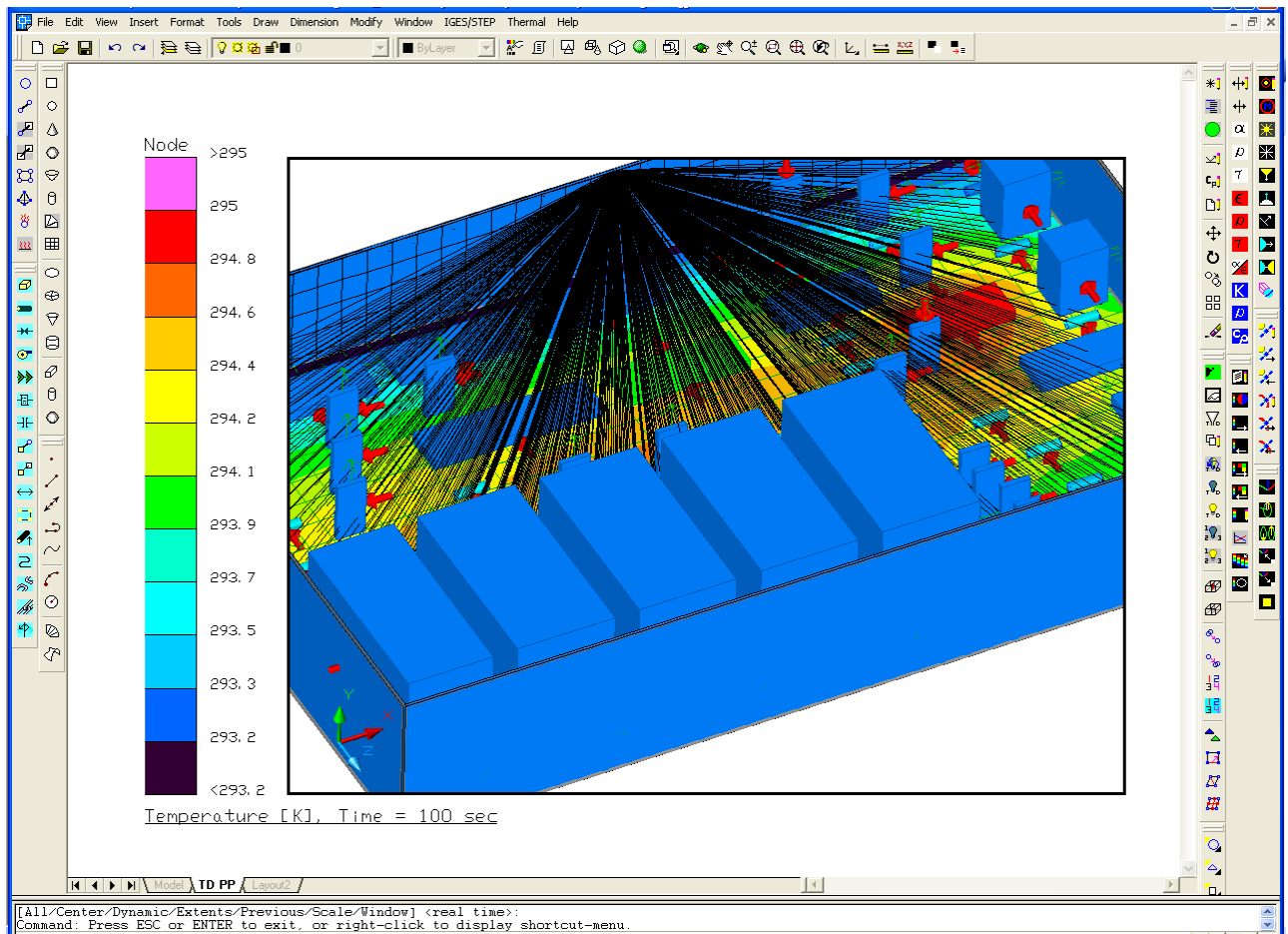


Рисунок 3.12 Моделювання теплових процесів пристрою в корпусі з точкою обдуву

3.5 Висновки до розділу

В даному розділі було проведено моделювання характеристик електрично керованих фільтрів. Були наведені їхні АЧХ. Пристрої показали високу температурну стабільність. Також було проведено моделювання теплових процесів пристрою в корпусі під час його нагрівання в динамічному режимі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Обов'язки роботодавця стосовно забезпечення працівників комфортними та безпечними умовами для виконання роботи, а також права працівників на такі умови визначені статтею 13 Закону України "Про охорону праці". Цей закон встановлює основні принципи щодо здійснення конституційного права працівників на захист їхнього життя та здоров'я у процесі трудової діяльності, а також на створення відповідних, безпечних та здорових умов праці. Він також регулює відносини між роботодавцем і працівником у справах безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, і встановлює єдиний порядок організації системи охорони праці в Україні.

Під час дослідження електрично керованого смугового активного фільтру на операційному підсилювачі на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла; понижена контрастність;
- пряма і відбита блискіть.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Стандарти щодо організації та обладнання робочих місць передбачають, що кожне робоче місце повинно мати не менше 6 квадратних метрів площі та об'єм приміщення не менше 20 кубічних метрів. На додаток, конструкція робочого місця має забезпечити комфортну робочу позу, що дозволить працівникові працювати без надмірного напруження тіла та уникати перевтоми під час роботи. Важливо зазначити, що збереження здоров'я працівника залежить від правильної робочої пози, оскільки тривале перебування в незручному положенні може призвести до різних захворювань, таких як сколіоз, варикозне розширення вен чи плоскостопість. Дослідження показують, що робота в зігнутому положенні збільшує витрати енергії на 20%, а при значному нахилі — на 45% в порівнянні з прямим положенням тіла [10].

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця операторів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 - 2 м.

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

- стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 - 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);
- робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлікотниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко чиститься і не електризується;
- екран комп'ютера має розташовуватися на оптимальній відстані від користувача, що становить 600 – 700 мм., але не менше за 600 мм. з урахуванням літерно-цифрових знаків і символів.

Приміщення, де здійснювалося дослідження електрично керованого смугового активного фільтру на операційному підсилювачі за небезпекою ураження електричним струмом належить до приміщень без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповишене, з нормальною температурою повітря, ізолюваними підлогами і малим числом заземлених приладів).

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загорання внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння людини під напругу.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої підключаються до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та

електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Стан повітря робочої зони у виробничому приміщенні називають мікрокліматом або метеорологічними умовами. Мікроклімат або метеорологічні умови виробничих приміщенні, визначаються за такими параметрами:

- температурою повітря у приміщенні, С;
- відносною вологістю повітря, %;
- рухливістю повітря, м/с;
- тепловим випромінюванням, Вт/м³.

Всі ці параметри поодиночі, а також у комплексі впливають на фізіологічну функцію організму його терморегуляцію і визначають самопочуття.

Дослідження електрично керованого смугового активного фільтру на операційному підсилювачі за енерговитратами відноситься до категорії І а (енерговитрати до 139Дж/с) [11]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [12] наведені в табл.4.2.1.

Таблиця 4.2.1 – Параметри мікроклімату

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

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря обладнані системами опалення та кондиціонування повітря. Систематично проводиться вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Оточуюче нас повітря (атмосфера) є найважливішим фактором забезпечення життя. В природних умовах повітря, як правило, не забруднене отруйними речовинами і життю людини не загрожує. Органи чутливості людини не дозволяють з достатньою точністю визначати якість повітря і запобігати загрозі отруєння.

В приміщенні, де здійснюється дослідження електрично керованого смугового активного фільтру на операційному підсилювачі, у повітрі можуть перевищувати ГДК такі речовини як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.2.

Таблиця 4.2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл.4.2.3).

Таблиця 4.2.3 – 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

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення відіграє важливу роль у житті людини. Біля 90% інформації сприймається через зоровий канал, тому правильно виконане раціональне освітлення має важливе значення для виконання всіх видів робіт. Недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і, природно, активність усіх життєвих процесів. Раціональне освітлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у приміщенні, в якому напівтемрява, світильники брудні або в занедбаному стані.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [13]. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.2.4:

Таблиця 4.2.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	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

Штучне освітлення в досліджуваному приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення).

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі. В досліджуваному приміщенні наявний

як постійний, так і непостійний шуми. Нормування непостійного шуму, а також орієнтовна оцінка загального рівня постійного шуму здійснюється скоректованим за частотою загальним рівнем звукового тиску – так званим рівнем звуку, який вимірюється в дБА за шкалою «А» шумоміра.

Непостійний шум характеризується еквівалентним рівнем звуку $L_{A\text{ екв.}}$, що являє собою середньоквадратичний рівень звуку непостійного шуму, який має такий самий вплив на людину, як і постійний шум.

Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску не повинні перевищувати 50 дБА (табл.4.2.5).

Таблиця 4.2.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [14])

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимих значень.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). У процесі еволюції біосфера постійно перебуває під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, космічні ЕМП, передусім ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. У теперішній час ЕМП антропогенного походження значно перевищують природний фон і є тим несприятливим чинником, чий вплив на людину з року в рік зростає.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84 [15]. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ДСанПіН 3.3.6-2002 [16], ГОСТ 12.1.045-84 [15]). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [17] (табл.4.2.6).

Таблиця 4.2.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)	0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм	35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу	20кВ/м

Для дотримання наведених нормативів слід використовувати офісну техніку з сертифікатом якості та дотримуватися встановлених режимів праці та відпочинку з ПК.

4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому з регламентованою ймовірністю відкидається можливість виникнення та розвиток пожежі, і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

З урахуванням ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [18] приміщення, де здійснюється дослідження електрично керованого смугового активного фільтру на операційному підсилювачі для дослідження програмно-апаратних засобів вимірювання переміщень відноситься до категорії вибухопожежонебезпеки В (тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежне навантаження для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м^2 кожна перевищує 180 МДж/м^2).

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки – П-Па (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали) [19].

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Усі заходи системи запобігання пожежі в приміщенні можна поділити на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні.

Організаційні заходи пожежної безпеки передбачають: організацію пожежної охорони на об'єкті, проведення навчань з питань пожежної безпеки (включаючи інструктажі та пожежно-технічні мінімуми), застосування наочних засобів протипожежної пропаганди та агітації, проведення перевірок, оглядів стану пожежної безпеки приміщень, будівель, об'єкта в цілому та ін.

До технічних заходів належать: суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції приміщень, будівель та об'єктів, технічному переоснащенні виробництва, експлуатації чи можливого переобладнанні електромереж, опалення, вентиляції, освітлення і т. ін.

Заходи режимного характеру передбачають заборону куріння та застосування відкритого вогню в недозволених місцях, недопущення появи сторонніх осіб у вибухонебезпечних приміщеннях чи об'єктах, регламентацію пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт тощо.

Експлуатаційні заходи охоплюють своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів технологічного та допоміжного устаткування, а також інженерного господарства (електромереж, електроустановок, опалення, вентиляції)

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

До основних засобів пожежогасіння, що використовуються в приміщеннях такого класу відносять вогнегасники, розміщення яких в приміщеннях позначається встановленим поруч вказівним знаком

Згідно категорії пожежовибухонебезпеки будівлі, класу приміщення і за вибухо- і пожежонебезпекою П-Па та Наказу Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», в приміщенні має бути встановлено 2 порошкових або вуглекислотних вогнегасники із зарядом речовини від 3 до 5 кг. [20]

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам, але особливу увагу потрібно звернути на утримання в справному стані засобів протипожежного захисту та своєчасне інформування пожежної охорони про несправність пожежної техніки, впровадження систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

Отже, електричні фільтри використовуються скрізь, де передаються електричні сигнали за наявності інших сигналів і шумів, що заважають і відрізняються від перших за частотним розподілом; вони застосовуються також в випрямлячах струму для згладжування пульсацій випрямленого струму.

LC-фільтри використовуються в силових електричних ланцюгах для гасіння перешкод. У каскадах радіоелектронної апаратури часто застосовуються перебудовувані LC-фільтри, наприклад, простий LC-контур, включений на вході середньохвильового радіоприймача забезпечує настройку на певну радіостанцію.

Фільтри використовуються в звуковій апаратурі в багатосмугових еквайзерах для коректування АЧХ, для розділення сигналів низьких, середніх і високих звукових частот в багатосмугових акустичних системах, в схемах частотної корекції магнітофонів і ін.

Тому їхнє дослідження є надзвичайно актуальним. Ми бачимо, що можна досягати більше і вирішувати різні проблеми за допомогою новітніх технологій.

Два завдання першочергової важливості: підвищення надійності і зменшення габаритних розмірів при збереженні високих електричних параметрів.

У даній бакалаврській дипломній роботі було проведено дослідження параметрів фільтрів та керуючих елементів фільтрів. Було визначено їхні недостатки і приведені шляхи їхнього вирішення. Також був описаний принцип роботи цих пристроїв та змодельовано основні параметри. Широке використання цих пристроїв у різних галузях праці доводить актуальність проведених досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bulchis E.W Voltage tunable active inductorless filter / E.W Bulchis // United States Patent Application. – 2001.
2. Forbes L. Voltage Tunable active inductors filter / L.Forbes // United States Patent Application. – 2001.
3. Філінюк М.А. Активні УВЧ і НВЧ фільтри / М.А. Філінюк., Л.Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2009.
4. Філінюк М.А. Основи негatronіки / М.А. Філінюк.-Вінниця, 2006.
5. Tolson James N. Voltage controlled band-pass / James N.Tolson // United States Patent. -2004.
6. ПАТ.16644. Україна, МКИ G06R 27/28. Спосіб вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості чотириполосника / Огородник К.В., Філінюк М.А., Булига І.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет.
7. ПАТ. 20993. Україна, МКИ H03H 11/00. Активний коливальний контур / Філінюк М.А., Барабан М.В., Ліщинська Л.Б.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет.
8. Філінюк М.А. Вимірювання мінімально-досяжного дійсного імітансу потенційно-нестійкого чотириполосника. / Філінюк М.А., Гаврилов Д.В // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003.
9. 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.
10. 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_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php.
11. 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>
12. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
 - [Електронний ресурс] - Режим доступу:
<http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
13. ДБН В.2.5-28-20018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
14. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу:
<http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
15. 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>.
16. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>
17. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL:
<http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.
18. 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.
19. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
20. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

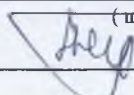
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНІЙ СМУГОВИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

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

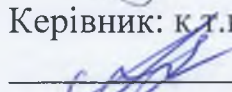
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Педан О.Р.

(прізвище та ініціали)

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



Звягін О.С.

(прізвище та ініціали)

«12»

06

2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Таблиця 1 – Способи керування параметрами активних фільтрів

Керуючий параметр фільтра	Стабілізуючий параметр фільтра	Необхідна залежність провідності еквівалентної схеми фільтра в процесі керування		
		L	C	G_t
$\omega_0 = 2\pi f_0$	K_0, df	–	–	–
$d\omega = 2\pi df$	K_0, f_0	↓	↑	–
K_0	df, f_0, Q_t	↓	↑	↓
$\omega_0 = 2\pi f_0$	K_0, Q_t	↑	↑	–

Примітка: ↑ збільшення, ↓ зменшення, – стабільність.

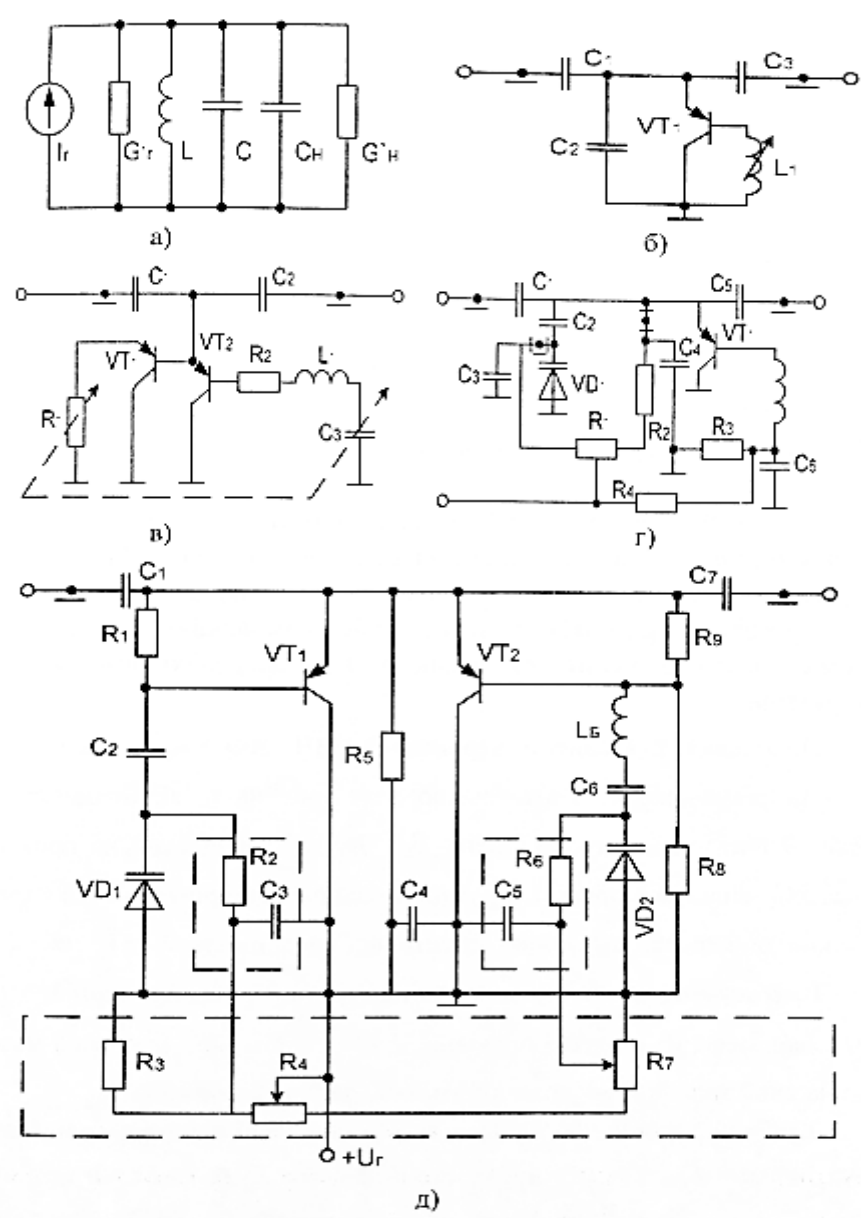


Рисунок 1 – Різновиди схем аналогових керованих фільтрів

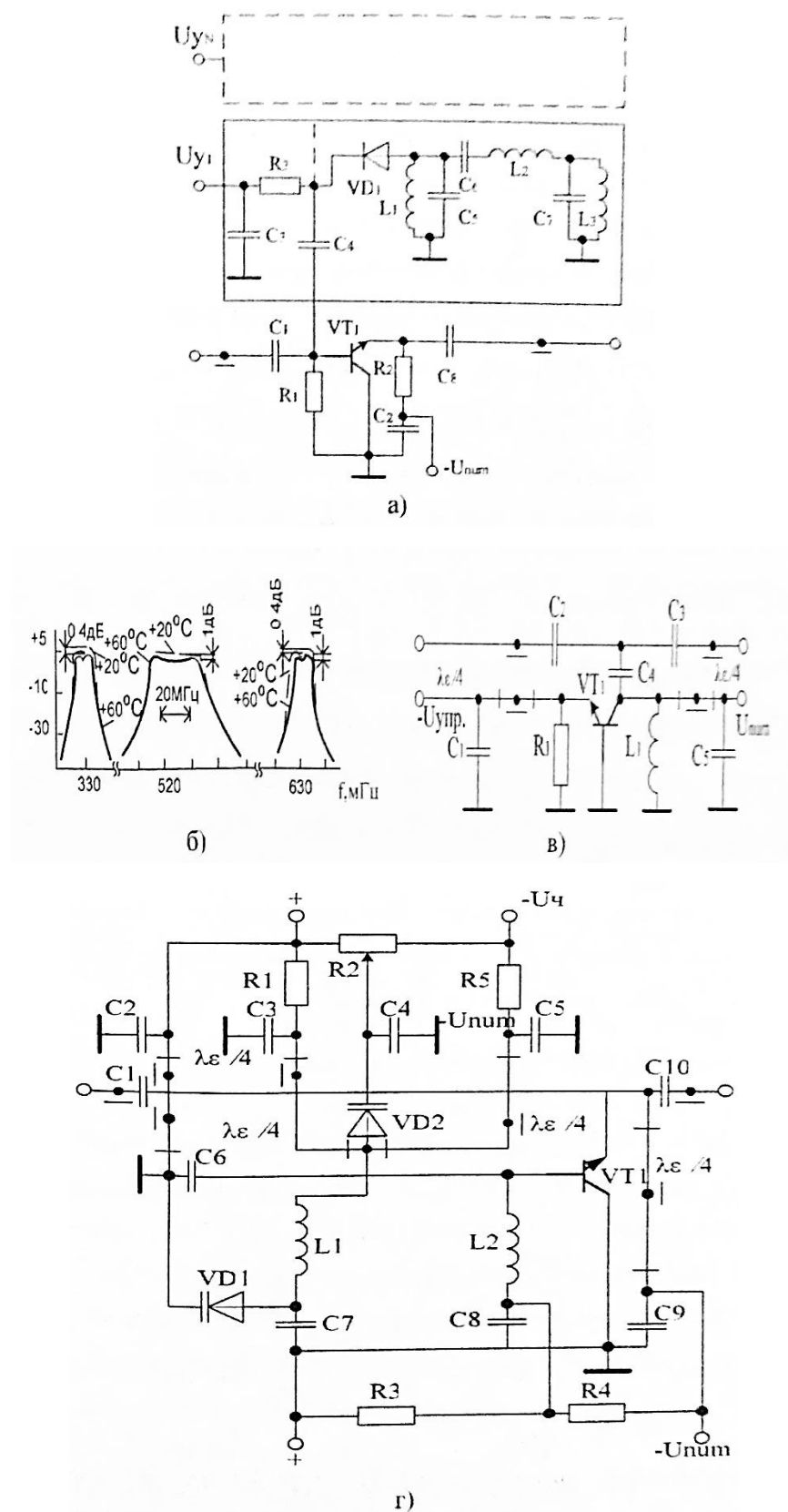


Рисунок 2 – Різновиди схем дискретних керованих активних фільтрів на транзисторі КТ3101

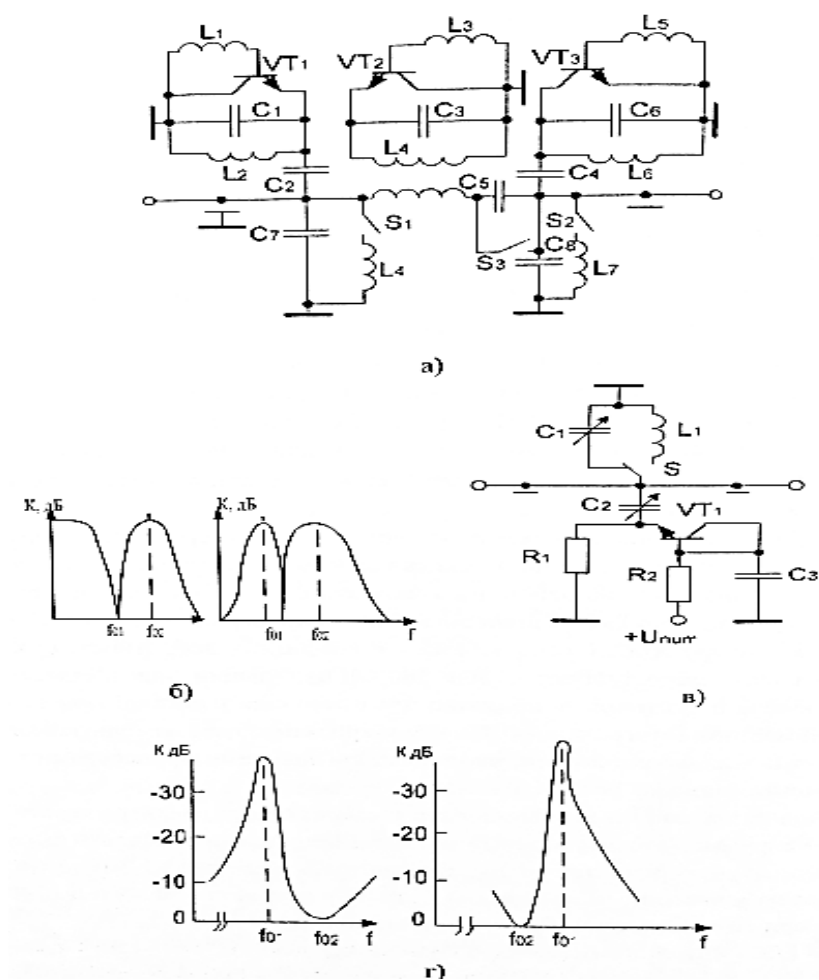


Рисунок 3 – Різновиди керованих НВЧ активних фільтрів з складною формою АЧХ

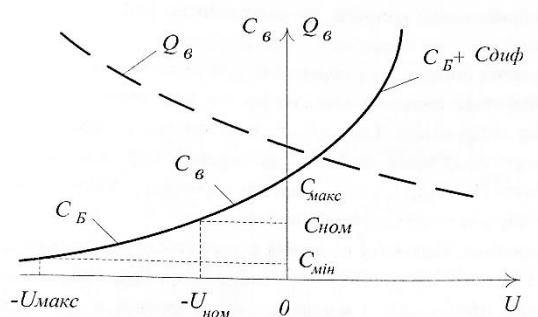


Рисунок 4 – Залежність ємності C_B і добротності Q_B від прикладеної до нього напруги U

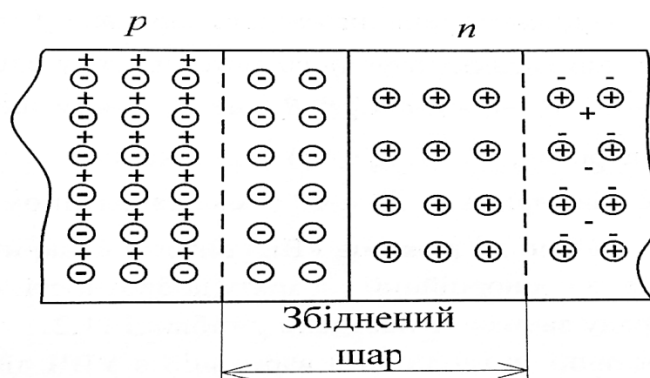


Рисунок 5 – Розподіл зарядів у напівпровідниковому діоді

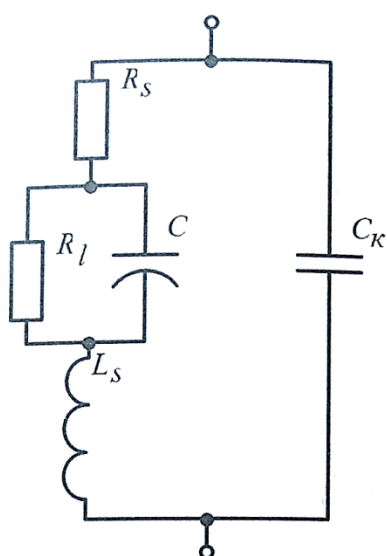


Рисунок 6 – Еквівалентна схема варикапа в діапазоні УВЧ

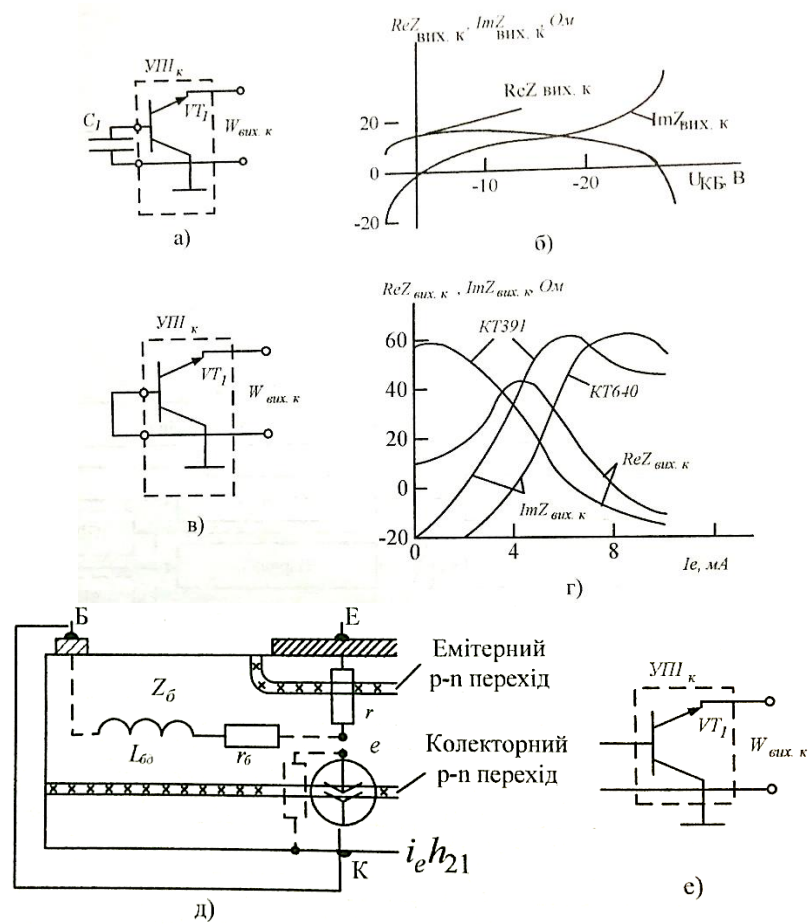


Рисунок 7– Керуючі елементи (а, в, д, е) на базі одно каскадних транзисторних узагальнених перетворювачах імітансу та їх характеристики (б, г)

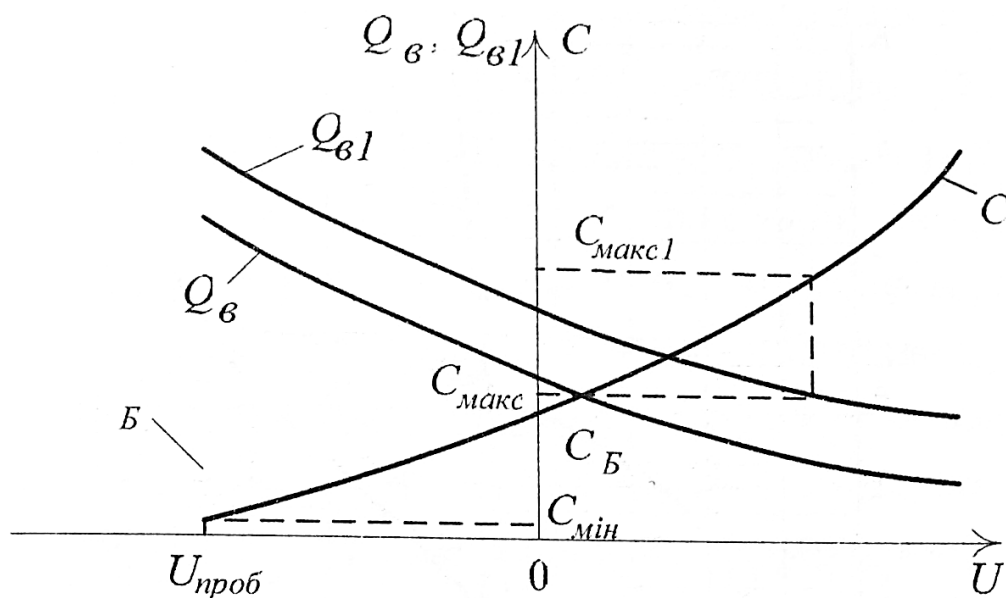


Рисунок 8 – Залежність ємності C і добротності Q_v варикапа від керуючої напруги

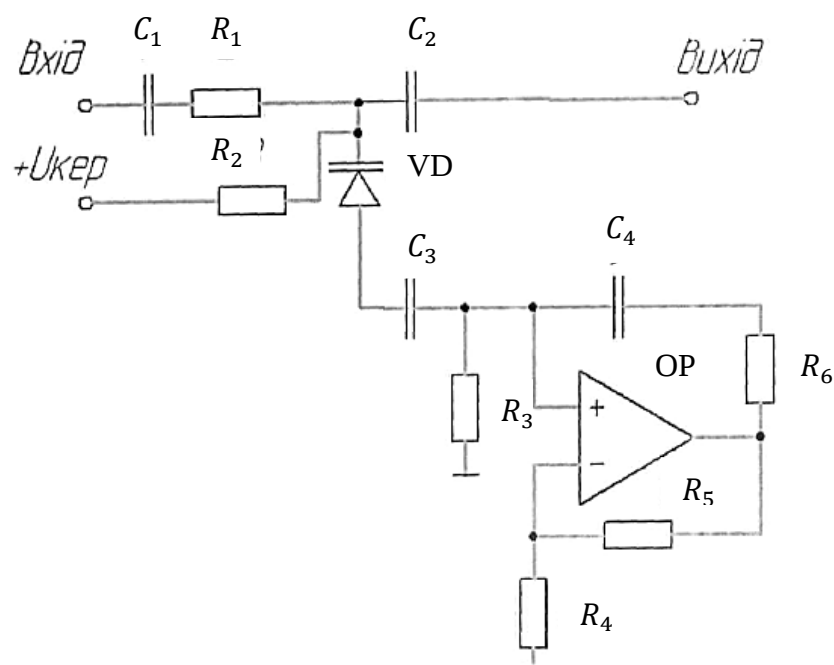


Рисунок 9 – Активний керований електричний фільтр низької частоти

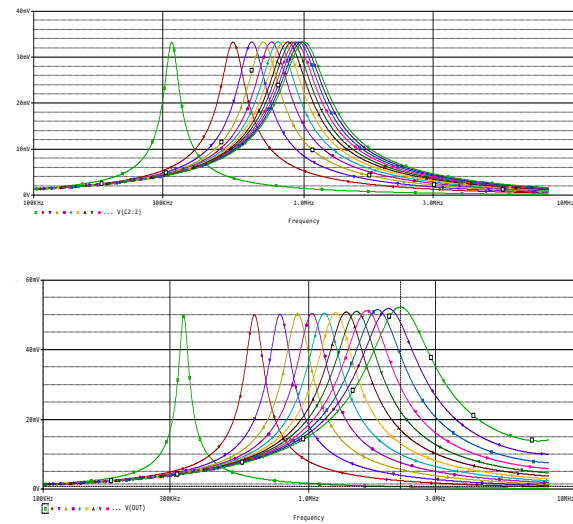
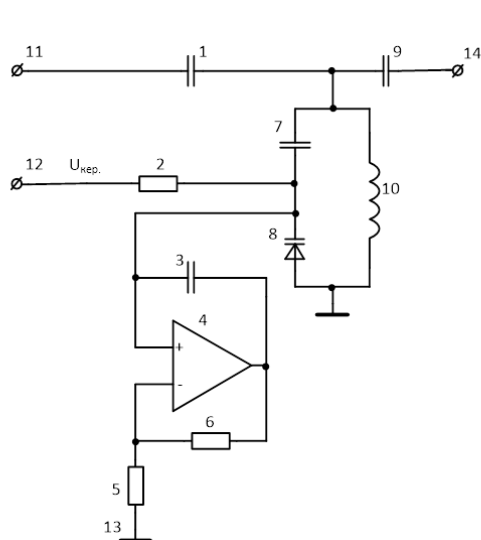


Рисунок 10 – Схема смуго-пропускного фільтра на С-негатроні з електронним керуванням (а), графік АЧХ без та з введеною від'ємною ємністю (б)

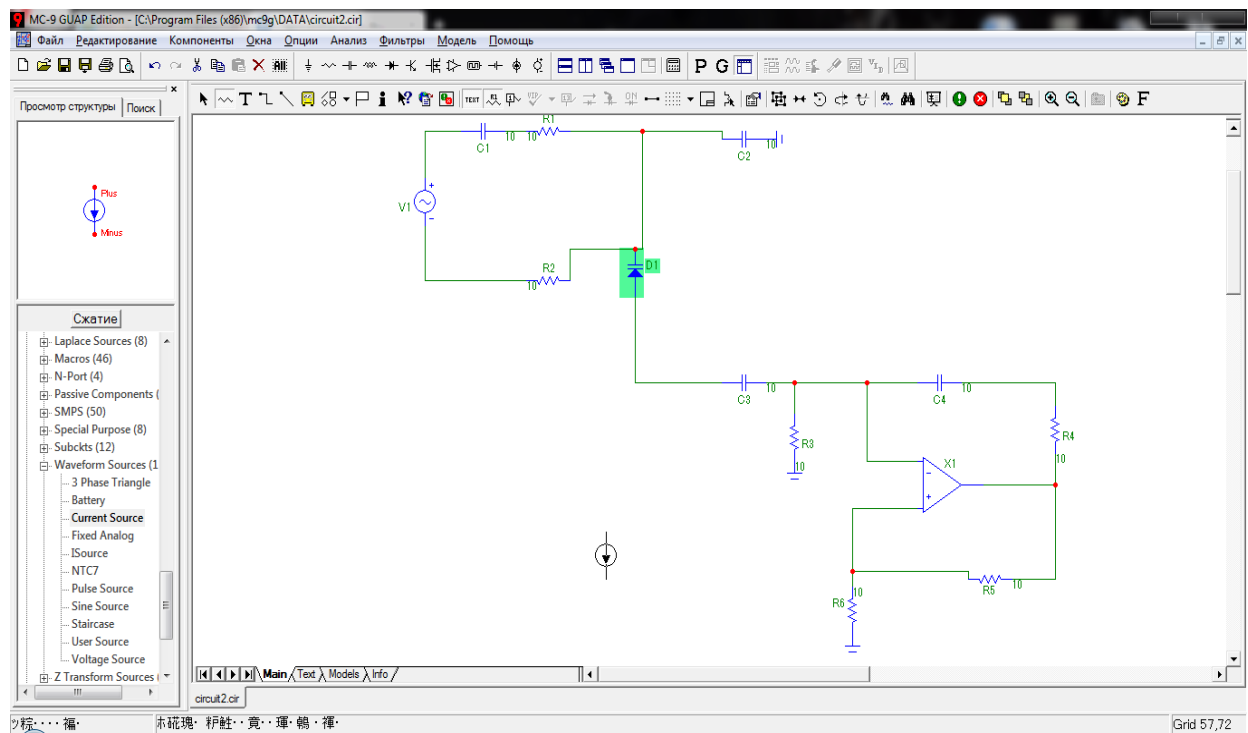


Рисунок. 11– Моделювання схеми активного електрично керованого фільтра низької частоти

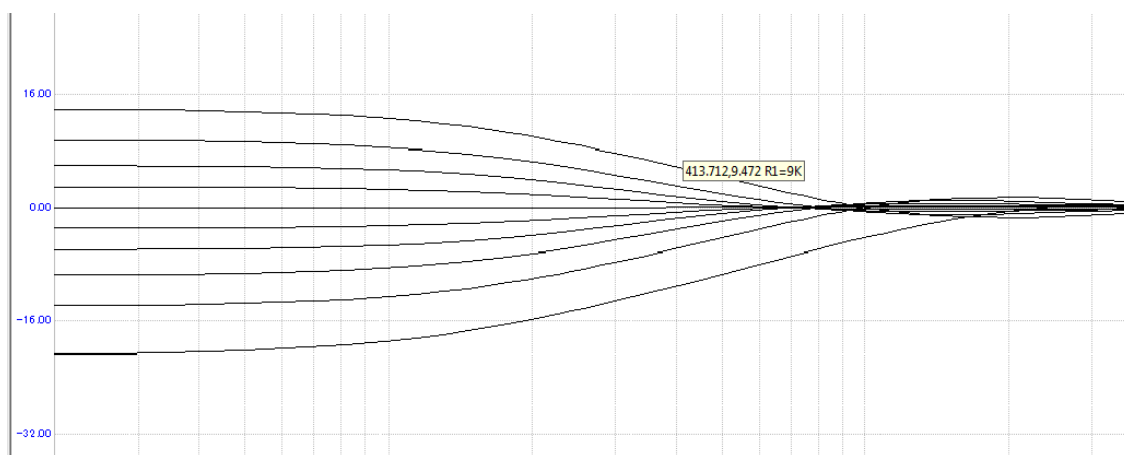


Рисунок 12– АЧХ фільтра

Також було проведено моделювання та визначення температурної та режимної стабільності.

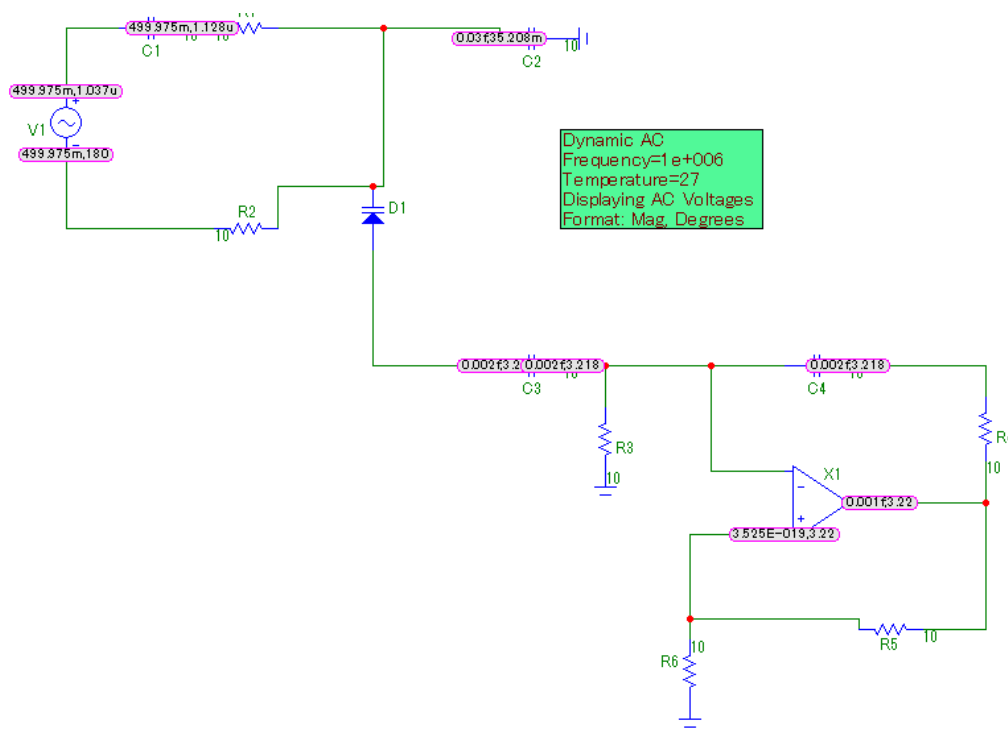


Рисунок 13– Визначення температурної стабільності

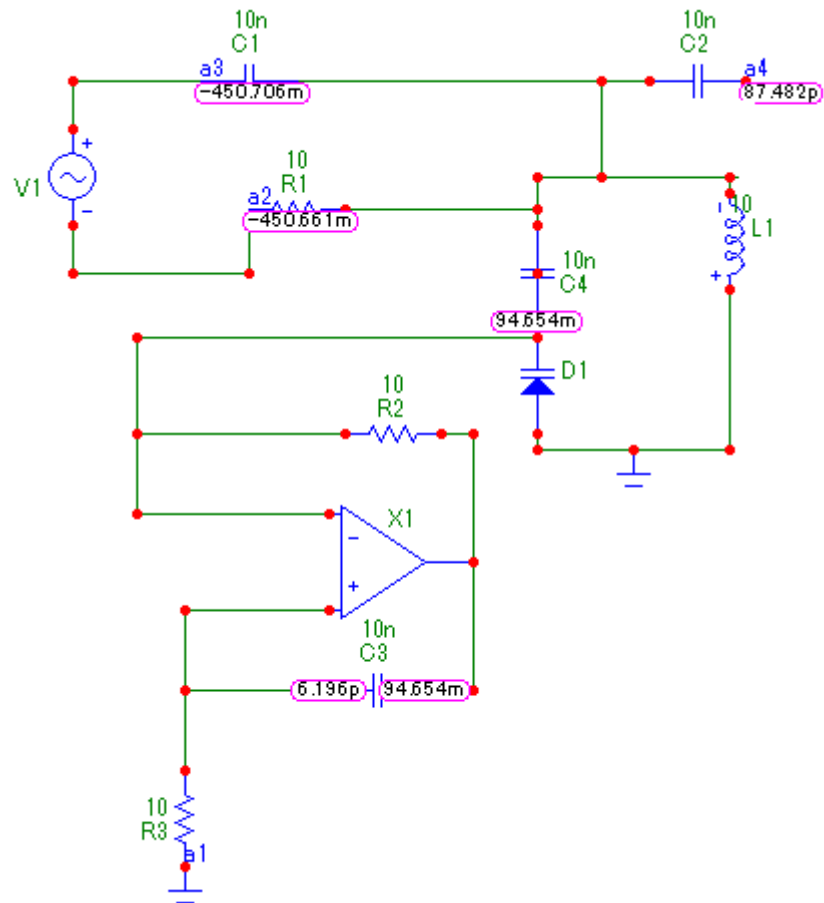


Рисунок 14 – Моделювання смуго-пропускного фільтра на С-негатроні

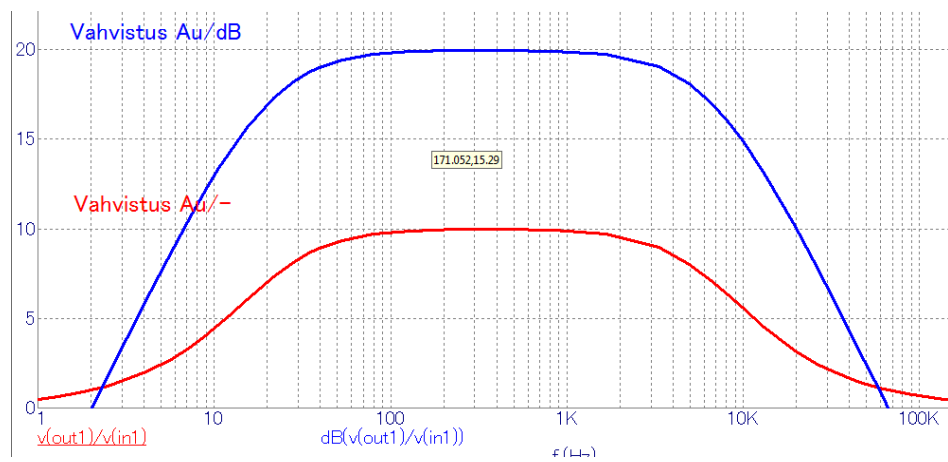


Рисунок 15 – АЧХ смуго-пропускного фільтра на С-негатроні

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНІЙ СМУГОВИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР НА
ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Електрично керований смуговий активний фільтр на операційному підсилювачі»

Тип роботи: БДР
(БДР, МКР)

Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichек

Оригінальність 77,9% Схожість 22,1%

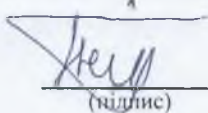
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 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 Unichек щодо роботи.

Автор роботи 
(підпис)

Олександр ПЕДАН
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)