

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до курсової роботи з дисципліни

**«ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ, СИГНАЛІВ ТА ПРОЦЕСІВ В  
ЕЛЕКТРОНІЦІ»**

для студентів спеціальності

F5 – «Кібербезпека та захист інформації»

галузі знань F – «Інформаційні технології»

усіх форм навчання

Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Основи теорії кіл, сигналів та процесів в електроніці» для студентів спеціальності F5 – «Кібербезпека та захист інформації» галузі знань F–«Інформаційні технології» усіх форм навчання. / Укл.: Леонід КАРПУКОВ, Тетяна ЖОРЖ. - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026, - 53 с.

Наведено теоретичні основи синтезу електричних фільтрів та аналізу частотних, часових характеристик і передавальних функцій електричних кіл, представлено приклади вирішення проєктних і розрахункових завдань з використанням системи MathCAD.

Укладачі: Леонід КАРПУКОВ, професор, д. т. н.,  
Тетяна ЖОРЖ, зав.лаб.

Відповідальний за випуск: Андрій КОРОТУН, доц.,  
канд.фіз.-матем.наук

Затверджено  
на засіданні кафедри  
інформаційної безпеки та  
наноелектроніки  
Протокол № 4 від 04.02.2026 р.

Рекомендовано до видання НМК  
факультету інформаційної безпеки та  
електронних комунікацій  
Протокол № 6 від 04.03.2026 р.

## ЗМІСТ

Загальна характеристика курсової роботи .....	4
1 Теоретичні основи синтезу електричних фільтрів.....	5
1.1 Класифікація і частотні характеристики електричних фільтрів .....	5
1.2 Загальна характеристика завдання синтезу електричних фільтрів .....	8
1.3 Фільтри з максимально-пласкою характеристикою .....	10
1.4 Фільтри з рівнохвильовою характеристикою .....	13
1.5 Реалізація драбинного реактивного кола .....	17
1.6 Розрахунок нормованих параметрів низькочастотних фільтрів - прототипів.....	21
1.7 Частотні перетворення.....	22
1.8 Алгоритм розрахунку параметрів фільтрів .....	25
2 Аналіз електричних фільтрів.....	30
2.1 Аналіз частотних характеристик .....	30
2.2 Аналіз передавальних функцій.....	33
2.3 Аналіз часових характеристик.....	36
3 Технічне завдання на проєктування фільтру та графік виконання курсвої роботи .....	44
4 Правила оформлення пояснювальної записки.....	49
Контрольні питання.....	52
Перелік джерел посилання .....	55

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КУРСОВОЇ РОБОТИ

Мета курсової роботи - освоєння теоретичних основ і оволодіння практичними навичками синтезу електричних фільтрів та аналізу частотних, часових характеристик і передавальних функцій електричних кіл.

Курсова робота складається з двох частин. У першій частині за даними технічного завдання здійснюється синтез фільтрів в результаті вирішення задачі апроксимації і реалізації. У курсовій роботі для апроксимації частотних характеристик фільтрів використовуються функції Баттерворту і Чебишева, а для вирішення задачі реалізації фільтрів використовуються драбинні структури. У другій частині роботи здійснюється частотний аналіз, аналіз передавальних функцій та аналіз часових характеристик схем синтезованих фільтрів.

За технічним завданням необхідно виконати синтез і аналіз двох типів фільтрів: фільтра нижніх частот або верхніх частот, а також смугового або загороджувального фільтра.

Методичні вказівки до курсової роботи містять всі необхідні теоретичні відомості, приклади вирішення проектних і розрахункових завдань, MathCAD-програми, що забезпечують основні обчислювальні задачі. Наведено графік виконання курсової роботи і правила оформлення пояснювальної записки.

## 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Електричні фільтри – це частотно-вибіркові лінійні чотириполосники, призначені для виділення або придушення частотних складових спектру вхідного сигналу, які розташовані в заданій смузі частот [2]. Смуга частот, яка призначена для виділення частотних складових спектру сигналу, називається смугою пропускання фільтру. Смуга частот, в якій придушуються частотні складові спектру сигналу, називається смугою затримання. Смуга частот між смугою пропускання і смугою затримання називається смугою переходу.

### 1.1 Класифікація і частотні характеристики електричних фільтрів

Частотно-вибіркові властивості фільтру прийнято характеризувати частотною залежністю його комплексного коефіцієнта передавання за напругою:

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_2(\omega)}{\dot{U}_1(\omega)}, \quad (1.1)$$

де  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ - комплексні амплітуди напруги відповідно на вході і виході фільтру.

Частотна залежність комплексного коефіцієнта передавання за напругою характеризується амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) у вигляді  $K(\omega) = |\dot{K}(\omega)|$  і зо-частотною характеристикою (ФЧХ) у вигляді  $\phi(\omega) = \arg \dot{K}(\omega)$ .

Форма АЧХ коефіцієнта передавання фільтру визначається розташуванням по вісі частот смуг пропускання і затримання. По розташуванню смуг пропускання і загордження розрізняють: фільтри нижніх частот (ФНЧ), фільтри верхніх частот (ФВЧ), смугові фільтри



- $A_n$  - максимально-допустиме значення затухання в межах смуги пропускання;
- $A_3$  - мінімально-допустиме значення затухання в межах смуги загородження.

Між смугою пропускання і смугою загородження реального фільтру розташовується смуга переходу, значення загасання в якій не нормується. Чим вужче смуга переходу, тим складніше структура фільтру. Для прикладу на рис. 1.2 графічно наведено вимоги на АЧХ фільтру нижніх частот. Пунктирною лінією вказана можлива реалізація АЧХ фільтру, що задовольняє заданим вимогам.

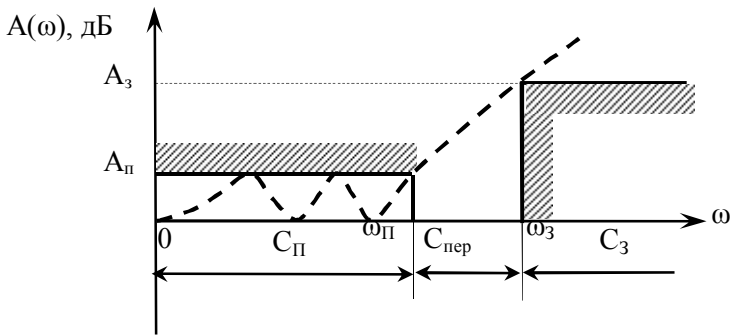


Рисунок 1.2 - Графічне зображення вимог на АЧХ фільтру нижніх частот

Синтез фільтрів за заданими частотними характеристиками включає в себе *процедуру апроксимації, процедуру реалізації фільтра прототипу нижніх частот і процедуру частотного перетворення.*

*Зауваження.* Низькочастотний фільтр-прототип – це фільтр нижніх частот, який побудований для нормованої, безрозмірної частоти і має смугу пропускання від нуля до  $\omega_n = 1$ .

## 1.2 Загальна характеристика завдання синтезу електричних фільтрів

У загальному випадку синтез електричного кола - це визначення схеми електричного кола і параметрів складових її елементів, при яких частотні характеристики кола задовольняють поставленим вимогам.

Завдання синтезу фільтрів за заданими частотними характеристиками включає завдання апроксимації і завдання реалізації. Завдання апроксимації полягає у виборі математичних функцій, за допомогою яких можуть бути наближені задані характеристики. Ці функції повинні задовольняти вимогі фізичної реалізації. Для фільтрів на зосереджених RCL-елементах вимога фізичної реалізації витікає з властивостей їх передавальних функцій

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}, \quad (1.3)$$

де  $p = j\omega$ ,  $j$ - уявна одиниця.

Передавальні функції складаються за функціями R,  $1/pC$ ,  $pL$  повного опору RCL-елементів і формуються у вигляді дрібно-раціональної функції від комплексної частоти  $p$ :

$$K(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = k \frac{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0}{p^m + b_{m-1}p^{m-1} + \dots + b_1p + b_0}, \quad (1.4)$$

де  $k$  - чисельний коефіцієнт.

Коефіцієнти  $a_i$ ,  $b_i$  в цьому виразі дійсні числа, тому коренями поліномів  $A(p)$ ,  $B(p)$  у функції (1.4) є дійсні і комплексно-зв'язані числа. Корені поліномів  $A(p)$ ,  $B(p)$  називаються особливими точками функції  $K(p)$ , причому корені знаменника  $B(p)$  - це полюси, а корені чисельника  $A(p)$  - це нулі функції  $K(p)$ . Полюси функції  $K(p)$  для позитивних значень параметрів RCL-елементів розташовуються в лівій напівплощині комплексної площини, тобто корені знаменника

$B(p)$  або негативні дійсні числа або комплексно-зв'язані числа з негативною дійсною частиною. Таким чином, функції, що використовуються для апроксимації частотних характеристик, повинні відповідно до вимоги фізичної реалізації бути дрібно-раціональними функціями з дійсними коефіцієнтами і полюсами в лівій напівплощині комплексної площини. Цим вимогам задовольняє ряд функцій. Серед них для вирішення завдання синтезу фільтрів широко використовуються функції Баттерворту і Чебишева.

В процесі синтезу необхідно від функції  $K_p(\omega)$ , що апроксимує частотну залежність коефіцієнта передавання за потужністю, перейти до передавальної функції  $K(j\omega)$  за напругою. Коефіцієнт передавання за потужністю  $K_p(\omega)$  дійсною функцією, тому що

$$K_p(\omega) = K(j\omega) \cdot K^*(j\omega) = K(j\omega) \cdot K(-j\omega). \quad (1.5)$$

Функція ця парна і тому може бути надана у вигляді відношення двох поліномів від змінної  $\omega^2$  :

$$K_p(\omega) = \frac{M(\omega^2)}{N(\omega^2)} = k \frac{\omega^{2m} + c_{m-1}\omega^{2(m-1)} + \dots + c_1\omega^2 + c_0}{\omega^{2n} + d_{n-1}\omega^{2(n-1)} + \dots + d_1\omega^2 + d_0}. \quad (1.6)$$

Для комплексної змінної  $p = j\omega$  функція  $K_p(\omega)$  аналітично продовжується з уявної вісі на всю комплексну площину:

$$K_p(p) = K(p) \cdot K(-p). \quad (1.7)$$

Тому, якщо  $\beta_k = Re(\beta_k) + j Im(\beta_k)$  особлива точка (полюс) передавальної функції  $K(p)$  за напругою, то у передавальної функції  $K_p(p)$  будуть дві особливі :  $\gamma_k' = Re(\beta_k) + j Im(\beta_k)$  і  $\gamma_k'' = -Re(\beta_k) - j Im(\beta_k)$ . Отже, для складання  $K(p)$  - передавальної функції коло за напругою по заданій функції  $K_p(p)$  за потужністю необхідно з усіх пар особливих точок функції  $K_p(p)$  вибрати особливі з від'ємною дійсною частиною, щоб забезпечити умову фізичної можливості бути реалізованим.

### 1.3 Фільтри з максимально-пласкою характеристикою

Максимально плоска характеристика описується функцією Баттерворту:

$$K_p(\omega) = \frac{1}{1 + \omega^{2n}}. \quad (1.8)$$

Дана функція виходить з функції (1.6) при  $K_p(0) = 1$  і при прирівнюванні нулю максимального числа похідних як на частоті  $\omega = 0$ , так і на частоті  $\omega = \infty$ .

Ціле число  $n$  в (1.8) - порядок фільтру. Чим вище порядок, тим ближче частотна характеристика до ідеальної прямокутної форми. Графік цієї функції при  $n=3$  наведено на рис. 1.3 за допомогою MathCAD-програми. Фільтри з такою характеристикою називаються фільтрами Баттерворту.

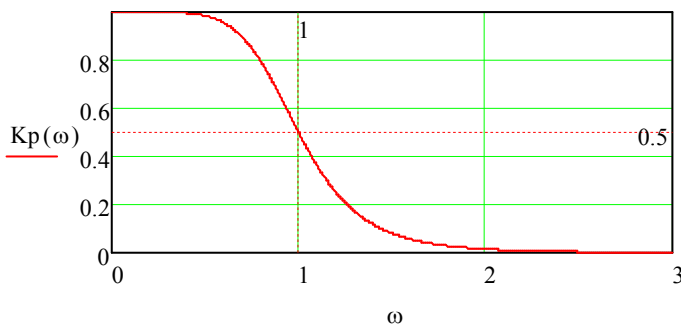


Рисунок 1.3 - Частотна характеристика фільтру Баттерворту за потужністю.

Пунктирною лінією на рисунку відзначений рівень  $\delta = 0,5$ . За цим рівнем визначається смуга пропускання фільтрів Баттерворда за потужністю. Межа  $\omega = \omega_{\pi} = 1$  смуги пропускання АЧХ передавальної функції називається частотою зрізу. Фільтри НЧ,

побудовані для смуги пропускання від нуля до  $\omega_n = 1$  називаються низькочастотними фільтрами – прототипами.

На частоті зрізу  $\omega = 1$ :  $K_p(1) = 0.5$ ;  $A = 10 \lg 0.5 \approx -3$ дБ.

Порядок фільтру визначається заданим значенням загасання  $A_n$  на межі смуги пропускання  $\omega_n$  і значенням загасання  $A_s$  на межі смуги загордження  $\omega_s$  (див. рис. 1.2). У випадку  $\omega_n = 1$  має місце:

$$A_c = A_n = -3 \text{дБ};$$

$$A_s = -10 \lg(1 + \omega_s^{2n}), \text{ дБ.}$$

Звідси впливає формула для визначення порядку фільтру:

$$n = \frac{\lg(10^{A_s/10} - 1)}{2 \lg \omega_s}. \quad (1.9)$$

Число  $n$  округляється до найближчого більшого цілого числа. Наприклад, для  $A_s = -25$  дБ,  $\omega_s = 3$  отримаємо

$$n = \frac{\lg(10^{25/10} - 1)}{2 \lg 3} = 2,618.$$

Беремо  $n = 3$  та забезпечуємо загасання більше 25 дБ.

Функції (1.8) на підставі (1.5), (1.7) і при  $\omega = -jp$  відповідає передавальна функція за потужністю

$$K_p(p) = K(p) \cdot K(-p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{1}{1 + (-1)^n p^{2n}}. \quad (1.10)$$

Для складання передавальної функції  $K(p)$  за напругою вибираються корені рівняння

$$N(p) = 1 + (-1)^n p^{2n} = 0, \quad (1.11)$$

які лежать в лівій напівплощині комплексної площини.

На рис. 1.4 наведено приклад розрахунку за допомогою MathCAD -програми коренів рівняння (1.11) при  $n = 3$ .

$$\begin{aligned}
 n &:= 3 & \underline{N(p)} &:= 1 + (-j \cdot p)^{2-n} & \text{collect, } p &\rightarrow 1 - p^6 \\
 b &:= 1 - p^6 & \text{coeffs} &\rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} & \beta &:= \text{polyroots}(b) = \begin{pmatrix} -1 \\ -0.5 - 0.866i \\ -0.5 + 0.866i \\ 0.5 + 0.866i \\ 0.5 - 0.866i \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 1.4 - MathCAD -програма розрахунку коренів рівняння

Тут функція **collect** представляє функцію  $N(p)$  у вигляді полінома, функція **coeffs** знаходить поліноміальні коефіцієнти функції  $N(p)$ , функція **polyroots** знаходить корені полінома (1.11). Ці корені розташовуються на колі одиничного радіусу через рівні кутові інтервали.

Передавальну функцію за напругою складемо з коренів із від'ємною дійсною частиною:

$$K(p) = \frac{1}{p - (-1)} \cdot \frac{1}{p - (-0.5 - j0.866)} \cdot \frac{1}{p - (-0.5 + j0.866)}.$$

На рис.1.5 наведено АЧХ низькочастотного фільтру-прототипу, яка побудована MathCAD -програмою за даною передавальною функцією.

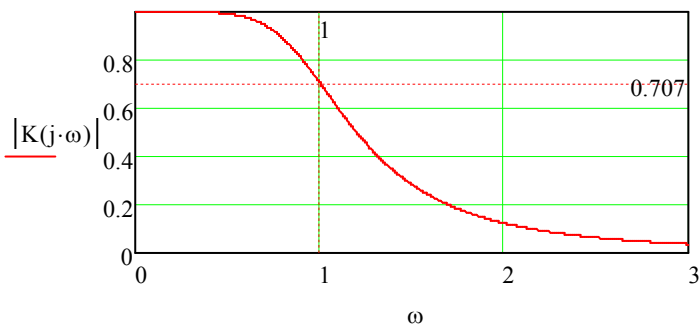


Рисунок 1.5 - АЧХ низькочастотного фільтру-прототипу Баттерворту 3-го порядку за напругою

Пунктирною лінією на рисунку відзначений рівень  $\delta = 1/\sqrt{2} = 0,707$ . За цим рівнем визначається смуга пропускання фільтрів Баттерворда за напругою.

#### 1.4 Фільтри з рівнохвильовою характеристикою

Фільтри з рівнохвильовою характеристикою описується функцією

$$K_p(\omega) = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega)}, \quad (1.12)$$

де  $\varepsilon^2 \leq 1$  - коефіцієнт нерівномірності характеристики в смузі пропускання,  $T_n(\omega)$  - поліном Чебишева першого роду n-го порядку, що визначається за формулою

$$T_n(\omega) = \begin{cases} \cos(n \arccos(\omega)) & \text{при } 0 \leq \omega \leq 1, \\ c \cosh(n \operatorname{arccosh}(\omega)) & \text{при } \omega > 1. \end{cases} \quad (1.13)$$

На інтервалі  $0 \leq \omega \leq 1$  поліноми Чебишева мають осцилюючий характер, рівномірно відхиляючись від нуля на величину  $\pm 1$ .

У явній формі поліноми Чебишева записуються наступним чином:

$$T_1(\omega) = \cos \arccos \omega = \omega;$$

$$T_2(\omega) = \cos 2 \arccos \omega = 2 \cos^2 \arccos \omega - 1 = 2\omega^2 - 1.$$

При  $n \geq 3$  використовується рекурентна формула

$$T_{n+1}(\omega) = 2\omega T_n(\omega) - T_{n-1}(\omega). \quad (1.14)$$

Наприклад:  $T_3(\omega) = 2\omega T_2 - T_1 = 4\omega^3 - 3\omega$ .

У інтервалі  $\omega > 1$  поліноми Чебишева монотонно зростають.

Графік функції (1.12) для  $n=3$  наведено на рис 1.6.

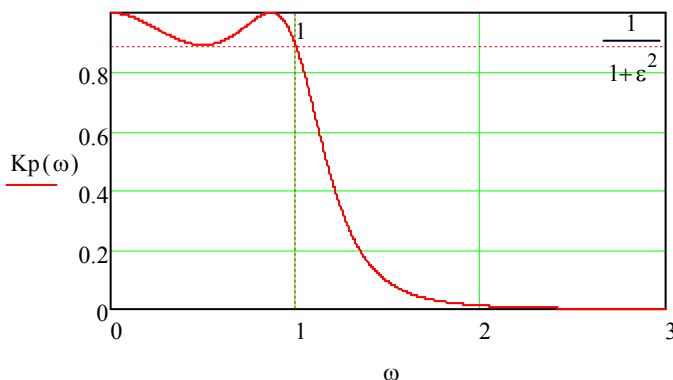


Рисунок 1.6 - Частотна характеристика фільтра Чебишева за потужністю.

Пунктирною лінією на рисунку відзначений рівень  $\delta = 1/(1 + \epsilon^2)$ . За цим рівнем на частоті зрізу  $\omega_c = 1$  визначається смуга пропускання фільтрів Чебишева за потужністю.

На частоті зрізу  $\omega_c = 1$  має місце  $T_n(1) = 1$ , тому

$$K_p(1) = \frac{1}{1 + \varepsilon^2}; \quad (1.15)$$

$$A_c = -10 \lg(1 + \varepsilon^2). \quad (1.16)$$

Для визначення порядку фільтру при  $\omega_n = \omega_c = 1$  і заданому значенні  $A_n = A_c$ , а також при заданому значенні  $A_3$  на частоті  $\omega_3$ , використовується формула, що випливає з (1.12) - (1.16):

$$n = \frac{\arccos \sqrt{\frac{10^{\frac{A_3}{10}} - 1}{10^{\frac{A_c}{10}} - 1}}}{\arccos(\omega_3)}. \quad (1.17)$$

Наприклад, для  $A_c = -0,5$ дБ,  $A_3 = -25$ дБ,  $\omega_3 = 3$  отримаємо

$$n = \frac{\arccos \sqrt{\frac{10^{25/10} - 1}{10^{0,5/10} - 1}}}{\arccos(3)} = 2,622.$$

Беремо  $n = 3$ , забезпечуючи загасання  $A_3$  більше 25 дБ.

Функції (1.12) на підставі (1.5), (1.7) і при  $\omega = -jp$  відповідає передавальна функція

$$K_p(p) = K(p) \cdot K(-p) = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(-jp)}. \quad (1.18)$$

Для складання передавальної функції  $K(p)$  беруться корені рівняння

$$N(p) = 1 + \varepsilon^2 T_n^2(-jp) = 0, \quad (1.19)$$

що лежать в лівій напівплощині комплексної площини.

На рис. 1.7 наведено приклад розрахунку за допомогою MathCAD -програми коренів рівняння (1.19) при  $n=3$ ,  $A_c = -0,5\text{дБ}$ ,  $\varepsilon^2 = 10^{\frac{0,5}{10}} - 1 = 0,122$ .

$$ac := 0.5$$

$$\varepsilon := \sqrt{10^{\frac{ac}{10}} - 1} = 0.349$$

$$b := \frac{1 + \varepsilon^2 \cdot [4 \cdot (-j \cdot p)^3 - 3 \cdot (-j \cdot p)]^2}{4^2 \cdot \varepsilon^2} \text{ coeffs , p} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.512217601489435816 \\ 0 \\ -0.5625 \\ 0 \\ -1.5 \\ 0 \\ -1.0 \end{pmatrix}$$

$$\beta := \text{polyroots}(b) = \begin{pmatrix} -0.626 \\ -0.313 - 1.022i \\ -0.313 + 1.022i \\ 0.313 - 1.022i \\ 0.313 + 1.022i \\ 0.626 \end{pmatrix}$$

Рисунок 1.7 - MathCAD -програма розрахунку коренів рівняння

Ці корені розташовуються на еліпсі через рівні кутові інтервали. Передавальну функцію за напругою складаємо з коренів із дійсною частиною

$$K(p) = \frac{k}{[p - (-0,313 + j1,022)] \cdot [p - (-0,626)] \cdot [p - (-0,313 - j1,022)]'}$$

$$\text{де } k = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 4^2}}.$$

На рис 1.8 наведено АЧХ низькочастотного фільтру-прототипу, що побудована за допомогою MathCAD-програми за даною передавальною функцією.

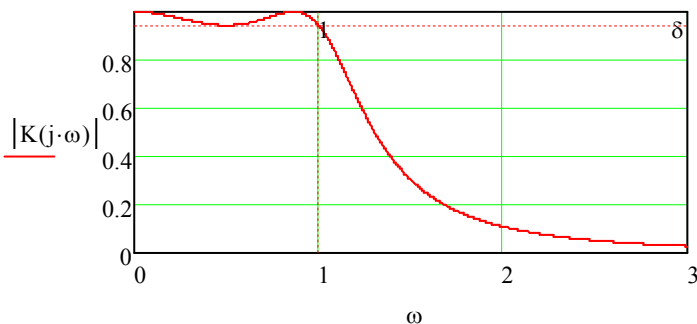


Рисунок 1.8 - АЧХ низькочастотного фільтру-прототипу Чебишева 3-го порядку за напругою

Пунктирною лінією на рисунку відзначений рівень  $\delta = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2}}$ . За цим рівнем визначається смуга пропускання фільтрів Чебишева за напругою.

### 1.5 Реалізація драбинного реактивного кола

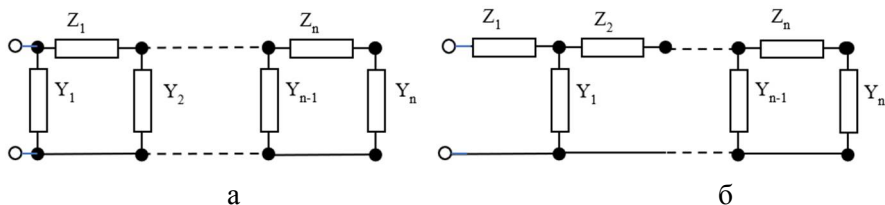
Завдання синтезу має, як правило, неоднозначне рішення, тобто необхідні характеристики фільтру можуть бути реалізовані за допомогою різних схем. Наприклад, фільтр може бути реалізований у вигляді зображеного на рис. 1.9 драбинного кола.

Для мінімізації витрат використовується драбинне реактивне коло (коло без втрат), що складається з L і C елементів.

Вхідний опір  $Z(p)$  або вхідна провідність  $Y(p) = 1/Z(p)$  драбинних кіл надається безперервним дробом.

Для кола на рис. 1.9, а, складеного з П-подібних каскадів:

$$Y(p) = Y_1(p) + \frac{1}{Z_1(p) + \frac{1}{Y_2(p) + \frac{1}{Z_2(p) + \dots}}}. \quad (1.20)$$



а - П-подібна схема, б - Т-подібна схема

Рисунок 1.9 - Різновиди драбинних кіл

Для кола на рис 1.9, б, складеного з Т- подібних каскадів:

$$Z(p) = Z_1(p) + \frac{1}{Y_1(p) + \frac{1}{Z_2(p) + \frac{1}{Y_2(p) + \dots}}} \quad (1.21)$$

Тут при реалізації НЧ фільтру беруться:  $Y_i(p) = pC_i$ ,  $Z_i(p) = pL_i$

Вхідний опір або вхідна провідність фільтра може бути знайдено методом Дарлінгтона по передавальній функції  $K_p(p)$  фільтра за потужністю за схемою на рис. 1.10, де фільтр представлений реактивним чотириполосником, який навантажений з обох боків на активні опори  $R_r$  і  $R_n$ .

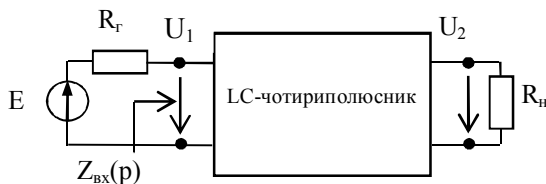


Рисунок 1.10 - Навантажений реактивний чотириполосник

Вхідний опір  $Z_{вх}(p)$  чотириполосника обчислюється за формулою:

$$Z_{\text{вх}}(p) = R_{\Gamma} \frac{1 + \Gamma(p)}{1 - \Gamma(p)}, \quad (1.22)$$

де

$$\Gamma(p) = \frac{Z_{\text{вх}}(p) - R_{\Gamma}}{Z_{\text{вх}}(p) + R_{\Gamma}} \quad (1.23)$$

коефіцієнт відбиття за напругою від входу чотириполюсника.

З функцією передачі  $K_p(p)$  фільтру коефіцієнт відбиття  $\Gamma(p)$  пов'язаний співвідношенням:

$$1 - K_p(p) = \Gamma(p) \Gamma(-p) \quad (1.24)$$

Коріння знаменника (1.24) відповідають кореням знаменника  $K_p(p)$ . Шляхом відбору коренів, які лежать у лівій напівплощині комплексної площини, складається коефіцієнт  $\Gamma(p)$ , що задовольняє умову фізичної реалізованості. По  $\Gamma(p)$  на підставі (1.22) обчислюється вхідний  $Z_{\text{вх}}(p)$ .

Наприклад, при  $R_{\Gamma} = R_{\text{Н}} = 1$  для фільтру-прототипу Баттерворта третього порядку з передавальної функцією за потужністю (1.10) по (1.24) знаходимо:

$$\Gamma(p) \Gamma(-p) = 1 - \frac{1}{1 - p^6} = \frac{p^6}{p^6 - 1}.$$

З коренів знаменника відбираємо коріння, що лежать в лівій півплощині. Ці корені збігаються з полюсами передавальної функції  $K(p)$  фільтра за напругою. Складаємо формулу для коефіцієнта відбиття:

$$\Gamma(p) = \frac{p^3}{(p+1) \left(p + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(p + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)} = \frac{p^3}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1}.$$

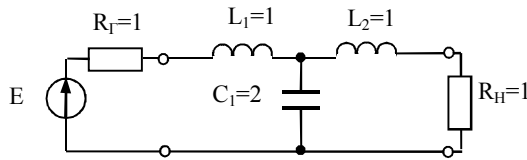
Знаходимо по (1.22) вхідний опір чотириполюсника:

$$Z_{\text{вх}}(p) = \frac{1 + \frac{p^3}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1}}{1 - \frac{p^3}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1}} = \frac{2p^3 + 2p^2 + 2p + 1}{2p^2 + 2p + 1}.$$

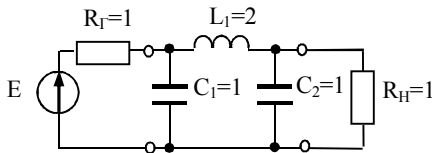
Драбинна дріб (1.21) формується при виділенні в  $Z_{\text{вх}}(p)$  на кожному етапі розкладання цілої частини у неправильного дробу:

$$Z_{\text{вх}}(p) = Z_1(p) + \frac{1}{Y_1(p) + \frac{1}{Z_2(p) + \frac{1}{1}}} = 1p + \frac{1}{2p + \frac{1}{1p + \frac{1}{1}}}.$$

Цьому дробу відповідає схема фільтру-прототипу на рис. 1.11, а, яка складена з Т- подібних каскадів. Аналогічно на підставі (1.20) складається схема з П- подібних каскадів на рис. 1.11, б.



а



б

а - Т - подібна схема, б - П - подібна схема

Рисунок 1.11 – Схеми НЧ фільтрів-прототипів

## 1.6 Розрахунок нормованих параметрів низькочастотних фільтрів - прототипів

У теорії фільтрів прийнято позначати нормовані параметри LC-елементів НЧ фільтрів - прототипів через  $g$ -параметри. Залежно від схеми фільтра  $g$ -параметр може бути представлений індуктивністю  $L$  або ємністю  $C$ . Опору  $R_{\Gamma}$  відповідає параметр  $g_0$ , опору  $R_H$  – параметр  $g_{n+1}$ .

Для  $g$ -параметрів НЧ фільтрів-прототипів  $n$ -го порядку отримано аналітичні формули.

При апроксимації за Баттервортом:

$$g_0 = g_{n+1} = 1; g_k = 2 \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{2n} \right]; k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1.25)$$

При апроксимації за Чебишовим:

$$\begin{cases} g_0 = 1; g_1 = \frac{2a_1}{\gamma}; g_k = \frac{4a_{k-1} \cdot a_k}{b_{k-1} \cdot g_{k-1}}; \\ g_{n+1} = \begin{cases} 1 & \text{при } n - \text{непарному,} \\ \operatorname{cth}^2 \left( \frac{\beta}{4} \right), & \text{при } n - \text{парному.} \end{cases} \end{cases} \quad (1.26)$$

Тут

$$a_k = \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{2n} \right]; b_k = \gamma^2 + \sin^2 \left( \frac{k\pi}{n} \right); k = 2, 3, \dots, n;$$

$$\gamma = \operatorname{sh} \left( \frac{\beta}{2n} \right); \beta = \ln \left[ \operatorname{cth} \left( \frac{A_c}{17,37} \right) \right].$$

У наведених співвідношеннях:  $n$  – порядок фільтру;  $A_c$  – амплітуда осциляцій в смузі пропускання в дБ.

Наприклад, для фільтру-прототипу Баттерворта третього порядку на підставі (1.25) маємо:  $g_1 = 1, g_2 = 2, g_3 = 1$ . Ці параметри відповідають значенням  $L, C$  на рис. 1.11. Для фільтру-

прототипу Чебишова третього порядку на підставі (1.26):  $g_1 = 1,692, g_2 = 1,075, g_3 = 1,692$ .

## 1.7 Частотні перетворення

Заключний етап синтезу полягає в перерахунку нормованої частоти та  $g$ -параметрів НЧ фільтру - прототипу в параметри фільтра, зазначених в технічному завданні.

Мають місце наступні формули перетворення комплексної частоти  $p'$  для НЧ фільтру - прототипу в комплексну частоту  $p$  для проектованого фільтру.

Для перетворення НЧ фільтру-прототипу в НЧ фільтр з граничною частотою смуги пропускання  $\omega_B$  (див. рис.1.1,а):

$$p' = \frac{p}{\omega_B}. \quad (1.27)$$

Ця формула забезпечує зміну значень індуктивності та ємності.

Для перетворення НЧ фільтру-прототипу у ВЧ фільтр з граничною частотою смуги пропускання  $\omega_H$  (див. рис 1.1,б):

$$p' = \frac{\omega_H}{p}. \quad (1.28)$$

Ця формула забезпечує перетворення індуктивності в ємність, а ємності в індуктивність.

Для перетворення НЧ фільтру-прототипу в смуговий фільтр з граничними частотами смуги пропускання  $\omega_H, \omega_B$  (див. рис. 1.1,в):

$$p' = \frac{\omega_0(p/\omega_0 - \omega_0/p)}{\Delta\omega}, \quad (1.29)$$

де  $\omega_0 = \sqrt{\omega_H\omega_B}$  - середня частота смуги пропускання;  $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$  - ширина смуги пропускання.

Ця формула забезпечує перетворення індуктивності в послідовне з'єднання індуктивності і ємності, а ємності - в паралельне з'єднання індуктивності і ємності.

Для перетворення НЧ фільтру-прототипу у загороджувальний фільтр з граничними частотами смуги загородження  $\omega_H$ ,  $\omega_B$  (див. рис. 1.1,г):

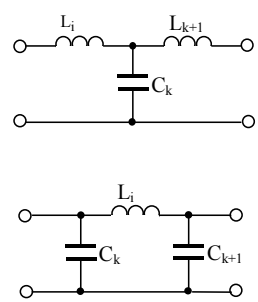
$$p' = \frac{1}{\frac{\omega_0}{\Delta\omega} (p/\omega_0 + \omega_0/p)}, \quad (1.30)$$

де  $\omega_0 = \sqrt{\omega_H \omega_B}$  - середня частота смуги загородження;  $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$  - ширина смуги загородження.

Ця формула забезпечує перетворення індуктивності в паралельне з'єднання індуктивності і ємності, а ємності - в послідовне з'єднання індуктивності і ємності.

У табл. 1.1 наведено схеми Т-подібних і П-подібних каскадів драбинного кола і формули перерахунку g-параметрів НЧ фільтру-прототипу в параметри елементів проєктованого фільтру. У таблиці для фільтру Чебишева непарного порядку  $R_n = R_H$ , для парного порядку  $R_n = R_H \cdot g_{n+1}$ , див. формулу (1.26). Для фільтру Баттерворту  $R_n = R_H$ .

Таблиця 1.1 – Схеми ланок фільтрів та формули перерахунку їх параметрів

Тип	Схема	Формули перерахунку
1	2	3
ФНЧ		$L_i = \frac{g_i R_n}{\omega_B}; \quad C_k = \frac{g_k}{\omega_B R_n};$ $C_k = \frac{g_k}{\omega_B R_n}; \quad L_i = \frac{g_i R_n}{\omega_B}.$

Продовження таблиці 1.1

1	2	2
ФВЧ		$C_i = \frac{1}{g_i \omega_n R_n}; \quad L_k = \frac{R_n}{g_k \omega_n};$ $L_k = \frac{R_n}{g_k \omega_n}; \quad C_i = \frac{1}{g_i \omega_n R_n}.$
СФ		$L_i = \frac{g_i R_n}{\Delta \omega}; \quad C_i = \frac{\Delta \omega}{g_i \omega_0^2 R_n};$ $L_k = \frac{\Delta \omega R_n}{g_k \omega_0^2}; \quad C_k = \frac{g_k}{\Delta \omega R_n};$ $L_i = \frac{g_i R_n}{\Delta \omega}; \quad C_i = \frac{\Delta \omega}{g_i \omega_0^2 R_n};$ $L_k = \frac{\Delta \omega R_n}{g_k \omega_0^2}; \quad C_k = \frac{g_k}{\Delta \omega R_n}.$
ЗФ		$L_i = \frac{g_i \Delta \omega R_n}{\omega_0^2}; \quad C_i = \frac{1}{g_i \Delta \omega R_n};$ $C_k = \frac{g_k \cdot \Delta \omega}{\omega_0^2 R_n}; \quad L_k = \frac{R_n}{g_k \Delta \omega};$ $L_i = \frac{g_i \Delta \omega R_n}{\omega_0^2}; \quad C_i = \frac{1}{g_i \Delta \omega R_n};$ $C_k = \frac{g_k \cdot \Delta \omega}{\omega_0^2 R_n}; \quad L_k = \frac{R_n}{g_k \cdot \Delta \omega}.$

## 1.8 Алгоритм розрахунку параметрів фільтрів

Початковими даними для розрахунку фільтру граничні частоти смуг пропускання і загородження і значення на цих частотах робочого загасання. Розрахунок фільтру проводиться в наступному порядку:

а) за заданими значеннями загасання визначається за формулами (1.9) або (1.17) порядок НЧ фільтру-прототипу;

б) за формулами (1.25) або (1.26) розраховуються нормовані g-параметри фільтру-прототипу;

в) за даними табл. 1.1 проводиться перерахунок g-параметрів фільтру-прототипу в параметри проєктованого фільтру.

Приклад 1.1. Розрахувати Т і П-подібний фільтри нижніх частот третього порядку з характеристикою Баттерворту. Гранична частота смуги пропускання  $F_e = F_c = 10$  МГц, гранична частота смуги загородження  $F_3 = 3F_c$ . Загасання на цих частотах  $A_c = 3$  дБ,  $A_3 = 25$  дБ. Опори генератора і навантаження  $R_G = 50$  Ом,  $R_H = 50$  Ом.

З (1.9) при,  $\omega_c = 1$ ,  $\omega_3 = 3$  знаходимо  $n = 2,618$ , беремо  $n = 3$ . З (1.25) визначаємо g-параметри:

$$g_0 = 1, g_1 = 2 \sin \left[ \frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot \pi}{2 \cdot 3} \right] = 1, g_2 = 2 \sin \left[ \frac{(2 \cdot 2 - 1) \cdot \pi}{2 \cdot 3} \right] = 2,$$

$$g_3 = 2 \sin \left[ \frac{(2 \cdot 3 - 1) \cdot \pi}{2 \cdot 3} \right] = 1, g_4 = 1.$$

З табл. 1.1 знаходимо параметри Т-подібного ФНЧ:

$$L_1 = \frac{g_1 R_H}{\omega_e} = 0,7958 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

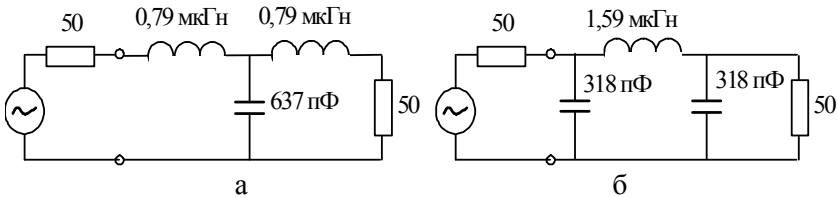
$$C_1 = \frac{g_2}{\omega_e R_H} = 636,6 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, L_2 = \frac{g_3 R_H}{\omega_e} = 0,7958 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

З табл. 1.1 знаходимо параметри П-подібного ФНЧ:

$$C_1 = \frac{g_1}{\omega_6 R_H} = 318,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_1 = \frac{g_2 R_H}{\omega_6} = 1,592 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_2 = \frac{g_3}{\omega_6 R_H} = 318,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

На рис. 1.12 наведено схеми розрахованих фільтрів.



а - Т-подібна схема, б - П-подібна схема

Рисунок 1.12 - Фільтр нижніх частот

Приклад 1.2. Розрахувати Т-подібний фільтр верхніх частот третього порядку з характеристикою Баттерворту. Гранична частота смуги пропускання  $F_H = F_c = 10$  МГц, гранична частота смуги загородження  $F_3 = 3F_c$ . Загасання на цих частотах  $A_c = 3$  дБ,  $A_3 = 25$  дБ. Опори генератора і навантаження  $R_G = 50$  Ом,  $R_H = 50$  Ом.

З прикладу 1 беремо g-параметри НЧ фільтру-прототипу. З табл. 1.1 знаходимо параметри Т-подібного ФВЧ:

$$C_1 = \frac{1}{g_1 \omega_H R_H} = 318,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$C_1 = \frac{1}{g_1 \omega_H R_H} = 318,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_1 = \frac{R_H}{\omega_H g_2} = 39,79 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_2 = \frac{1}{g_3 \omega_H R_H} = 318,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Приклад 1.3. Розрахувати П-подібний фільтр нижніх частот третього порядку з характеристикою Чебишева. Гранична частота смуги пропускання  $F_g = F_c = 12$  МГц, гранична частота смуги загородження  $F_3 = 3F_c$ . Загасання в смузі пропускання  $A_c = 0,6$  дБ, на частоті загородження  $A_3 = 25$  дБ. Опори генератора і навантаження  $R_r = 50$  Ом,  $R_H = 50$  Ом.

З (1.17) при  $\omega_c = 1$ ,  $\omega_3 = 3$  знаходимо  $n = 2,618$ . Беремо  $n = 3$ . З (1.26) визначаємо g-параметри:

$$\beta = \ln \left[ \operatorname{ct} \square \left( \frac{A_c}{17,37} \right) \right] = 3,366, \gamma = s \square \left( \frac{\beta}{2 \cdot 3} \right) = 0,591$$

$$a_1 = \sin \left( \frac{\pi}{2 \cdot 3} \right) = 0,5, a_2 = \sin \left( \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot 3} \right) = 1, a_3 = \sin \left( \frac{5 \cdot \pi}{2 \cdot 3} \right) = 0,5,$$

$$b_1 = \gamma^2 + \sin^2 \left( \frac{\pi}{3} \right) = 1,099, b_2 = \gamma^2 + \sin^2 \left( \frac{2\pi}{3} \right) = 1,099,$$

$$g_0 = 1, g_1 = \frac{2a_1}{\gamma} = 1,692, g_2 = \frac{4a_1a_2}{b_1g_1} = 1,075,$$

$$g_3 = \frac{4a_2a_3}{b_2g_2} = 1,692, g_4 = 1.$$

З табл. 1.1 знаходимо параметри П-подібного ФНЧ:

$$C_1 = \frac{g_1}{\omega_g R_H} = 4,489 \cdot 10^{-10} \text{ Ф},$$

$$L_1 = \frac{g_2 R_H}{\omega_g} = 7,13 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}, C_2 = \frac{g_3}{\omega_g R_H} = 4,489 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}.$$

Приклад 1.4. Розрахувати Т-подібний смуговий фільтр третього порядку з характеристикою Чебишева. Граничні частоти смуги пропускання  $F_H = 8$  МГц,  $F_g = 12$  МГц. Загасання в смузі пропускання

$A_c = -0,5$  дБ. На частоті загородження  $F_3 = 3F_c$  загасання  $A_3 = -25$  дБ. Опори генератора і навантаження  $R_\Gamma = 50$  Ом,  $R_H = 50$  Ом.

Значення g-параметрів НЧ фільтру-прототипу для  $\omega_c = 1$ ,  $A_c = -0,5$ дБ,  $\omega_3 = 3$ ,  $A_3 = -25$ дБ, отримані у прикладі 3.

Визначаємо середню частоту смуги пропускання і ширину смуги пропускання:  $F_0 = \sqrt{F_H F_g} = 9,798$  МГц,  $\Delta F = F_g - F_H = 4$  МГц.

З табл. 1.1 знаходимо параметри Т-подібного СФ:

$$L_1 = \frac{g_1 R_H}{\Delta\omega} = 3,176 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_1 = \frac{\Delta\omega}{g_1 \omega_0^2 R_H} = 83,08 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_2 = \frac{\Delta\omega R_H}{g_2 \omega_0^2} = 33,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_2 = \frac{g_2}{\Delta\omega R_H} = 792,2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_3 = \frac{g_3 R_H}{\Delta\omega} = 3,176 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_3 = \frac{\Delta\omega}{g_3 \omega_0^2 R_H} = 83,08 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Приклад 1.5. Розрахувати Т-подібний загороджувальний фільтр третього порядку з характеристикою Чебишева. Граничні частоти смуги загородження  $F_H = 8$  МГц,  $F_g = 12$  МГц, Загасання в смузі загородження  $A_3 = -25$  дБ. На частоті  $F_n = 3F_c$  загасання  $A_c = -0,5$  дБ. Опори генератора і навантаження  $R_\Gamma = 50$  Ом,  $R_H = 50$  Ом.

Значення g-параметрів НЧ фільтру-прототипу для  $\omega_c = 1$ ,  $A_c = -0,5$ дБ,  $\omega_3 = 3$ ,  $A_3 = -25$ дБ отримані у прикладі 3.

Визначаємо середню частоту:  $F_0 = \sqrt{F_H F_B} = 9,798$  МГц,  $\Delta F = F_B - F_H = 4$  МГц.

За табл. 1.1 знаходимо параметри Т-подібного ЗФ:

$$L_1 = \frac{g_1 \Delta\omega R_H}{\omega_0^2} = 52,93 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_1 = \frac{1}{g_1 \Delta\omega R_H} = 498,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_2 = \frac{R_H}{g_2 \Delta\omega} = 1,998 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, C_2 = \frac{g_2 \Delta\omega}{\omega_0^2 R_H} = 132 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$L_3 = \frac{g_3 \Delta \omega R_H}{\omega_0^2} = 52,93 \cdot 10^{-6} \Gamma_H, C_3 = \frac{1}{g_3 \Delta \omega R_H} = 498,5 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

## 2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Основною метою аналізу фільтру є розрахунок амплітудно і фазочастотної характеристик його комплексного коефіцієнту передавання (1.1) за напругою, дослідження полюсів і нулів його передавальної функції (1.4), моделювання часових характеристик.

### 2.1 Аналіз частотних характеристик

Частотні характеристики (АЧХ і ФЧХ) можуть бути отримані з математичної моделі електричної схеми фільтру [1-6]. Математична модель фільтру складається за допомогою методу контурних струмів або методу вузлових потенціалів. Для аналізу схеми вибирається той метод, який дає менше число рівнянь. Наприклад, для Т-подібної схеми на рис. 1.12, а слід використовувати метод контурних струмів, а для П-подібної схеми на рис. 1.12, б - метод вузлових потенціалів.

Для аналізу Т-подібних схем з табл. 1.1 математична модель за методом контурних струмів має вид:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & -Z_{12} \\ -Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

тут  $Z_{11} = R_r + Z_1 + Z_2$  – сума опорів першого контуру;

$Z_{12} = Z_{21} = Z_2$  – опір між контурами;

$Z_{22} = R_n + Z_3 + Z_2$  – сума опорів другого контуру.

Опори  $Z_1, Z_2, Z_3$  приймають такі значення:  $Z_C = 1/j\omega C$  – для ємності;  $Z_L = j\omega L$  – для індуктивності;  $Z_{\text{пос}} = Z_C + Z_L$  – для послідовного з'єднання;  $Z_{\text{пар}} = 1/(1/Z_C + 1/Z_L)$  – для паралельного з'єднання.

При  $E_1=1$  В коефіцієнт передавання фільтра дорівнюватиме  $\dot{K}(\omega) = R_n \dot{I}_2(\omega)$ .

Для аналізу П-подібних схем з табл. 1.1 математична модель за методом вузлових потенціалів має вид:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

тут  $Y_{11} = 1/R_{\Gamma} + Y_1 + Y_2$  – сума провідностей, що підключена до першого вузла;

$Y_{12} = Y_{21} = Y_2$  – провідність між вузлами;

$Y_{22} = 1/R_H + Y_3 + Y_2$  – сума провідностей, що підключена до другого вузла.

Провідності  $Y_L$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  приймають такі значення:  $Y_C = j\omega C$  – для ємності;  $Y_L = 1/j\omega L$  – для індуктивності;  $Y_{\text{пос}} = 1/(1/Y_L + 1/Y_C)$  – для послідовного з'єднання;  $Y_{\text{пар}} = Y_L + Y_C$  – для паралельного з'єднання.

При  $J_1=1/R_{\Gamma}$  А коефіцієнт передавання фільтра дорівнюватиме  $\dot{K}(\omega) = \dot{\varphi}_2(\omega)$ .

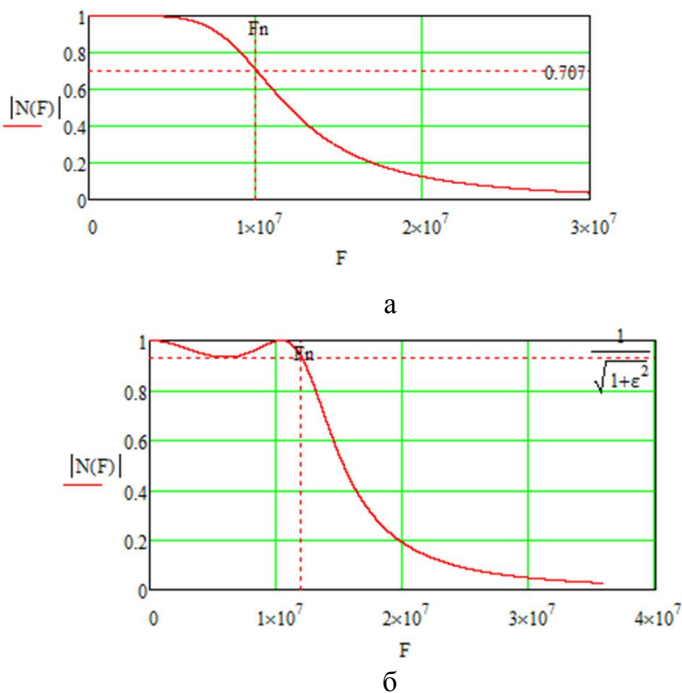
При побудові АЧХ фільтру його комплексний коефіцієнт передавання нормується. Нормований коефіцієнт передавання записується у вигляді  $\dot{N}(F) = \frac{\dot{K}(F)}{K_{\max}}$ . (2.3)

Значення  $K_{\max}$  визначається коефіцієнтом передавання подільника напруги, складеного резисторів  $R_{\Gamma}$ ,  $R_H$ :

$$K_{\max} = \frac{R_H}{R_{\Gamma} + R_H}. \quad (2.4)$$

За рівності опорів  $R_{\Gamma}$ ,  $R_H$  маємо  $K_{\max} = 0,5$ .

На рис. 2.1, а наведено графік АЧХ ФНЧ з характеристикою Баттерворту, що розраховано за допомогою MathCAD-програми за даними прикладу 1.1, а на рис. 2.1, б - графік АЧХ ФНЧ з характеристикою Чебишева за даними прикладу 1.3 із розділу 1.8.



а – АЧХ фільтру Баттерворту, б – АЧХ фільтру Чебишева

Рисунок 2.1 - Частотні характеристики ФНЧ

*Зауваження. Дані аналізу повинні відповідати або бути кращими за значення загасань  $A_c$ ,  $A_z$  технічного завдання на синтез.*

Наприклад, для АЧХ на рис. 2.1, б розрахунок загасання за MathCAD-програмою дає наступні результати:  $F_H = 1,2 \cdot 10^7$  Гц,  $A_c = 10 \lg(|N(F_H)|^2) = -0,598$  Дб,  $A_z = 10 \lg(|N(3F_H)|^2) = -31,618$  Дб.

Отримані результати задовольняють умовам  $A_c \leq 0,6$  дБ,  $A_z \geq 25$  дБ на проектування ФНЧ з прикладу 1.3 із розділу 1.8.

## 2.2 Аналіз передавальних функцій

Передавальні функції  $K(p)=A(p)/B(p)$ ,  $p = j\omega$  можуть бути складені при вирішенні системи рівнянь математичної моделі схеми фільтру методом Крамера [1-6]. Коефіцієнти передавальних функцій слід визначати аналітично. За чисельних розрахунків можлива поява зайвих ступенів через кінцеву розмірність чисел.

Для розрахунку коефіцієнтів поліномів передавальних функцій фільтрів третього порядку використовуються функції аналітичних перетворень системи MathCAD.

На рис. 2.2 представлено MathCAD-програму складання методом Крамера передавальної функції T - схеми ФНЧ за матрицею контурних опорів.

$$Z(p) := \begin{pmatrix} Rg + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot C2} & -\frac{1}{p \cdot C2} \\ -\frac{1}{p \cdot C2} & Rn + p \cdot L3 + \frac{1}{p \cdot C2} \end{pmatrix} \quad E := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$K(p) := \frac{Rn \cdot \begin{vmatrix} Rg + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot C2} & 1 \\ -\frac{1}{p \cdot C2} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Rg + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot C2} & -\frac{1}{p \cdot C2} \\ -\frac{1}{p \cdot C2} & Rn + p \cdot L3 + \frac{1}{p \cdot C2} \end{vmatrix}}$$

$$K(p) \text{ collect, } p \rightarrow \frac{Rn}{C2 \cdot L1 \cdot L3 \cdot p^3 + (C2 \cdot L3 \cdot Rg + C2 \cdot L1 \cdot Rn) \cdot p^2 + (L1 + L3 + C2 \cdot Rg \cdot Rn) \cdot p + Rg + Rn}$$

Рисунок 2.2 – Програма розрахунку передавальної функції T - схеми ФНЧ

На рис. 2.3 представлено MathCAD-програму складання методом Крамера передавальної функції П - схеми ФВЧ за матрицею вузлових провідностей.

$$\begin{aligned}
 Y(p) &:= \begin{pmatrix} \frac{1}{R_g} + p \cdot C_2 + \frac{1}{p \cdot L_1} & -p \cdot C_2 \\ -p \cdot C_2 & \frac{1}{R_n} + p \cdot C_2 + \frac{1}{p \cdot L_3} \end{pmatrix} & J &:= \begin{pmatrix} \frac{1}{R_g} \\ 0 \end{pmatrix} \\
 K(p) &:= \frac{\begin{pmatrix} \frac{1}{R_g} + p \cdot C_2 + \frac{1}{p \cdot L_1} & \frac{1}{R_g} \\ -p \cdot C_2 & 0 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \frac{1}{R_g} + p \cdot C_2 + \frac{1}{p \cdot L_1} & -p \cdot C_2 \\ -p \cdot C_2 & \frac{1}{R_n} + p \cdot C_2 + \frac{1}{p \cdot L_3} \end{pmatrix}} & & + \\
 K(p) \text{ collect, p} &\rightarrow \frac{C_2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot R_n \cdot p^3}{(C_2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot R_g + C_2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot R_n) \cdot p^3 + (L_1 \cdot L_3 + C_2 \cdot L_1 \cdot R_g \cdot R_n + C_2 \cdot L_3 \cdot R_g \cdot R_n) \cdot p^2 + (L_3 \cdot R_g + L_1 \cdot R_n) \cdot p + R_g \cdot R_n}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.3 – Програма розрахунку передавальної функції П - схеми ФВЧ

На рис. 2.4 представлені фрагменти MathCAD-програм розрахунку передавальних функцій П - схеми ФНЧ і Т - схеми ФВЧ.

Передавальна функція П - схеми ФНЧ

$$K(p) := \frac{L_2 \cdot R_n}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2 + b_3 \cdot p^3}$$

$b := B(p) \text{ coeffs, p} \rightarrow$

$$\begin{pmatrix} C_2 \cdot R_n \cdot R_g^2 + L_2 \cdot R_g \\ C_2 \cdot L_2 \cdot R_g^2 + C_2 \cdot L_1 \cdot R_g \cdot R_n + C_3 \cdot L_2 \cdot R_g \cdot R_n \\ C_2 \cdot C_3 \cdot L_2 \cdot R_n \cdot R_g^2 + C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_g \\ C_2 \cdot C_3 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_g \cdot R_n \end{pmatrix}$$

Передавальна функція Т - схеми ФВЧ

$$K(p) := \frac{C_1 \cdot C_3 \cdot L_2 \cdot R_n \cdot p^3}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2 + b_3 \cdot p^3}$$

$b :=$

$$\begin{pmatrix} R_g \cdot R_n \\ L_3 \cdot R_g + L_1 \cdot R_n \\ L_1 \cdot L_3 + C_2 \cdot L_1 \cdot R_g \cdot R_n + C_2 \cdot L_3 \cdot R_g \cdot R_n \\ C_2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot R_g + C_2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot R_n \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4 – Фрагменти програм розрахунку передавальної функції П - схеми ФНЧ і Т - схеми ФВЧ

За передавальною функцією необхідно виконати перевірку результатів синтезу шляхом розкладання знаменників передавальних функцій на множники з визначенням полюсів передавальної функції НЧ фільтра - прототипу.

На рис. 2.5 представлено фрагмент MathCAD-програми перевірки результатів синтезу для Т - схеми ФНЧ.

$$\begin{aligned}
 L1 &:= 1.122 \times 10^{-6} \quad C2 := 2.852 \times 10^{-10} \quad L3 := L1 \\
 \beta &:= \text{polyroots} \left( \frac{b}{b_3} \right) = \begin{pmatrix} -4.456 \times 10^7 \\ -2.228 \times 10^7 - 7.585i \times 10^7 \\ -2.228 \times 10^7 + 7.585i \times 10^7 \end{pmatrix} \\
 K(p) &:= \frac{Rn}{b_3 \cdot (p - \beta_0) \cdot (p - \beta_1) \cdot (p - \beta_2)} \quad \frac{\beta}{\omega n} = \begin{pmatrix} -0.591 \\ -0.296 - 1.006i \\ -0.296 + 1.006i \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.5 – Фрагмент програми перевірки результатів синтезу для Т - схеми ФНЧ

На рис. 2.6 представлено фрагмент MathCAD-програми перевірки результатів синтезу для Т - схеми ФВЧ.

$$\begin{aligned}
 L1 &:= 3.135 \times 10^{-7} \quad C2 := 1.974 \times 10^{-10} \quad L3 := L1 \\
 \beta &:= \text{polyroots} \left( \frac{b}{b_3} \right) = \begin{pmatrix} -1.595 \times 10^8 \\ -2.533 \times 10^7 + 8.625i \times 10^7 \\ -2.533 \times 10^7 - 8.625i \times 10^7 \end{pmatrix} \\
 K(p) &:= \frac{C2 \cdot L1 \cdot L3 \cdot Rn \cdot p^3}{b_3 \cdot (p - \beta_0) \cdot (p - \beta_1) \cdot (p - \beta_2)} \quad \frac{\omega v}{\beta} = \begin{pmatrix} -0.591 \\ -0.295 - 1.006i \\ -0.295 + 1.006i \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.6 – Фрагмент програми перевірки результатів синтезу для Т - схеми ФВЧ

Отримані значення  $\beta_1/\omega_n$  та  $\omega_n/\beta_1$  збіглися з корінням НЧ фільтра-прототипу. Функція **polyroots** у програмах знаходить коріння полінома. Аналогічно проводиться перевірка синтезу П-схем фільтрів.

*Зауваження.* Коріння передавальної функції ФНЧ або ФВЧ має збігатися з корінням НЧ фільтра прототипу, які були визначені на етапі синтезу фільтра.

### 2.3 Аналіз часових характеристик

Основними часовими характеристиками кола є перехідна і імпульсна характеристики. Ці характеристики визначаються за нульових початкових умов на реактивних елементах кола, тобто при нульовій початковій напрузі на конденсаторах і нульовому початковому струмі в котушках індуктивності [1-6].

Перехідна характеристика  $\square(t)$  - це реакція кола на сигнал у вигляді одиничної ступінчатої функції (функції Хевісайду)

$$1_0(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

Імпульсна характеристика  $k(t)$  - це реакція кола на сигнал у вигляді імпульсної функції  $\delta(t)$  (дельта - функції Дірака). Імпульсна функція є вузьким прямокутним імпульсом, тривалість якого прямує до нуля, висота - до нескінченності, а площа залишається рівною одиниці. Імпульсна функція володіє властивістю фільтрування:

$$\int_{-\infty}^{\infty} u(t)\delta(t - \tau)dt = u(\tau). \quad (2.6)$$

За відомими перехідною або імпульсною характеристиками можна за допомогою інтеграла згортки знайти реакцію кола на вхідний сигнал довільної форми. Наприклад, з імпульсної

характеристики  $k(t)$  реакція на вхідний сигнал  $u_1(t)$  обчислюється за формулою:

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(\tau)k(t - \tau) d\tau. \quad (2.7)$$

Аналіз часових характеристик можна здійснити операторним методом на основі інтегральних перетворень Лапласа.

Зображення за Лапласом одиничної функції

$$L[1_0(t)] = \frac{1}{p}. \quad (2.8)$$

Зображення за Лапласом імпульсної функції

$$L[\delta(t)] = 1. \quad (2.9)$$

Звідси зображення за Лапласом перехідної і імпульсної характеристик:

$$L[\square(t)] = \frac{1}{p}K(p); \quad (2.10)$$

$$L[k(t)] = K(p). \quad (2.11)$$

де  $L$  – оператор прямого перетворення Лапласа,  $K(p)$  - передавальна функція кола,  $p$  – комплексна частота.

Для знаходження залежності характеристик від часу необхідно виконати зворотне перетворення Лапласа:

$$\square(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{p}K(p)\right], \quad (2.12)$$

$$k(t) = L^{-1}[K(p)]. \quad (2.13)$$

Це перетворення можна здійснити шляхом розкладання передавальної функції на прості дроби, оригінали від зображення яких відомі. Розкладання передавальної функції (1.4) на прості дроби записується у вигляді

$$K(p) = \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{p - p_i}, \quad (2.14)$$

де  $v_i = \frac{A(p)}{B'(p)}$  при  $p = p_i$ , штрихом позначена похідна.

Оригінал від членів ряду відомий:

$$L^{-1} \left[ \frac{v_i}{p - p_i} \right] = v_i e^{p_i t}. \quad (2.15)$$

Тому на підставі (2.13) - (2.15) функції (2.14) відповідатиме імпульсна характеристика вигляду

$$k(t) = \sum_{i=1}^m v_i e^{p_i t}. \quad (2.16)$$

Для отримання перехідної характеристики використовується співвідношення:

$$L^{-1} \left[ \frac{v_i}{p - p_i} \cdot \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[ \frac{v_i}{p_i} \left( \frac{1}{p - p_i} - \frac{1}{p} \right) \right] = \frac{v_i}{p_i} (e^{p_i t} - 1). \quad (2.17)$$

Тому на підставі (2.12), (2.14), (2.17) перехідна характеристика записується у вигляді

$$\square(t) = \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{p_i} (e^{p_i t} - 1). \quad (2.18)$$

Слід зазначити, що похідна від перехідної характеристики визначає імпульсну:

$$k(t) = \frac{d}{dt} h(t). \quad (2.19)$$

Відповідно до результатів розрахунків на рис. 2.2, 2.4 передавальна функція ФНЧ третього порядку має вигляд:

$$K(p) = \frac{a_0}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3}. \quad (2.21)$$

Розкладання по (2.14) цієї передавальної функції на прості дроби:

$$K(p) = \frac{v_0}{p - \beta_0} + \frac{v_1}{p - \beta_1} + \frac{v_2}{p - \beta_2}, \quad (2.22)$$

$$\text{де } v_i = \frac{a_0}{\frac{d}{dp} B(p)}, p = \beta_i.$$

За (2.15), (2.16) складається на підставі (2.22) імпульсна функція:

$$k(t) = v_0 e^{\beta_0 t} + v_1 e^{\beta_1 t} + v_2 e^{\beta_2 t}. \quad (2.23)$$

Типовий графік імпульсної характеристики ФНЧ третього порядку показано на рис. 2.7.

За (2.17), (2.18) та (2.22) складається перехідна функція:

$$h(t) = \frac{v_0}{\beta_0} (e^{\beta_0 t} - 1) + \frac{v_1}{\beta_1} (e^{\beta_1 t} - 1) + \frac{v_2}{\beta_2} (e^{\beta_2 t} - 1). \quad (2.24)$$

Типовий графік перехідної характеристики ФНЧ третього порядку показано на рис. 2.8.

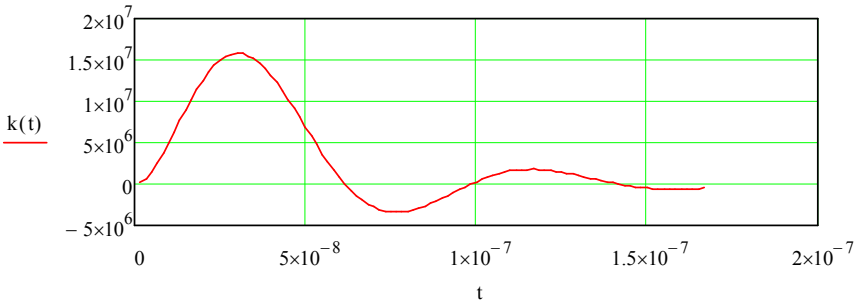


Рисунок 2.7 - Графік імпульсної характеристики ФНЧ третього порядку

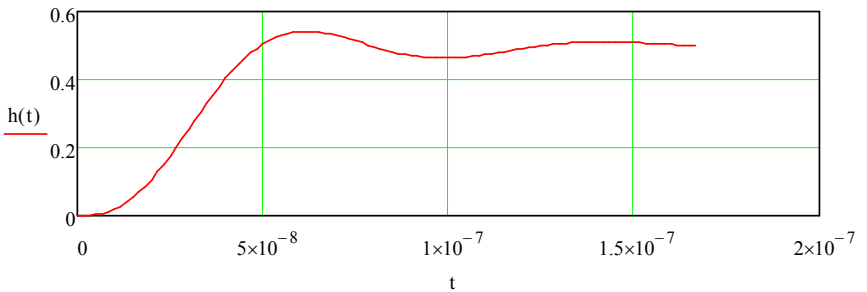


Рисунок 2.8 - Графік перехідної характеристики ФНЧ третього порядку

Відповідно до результатів розрахунків на рис. 2.3, 2.4 передавальна функція ФВЧ третього порядку має вигляд:

$$K(p) = \frac{a_3 p^3}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3}. \quad (2.25)$$

Для функцій такого виду, коли ступені поліномів чисельника та знаменника збігаються, рекомендується спочатку визначити перехідну характеристику

$$H(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{a_3 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3}, \quad (2.26)$$

і потім розкласти на прості дроби

$$H(p) = \frac{v_0}{p - \beta_0} + \frac{v_1}{p - \beta_1} + \frac{v_2}{p - \beta_2}, \quad (2.27)$$

де  $v_i = \frac{a_3 p^2}{\frac{d}{dp} B(p)}, p = \beta_i$ .

За (2.15) складемо перехідну характеристику  $h(t)$ , вона набуде вигляду, аналогічного (2.23). Продиференціювавши  $h(t)$ , отримаємо на підставі (2.19) імпульсну характеристику  $k(t)$ , її вигляд аналогічний (2.24).

На рис. 2.9, 2.10 наведено типові графіки перехідної та імпульсної характеристик ФВЧ третього порядку.

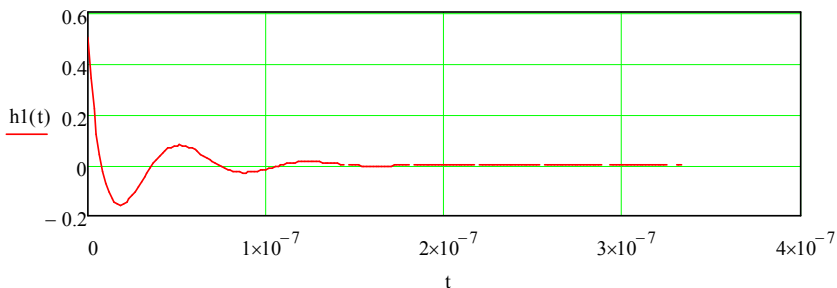


Рисунок 2.9 - Графік перехідної характеристики ФВЧ третього порядку

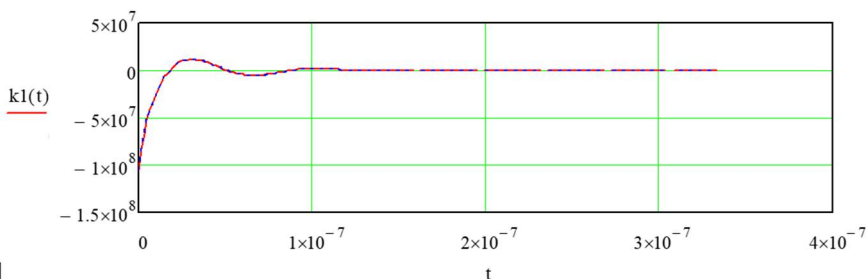


Рисунок 2.10 – Графік імпульсної характеристики ФВЧ третього порядку

Реакція кола на вхідний сигнал довільної форми може бути розрахована з (2.7). Зокрема, реакція кола на синусоїдальний вхідний сигнал обчислюється за формулою

$$u_2(t) = \int_0^t U_{1m} \sin(\omega_1 \tau) k(t - \tau) d\tau, \quad (2.20)$$

де  $U_{1m}$  - амплітуда вхідного коливання,  $\omega_1$  - його частота.

*Зауваження.* У стаціонарному режимі вихідний сигнал при вхідному синусоїдальному сигналі буде також синусоїдальним, причому його амплітуда і фаза при  $U_{1m} = 1$  В визначатимуться відповідними значеннями амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик на частоті  $\omega_1$ .

Розрахунок реакції фільтра на синусоїдальний сигнал виконується по (2.20) на заданій частоті  $F$  і амплітуді вхідних коливань  $U_{1m} = 1$  В.

На рис. 2.4 представлений типовий графік реакції, розрахований по (2.20) при частоті  $F=12$  МГц і  $U_{1m} = 1$  В.

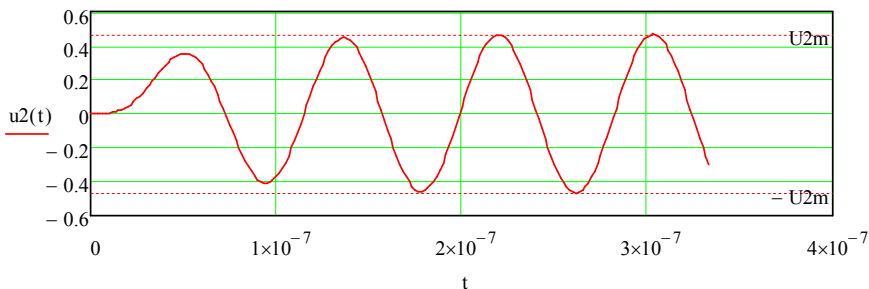


Рисунок 2.4 – Реакція ФНЧ на синусоїдальний сигнал із  
одиночною амплітудою

Як випливає з рисунка, перехідний процес закінчився приблизно за  $t_{nep}=4 T=3,32$  сек, де  $T=1/F=8,3 \cdot 10^{-8}$  сек період коливань, та розпочався стаціонарний режим. При  $U_{1m} = 1$  В амплітуда коливань  $U_{2m}$  у стаціонарному режимі повинна збігатися зі значенням АЧХ фільтра. З графіка АЧХ на рис. 2.1, а на частоті  $F=12$  МГц маємо  $U_{2m} = |K(j2\pi F)| = 0,467$ .

Аналогічно виконується розрахунок часових характеристик ФВЧ.

*Зауваження. Розрахунок часових характеристик для ФНЧ або ФВЧ та порівняння з АЧХ необхідно провести для трьох значень частот:  $F_n/2$ ,  $F_n$ ,  $2F_n$ , де  $F_n$  – гранична частота смуги пропускання.*

### 3 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТУВАННЯ ФІЛЬТРУ ТА ГРАФІК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Варіанти завдань наведено в табл. 3.1. У таблиці в колонці «Загасання  $A_3$  на частоті загородження  $F_3$  для обох видів апроксимації. Цифра в дужках відповідає загасанню  $A_n$ , яке визначається величиною осциляцій АЧХ при апроксимації за Чебишевим. У колонці "Граничні частоти, МГц" обидва значення частоти беруться для смугового фільтру (СФ) або загороджувального фільтру (ЗФ). Для фільтру нижніх частот (ФНЧ) береться перше значення, а для фільтру верхніх частот (ФВЧ) береться друге значення з вказаних частот.

Таблиця 3.1 - Варіанти завдань

Значення цифри	Порядкові номери останніх чотирьох цифр номеру студентського квитка				
	(n-3)-я	(n-2)-я	(n-1)-я		n-я
	Загасання $A_3$ , ( $A_n$ ), дБ	Вид апроксимації, структура фільтру	Граничні частоти, МГц		Тип фільтру
1	2	3	4		5
0	25 (0,5)	Баттерворту П-подібна	8,2	12,2	ФНЧ СФ
1	26 (0,5)	Чебишева П-подібна	8,4	12,4	ФВЧ СФ
2	27 (0,5)	Баттерворту Т-подібна	8,2	12,6	ФНЧ ЗФ
3	28 (0,5)	Чебишева Т-подібна	8,8	12,8	ФВЧ ЗФ
4	25 (0,6)	Баттерворту П-подібна	9,0	13,0	ФНЧ СФ

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4		5
5	26 (0,6)	Чебишева П-подібна	9,2	13,2	ФВЧ СФ
6	27 (0,6)	Баттерворту Т-подібна	9,4	12,4	ФНЧ ЗФ
7	28 (0,6)	Чебишева Т-подібна	9,6	12,6	ФВЧ ЗФ
8	27 (0,7)	Баттерворту П-подібна	9,8	12,8	ФНЧ СФ
9	28 (0,7)	Чебишева П-подібна	10,0	12,10	ФВЧ СФ

Додаткові дані: гранична частота смуги загородження  $F_3 = 3F_c$ ; опори генератора і навантаження  $R_r = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_n = 50 \text{ Ом}$ .

Вибір варіанту проводиться по чотирьох останніх цифрах номера студентського квитка. Наприклад, для 8-значного номеру квитка ( $n=8$ ) варіант визначається по 8-ій, 7-ій, 6-ій і 5-ій цифрам номеру. Данні беруться на перетині стовпця, який відповідає порядковому номеру цифри в номері квитка, і рядка, який відповідає значенню цифри. Наприклад, для номеру 23678924:  $n = 8 \rightarrow 4$  - "ФНЧ, СФ";  $(n - 1) = 7 \rightarrow 2$  - "8,6 12,6";  $(n - 2) = 6 \rightarrow 9$  - "Чебишева, П - подібна";  $(n - 3) = 5 \rightarrow 8$  - "27 (0,7)". Таким чином, потрібно спроектувати П - подібні ФНЧ і СФ з характеристикою Чебишева при загасанні  $A_3 = 27 \text{ дБ}$  на частоті загородження і загасання в смузі пропускання  $A_n = 0,7 \text{ дБ}$ . Граничні частоти смуги пропускання СФ 8,6 МГц і 12,6 МГц. Гранична частота смуги пропускання ФНЧ 8,6 МГц.

У курсовій роботі потрібно виконати розрахунок двох типів фільтрів: ФНЧ або ФВЧ і СФ або ЗФ. Етапи і графік виконання курсової роботи наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Етапи і графік виконання курсової роботи

Номер етапу	Найменування етапу	Вид звітності	Строк виконання
1	2	3	4
1	Ознайомлення із завданням, підбір літератури	Дані варіанту	1 тиж.
2	Визначення порядку фільтру і побудова графіку частотної залежності апроксимуючої функції	Порядок фільтру, графік АЧХ за потужністю	2 тиж.
3	Розрахунок полюсів апроксимуючої функції, складання передавальної функції за напругою, побудова графіку АЧХ	Передавальна функція, графік АЧХ за напругою	3 тиж.
4	Розрахунок g-параметрів НЧ фільтру-прототипу	Параметри фільтру-прототипу	4 тиж.
5	Визначення параметрів LC-елементів фільтрів заданого типу і заданої структури	Схеми і параметри елементів фільтрів	5 тиж.
6	Складання і вирішення системи рівнянь для схеми ФНЧ або ФВЧ, розрахунок АЧХ і ФЧХ	Графіки АЧХ і ФЧХ	6 тиж.
7	Складання і вирішення системи рівнянь для схеми СФ або ЗФ, розрахунок АЧХ і ФЧХ	Графіки АЧХ і ФЧХ	7 тиж.
8	Складання передавальної функції для ФНЧ або ФВЧ, визначення її полюсів, розрахунок АЧХ і ФЧХ	Передавальна функція, її полюси і графіки АЧХ і	8 тиж.

		ФЧХ	
--	--	-----	--

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4
9	Розрахунок перехідної та імпульсної характеристик ФНЧ та ФВЧ	Перехідна та імпульсна характеристик и	9 тиж.
10	Розрахунок реакції фільтра НЧ або ВЧ на синусоїдальний вплив з одиничною амплітудою для 3 значень частоти коливаний: $F_c/2, F_c, 2F_c$	Часові характеристик и	10 тиж.
11	Оформлення пояснювальної записки	Пояснювальна записка	11,12 тиж.
12	Захист курсової роботи		13,14 тиж.

Робота складається з двох частин. У першій частині проводиться і дослідження характеристик апроксимуючих функцій. У другій частині здійснюється частотний та часовий аналіз синтезованих фільтрів з перевіркою результатів синтезу.

В процесі аналізу за схемою фільтру розраховуються:

- ✓ амплітудно-частотна (АЧХ);
- ✓ передавальна функція  $K(p)$ ;
- ✓ полюси передавальної функції;
- ✓ перехідна і імпульсна характеристики;
- ✓ реакція на синусоїдальний сигнал з одиничною амплітудою та різною частотою коливаний.

Результати частотного аналізу і аналізу передавальних функцій повинні повністю співпасти з початковими даними і характеристиками, використаними в процесі синтезу. Результати розрахунку реакції фільтру на синусоїдальний сигнал повинні в

сталому режимі давати значення амплітуди коливань, які співпадають із значенням АЧХ на частоті коливань.

## 4 ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Пояснювальна записка (ПЗ) повинна оформлятися відповідно до зі стандартом ДСТУ 3008:2015 і містити вступну частину, основну частину та додатки.

Вступна частина містить такі структурні елементи:

- титульний лист;
- реферат;
- зміст;
- скорочення та умовні позначення.

Вимоги до елементів вступної частини – відповідні розділу 4 ДСТУ 3008:2015.

Технічне завдання. У технічному завданні повинні вказуватися:

- тема курсового проекту;
- вихідні дані;
- дата видачі завдання;
- дата захисту курсового проекту.

Наприкінці технічного завдання повинні бути проставлені підписи студента й керівника і дати підписання.

Реферат. Реферат має містити:

- відомості про обсяг звіту, кількість частин звіту, рисунків, таблиць, додатків, джерел згідно з переліком посилань (наводять усі відомості, зокрема дані додатків);
- перелік ключових слів;
- стислий опис тексту звіту.

Заголовком реферату повинне бути слово “РЕФЕРАТ”, яке поміщене в окремому рядку.

Перелік ключових слів, які є визначальними для розкриття суті звіту, має містити 5-15 слів (словосполучень). Рекомендовано подавати їх перед текстом реферату великими літерами в рядок із прямим порядком слів у називному відмінку однини, розташованих за абеткою мови звіту та розділених комами.

Опис тексту звіту в рефераті має відбивати подану у звіті інформацію в такій послідовності:

- об'єкт дослідження або розроблення;
- ціль роботи;

- методи дослідження й перелік апаратури;
- результати;

Обсяг реферату – не більше 500 слів.

Реферат виконується, як правило, на одній сторінці формату А4.

У «Змісті» наводять такі структурні елементи: «Скорочення та умовні позначки», «Передмова», «Вступ», послідовно перелічено назви всіх розділів, підрозділів і пунктів (якщо вони мають назву), «Висновки», «Перелік джерел посилання», «Додатки».

Основна частина ПЗ містить такі структурні елементи:

- вступ;
- змістову частину звіту;
- висновки;
- перелік джерел посилань

Подання структурних елементів основної частини звіту згідно з розділом 5 ДСТУ 3008:2015.

Вступ повинен коротко характеризувати сучасний стан проектування електричних фільтрів. Заголовком служить слово “ВСТУП”, написане на окремому рядку.

Частина, яка відповідає суті ПЗ повинна містити наступні розділи:

- синтез фільтрів;
- аналіз фільтрів.

Підрозділи повинні відповідати суті етапів виконання роботи.

Висновок повинен містити оцінку результатів проектування з погляду відповідності отриманих результатів вимогам завдання. Заголовком служить слово “ВИСНОВКИ”, що написане на окремому рядку.

Додатки розміщують після основної частини ПЗ. Вимоги до додатків – відповідно до розділу 6 ДСТУ 3008:2015.

Розділи повинні бути пронумеровані арабськими цифрами в межах всієї ПЗ. Структурні елементи “РЕФЕРАТ”, “ЗМІСТ”, “ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ”, “ВИСНОВКИ” та “ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ” не нумеруються як розділи. Після номера розділу крапка не ставиться.

Заголовки структурних елементів та розділів слід розташовувати посередині рядка і друкувати великими літерами без крапки в кінці, не підкреслюючи.

Інші правила оформлення – відповідно до ДСТУ 3008:2015.

Нумерація сторінок ПЗ повинна бути наскрізною. Першою сторінкою є титульний аркуш, але на ньому номер сторінки не вказують. На всіх наступних аркушах номер сторінки проставляють арабськими цифрами в правому верхньому куті.

Ілюстрації (креслення, малюнки, графіки, схеми, діаграми, фотознімки) слід розміщувати безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. На всі ілюстрації повинні бути посилання в тексті ПЗ.

Правила виконання ілюстрацій – відповідно до розділу 7 ДСТУ 3008:2015.

Правила виконання таблиць, переліків, приміток, виносок, формул та рівнянь, посилань – відповідно до розділу 7 ДСТУ 3008:2015.

Перелік джерел, на які є посилання в основній частині звіту, наводять у кінці тексту звіту перед додатками на наступній сторінці.

У переліку джерел посилання бібліографічні описи подають у порядку, за яким джерела вперше згадують у тексті. Порядкові номери бібліографічних описів у переліку джерел мають відповідати посиланням на них у тексті звіту (номерні посилання).

Бібліографічні описи посилань у переліку наводять відповідно до вимог стандарту ДСТУ 8302:2015.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Визначення і призначення електричних фільтрів.
2. Різновиди електричних фільтрів і їх частотні характеристики.
3. Визначення АЧХ, ФЧХ і робочого загасання фільтру.
4. Графічне представлення вимог на АЧХ ФНЧ.
5. Основні завдання синтезу фільтрів.
6. Передавальна функція за напругою, визначення, форма запису, полюси і нулі передавальної функції.
7. Вимоги, що накладаються на передавальну функцію відповідно з умовами фізичної реалізації.
8. Властивості передавальної функції за потужністю.
9. Метод переходу від передавальної функції за потужністю до передавальної функції за напругою.
10. Мінімально-фазові кола, визначення, приклад кола.
11. Функція Баттерворту, властивості, графік функції.
12. Частота зрізу, коефіцієнт передавання за потужністю і загасання на частоті зрізу для фільтру Баттерворту.
13. Методика розрахунку порядку фільтру Баттерворту.
14. Перехід від передавальної функції за потужністю до передавальної функції за напругою для фільтру Баттерворту, розташування полюсів на комплексній площині.
15. Чебишева характеристика фільтру, властивості, графік функції.
16. Поліноми Чебишева, властивості, рекурентна формула.
17. Частота зрізу, коефіцієнт передавання потужності і загасання на частоті зрізу для фільтру Чебишева.
18. Методика розрахунку порядку фільтру Чебишева.
19. Перехід від передавальної функції потужності до передавальної функції напруги для фільтру Чебишева, розташування полюсів на комплексній площині.
20. Формула перетворення комплексної частоти при переході від фільтру-прототипу до ФНЧ.
21. Формула перетворення комплексної частоти при переході від фільтру-прототипу до ФВЧ.

22. Формула перетворення комплексної частоти при переході від фільтру-прототипу до СФ.
23. Формула перетворення комплексної частоти при переході від фільтру-прототипу до ЗФ.
24. Намалюйте Т- і П-подібні схеми каскадів ФНЧ.
25. Намалюйте Т- і П-подібні схеми каскадів ФВЧ.
26. Намалюйте Т- і П-подібні схеми каскадів СФ.
27. Намалюйте Т- і П-подібні схеми каскадів ЗФ.
28. Приклад складання системи рівнянь фільтру по методу контурних струмів і знаходження комплексного коефіцієнта передавання.
29. Приклад складання системи рівнянь фільтру по методу вузлових потенціалів і знаходження комплексного коефіцієнта передавання.
30. Максимальний і нормований коефіцієнт передавання фільтру.
31. Вигляд АЧХ і ФЧХ для ФНЧ з характеристиками Баттерворту і Чебишева.
32. Вигляд АЧХ і ФЧХ для ФВЧ з характеристиками Баттерворту і Чебишева.
33. Вигляд АЧХ і ФЧХ для ПФ з характеристиками Баттерворту і Чебишева.
34. Вигляд АЧХ і ФЧХ для ЗФ з характеристиками Баттерворту і Чебишева.
35. Алгоритм складання передавальної функції фільтру методом Крамера сумісно з методом контурних струмів.
36. Алгоритм складання передавальної функції фільтру методом Крамера сумісно з методом вузлових потенціалів.
37. Алгоритм розрахунку за передавальною функцією фільтру його АЧХ, ФЧХ і координат полюсів передавальної функції.
38. Визначення перехідної і імпульсної характеристик.
39. Зображення за Лапасом функції одиничної і імпульсної функції.
40. Алгоритм розрахунку перехідної характеристики за передавальною функцією кола.
41. Алгоритм розрахунку імпульсної характеристики за передавальною функцією кола.
42. Інтеграл згортки. Розрахунок реакції кола на довільну дію.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Карпуков Л. М. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в електроніці: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 163 с.
2. Коваль Ю.О., Милютченко І.О., Олейніков А.М., Шокало В.М. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації: навч. підр. Ч. 1 / за заг. ред. В.М. Шокала. Харків: НТМТ, 2011. 544 с.
3. Бобало Ю.Я, Мандзій Б. А., Стахів П. Г., Писаренко Л. Д., Якименко Ю. І. Основи теорії електронних кіл: навч. підр. / за ред. П. Г. Стахіва. Львів: Магнолія, 2025. 296 с.
4. Кобяков О. М., Бражник І. Є. Теорія електричних кіл та сигналів. Основи розрахунку електричних кіл: конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2016. 168 с.
5. Теорія електричних і магнітних кіл: навч. підр. 2-ге вид., випр. та допов. / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с.
6. Косенков В.Д., Горошко А.В., Каштальян А.С., Бідюк В.Д. Теорія електричних кіл: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Хмельницький: ХНУ, 2024. 346 с.