

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_Ю.В. Грищенко  
«\_\_\_»\_\_\_\_\_2024 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Оптимізований фільтр низьких частот»

Виконавець: \_\_\_\_\_Кудіна Катерина Павлівна\_\_\_\_\_  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: \_\_\_\_\_д.т.н., проф., Сібрук Леонід Вікторович\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_В.В. Левківський\_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2024

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ю.В.Грищенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи (проекту)**

Кудіна Катерина Павлівна

1. Тема роботи: «Оптимізований фільтр низьких частот» затверджена наказом ректора від «13» 03 2024 р. № 355/ст.
2. Термін виконання роботи: з 22 травня 2024 по 14 червня 2024.
3. Вихідні дані роботи: дані про використання оптимізованого фільтра низьких частот у системах сучасного літака.
4. Зміст пояснювальної записки: аналітичний огляд літературних джерел з тематики кваліфікаційної роботи. Проведення порівняння між оптимізованими фільтрами низьких частот таких як: фільтра Баттерворта, фільтра Чебишева I роду, фільтра Чебишева II роду та еліптичного фільтра. Визначення їх переваг та недоліків. А також використання оптимізованого фільтра низьких частот у системах сучасного літака.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: таблиці, рисунки, діаграми, графіки.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Обґрунтування теми дипломної роботи		
2.	Проведення огляду літератури		
3.	Підготовка та написання 1 розділу		
4.	Підготовка та написання 2 розділу		
5.	Підготовка та написання 3 розділу		
6.	Перевірка на анти плагіат та отримання рецензії на диплом		
7.	Оформлення та друк пояснювальної записки		
8.	Підготовка презентації та доповіді		

7. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Сібрук Л.В.

(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Кудіна К.П.

(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Оптимізований фільтр низьких частот»: 48 сторінок, 16 рис., 7 літературних джерел.

**Об'єкт дослідження:** аналіз, розробка та оптимізація фільтру низьких частот який спеціалізується на передачі або підсиленні сигналів низьких частот у системах обробки сигналів.

**Предмет дослідження:** оптимізований фільтр низьких частот.

**Мета роботи:** дослідити покращення ефективності фільтрації, мінімізацію затримки сигналу та оптимізацію ресурсів.

**Методи дослідження:** використання елементів теорії статистики, порівняльний аналіз, обробка літературних джерел.

ФІЛЬТР НИЗЬКИХ ЧАСТОТ, СИСТЕМИ АВІОНІКИ, ПОРЯДОК ФІЛЬТРА,  
СИСТЕМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ, СІХ, НІХ

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 .....	10
ПОНЯТТЯ ФІЛЬТРУ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ.....	10
1.1 Визначення фільтру низьких частот.....	10
1.2 Типи фільтрів низьких частот .....	10
1.3 Частота зрізу.....	13
1.4 Частота дискретизації.....	13
1.5 Порядок фільтра .....	13
РОЗДІЛ 2 .....	16
КОНСТРУКЦІЇ СІХ-ФІЛЬТРА У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ.....	16
2.1 Специфікації конструкції FIR-фільтра.....	16
2.2 Оптимальні конструкції FIR з фіксованою шириною переходу та порядком фільтрів .....	17
2.3 Лінійно-фазові конструкції.....	17
2.4 Фільтри з рівною пульсацією .....	18
2.5 Фільтри найменших квадратів.....	19
2.6 Нелінійно-фазові конструкції .....	20
2.7 Мінімально-фазові конструкції .....	20
2.8 Оптимальні конструкції еквіриплі з фіксованою шириною переходу та піком пульсації смуги пропускання .....	21
2.9 Оптимальні конструкції еквіриплі з фіксованою піковою пульсацією та порядком фільтрів .....	22
2.10 Мінімально-фазові конструкції з фіксованими піковими пульсаціями та порядком фільтрів .....	22
2.11 Розширені алгоритми проектування – інтерпольованих СІХ-фільтрів ...	23
2.12 Розробка інтерполяційного фільтра .....	25
2.13 Розробка інтерполяційного СІХ-фільтра .....	25
РОЗДІЛ 3 .....	27
ОПТИМІЗОВАНИЙ ФІЛЬТР НИЗЬКИХ ЧАСТОТ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ .....	27
3.1 Поняття оптимізований фільтр низьких частот .....	27
3.2 Фільтр низьких частот Баттерворта .....	27

3.3 Фільтр низьких частот Чебишева I роду .....	28
3.4 Фільтр низьких частот Чебишева II роду.....	29
3.5 Еліптичний фільтр.....	30
3.6 Порівняння оптимізованих аналогових НІХ-фільтрів низьких частот .....	30
РОЗДІЛ 4 .....	34
ВИКОРИСТАННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО ФІЛЬТРУ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ У АВІОНІЦІ .....	34
4.1 ACARS .....	34
4.2 VOR/DME .....	35
4.3 Автопілот .....	37
4.4 Ethernet.....	38
4.5 GNSS .....	39
4.6 TCAS .....	41
4.7 ILS .....	42
4.8 FMS .....	43
ВИСНОВКИ .....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	49

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

<b>ФНЧ</b>	Фільтр низьких частот
<b>АЧХ</b>	Амплітудно-частотна характеристика
<b>ЛА</b>	Літальний апарат
<b>ПС</b>	Повітряне судно
<b>НІХ</b>	Нескінченна імпульсна характеристика
<b>СІХ</b>	Скінченна імпульсна характеристика

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Фільтри низьких частот є важливими компонентами в електронних схемах, призначених для вибіркового пропускання сигналів з частотами нижче певної граничної частоти, одночасно послаблюючи сигнали з частотами вище цієї граничної частоти. Розуміння функціональних можливостей, застосування та переваг фільтрів низьких частот має вирішальне значення для інженерів і дизайнерів, які працюють у різних сферах електроніки.

Фільтри низьких частот використовуються для видалення високочастотного шуму з сигналів зв'язку, забезпечуючи чітку та точну передачу голосу та даних між літальним апаратом і наземним керуванням або між різними частинами літака.

GPS та інші навігаційні системи використовують фільтри низьких частот для усунення високочастотних перешкод і шумів, які можуть вплинути на точність розрахунків позиції та швидкості.

У радіолокаційних системах фільтри низьких частот допомагають усунути високочастотний шум із отриманих сигналів, покращуючи виявлення та роздільну здатність цілей.

У системі автопілота фільтри низьких частот використовуються для згладжування вхідних даних датчиків (таких як гіроскопи та акселерометри), запобігаючи їх реакції на високочастотний шум і забезпечуючи плавне та стабільне керування польотом.

А також такі фільтри використовуються у реєстраторі польотних даних для того, щоб записані дані були вільними від високочастотного шуму, який інакше може приховати важливу інформацію про характеристики та умови польоту.

Вони є невід'ємною частиною забезпечення того, щоб системи авіоніки відповідали нормам електромагнітної сумісності, відфільтровуючи високочастотне випромінювання, яке може заважати іншим бортовим системам.

Перевагами фільтрів низьких частот є ефективне послаблення



високочастотного шуму та перешкод, чим підвищують якість обробки сигналу, а також обмежуючи смугу пропускання сигналів до частот, нижчих за частоту зрізу, вони допомагають підтримувати цілісність сигналу, зменшувати спотворення та запобігати ефекту накладення сигналів у цифрових системах.

У галузі, де безпека має першочергове значення, актуальність фільтрів низьких частот в авіоніці неможливо переоцінити. Оскільки авіація продовжує розвиватися, прогрес у конструкції та оптимізації фільтра низьких частот залишатиметься важливим для того щоб задовольняти постійно зростаючі вимоги до безпеки, ефективності та надійності бортових систем.

**Об'єкт дослідження:** аналіз, розробка та оптимізація фільтра низьких частот який спеціалізується на передачі або підсиленні сигналів низьких частот у системах обробки сигналів.

**Предмет дослідження:** оптимізований фільтр низьких частот

**Мета роботи:** дослідити покращення ефективності фільтрації, мінімізацію затримки сигналу та оптимізацію ресурсів.

**Методи дослідження:** використання елементів теорії статистики, порівняльний аналіз, обробка літературних джерел.

## РОЗДІЛ 1

### ПОНЯТТЯ ФІЛЬТРУ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

#### 1.1 Визначення фільтру низьких частот

Фільтри низьких частот мають широкий спектр застосувань в електроніці та авіації, оскільки вони дозволяють покращити якість сигналів, усунути перешкоди та забезпечити стабільну роботу різних систем.

Котушки та операційні підсилювачі відкривають можливості для створення складних схем, включаючи відомі частотні фільтри. Такі фільтри знаходять широке застосування в електроніці та авіації. Як видно з назви, фільтр є схемою, що включає ряд котушок, конденсаторів і навіть деякі операційні підсилювачі, призначену для пропускання лише певних частот. Іншими словами, з усього спектру доступних частот, вони будуть відфільтровувати одну або кілька частот, запобігаючи їх проходженню.

Загалом, фільтр низьких частот (ФНЧ) – це електронний пристрій, який пропускає сигнали з частотами нижче певної встановленої частоти так званої частоти зрізу і значно послаблює сигнали з частотами вище цієї частоти. Вони складаються з однієї або декількох котушок, які можуть бути з'єднані послідовно з джерелом живлення та навантаженням та одного або двох шунтуючих конденсаторів із джерелом живлення та навантаженням.

#### 1.2 Типи фільтрів низьких частот

За визначенням, фільтр низьких частот – це схема, яка забезпечує легкий перехід до низькочастотних сигналів і важкий перехід до високочастотних сигналів. Існує два основних типи схем, здатних досягти цієї мети, і багато варіацій кожного з них: індуктивний фільтр низьких частот (рис. 1) і ємнісний фільтр низьких частот (рис. 2).

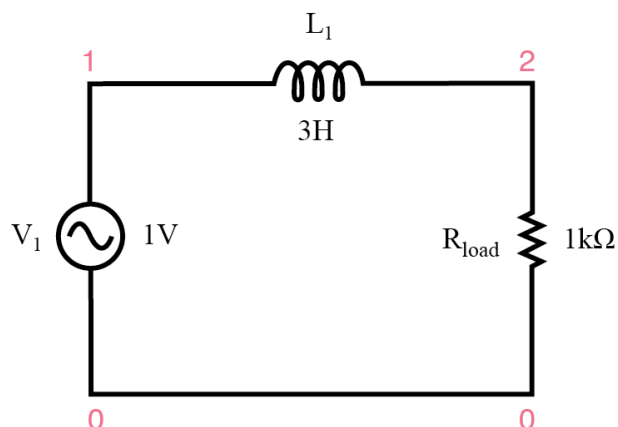


Рис. 1 Схема індуктивного фільтру низьких частот

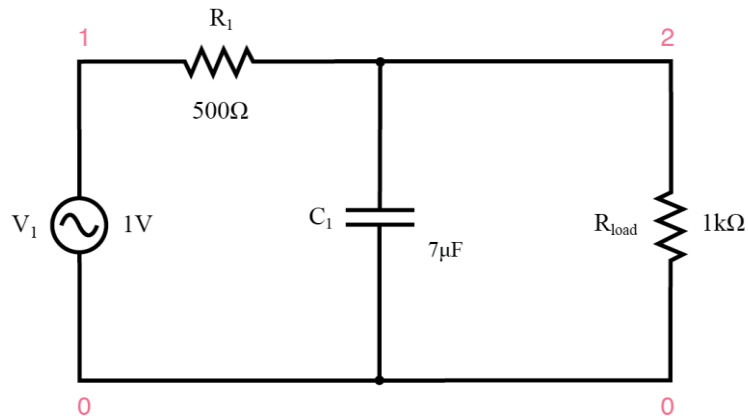


Рис. 2 Схема ємнісного фільтру низьких частот

Принцип роботи індуктивного фільтру низьких частот полягає у тому, що імпеданс індуктора зростає зі збільшенням частоти. Цей високий імпеданс послідовно блокує високочастотні сигнали від потрапляння до навантаження (рис. 3). На рисунку нижче можна побачити те, що відгук індуктивного фільтру низьких частот падає зі збільшенням частоти.

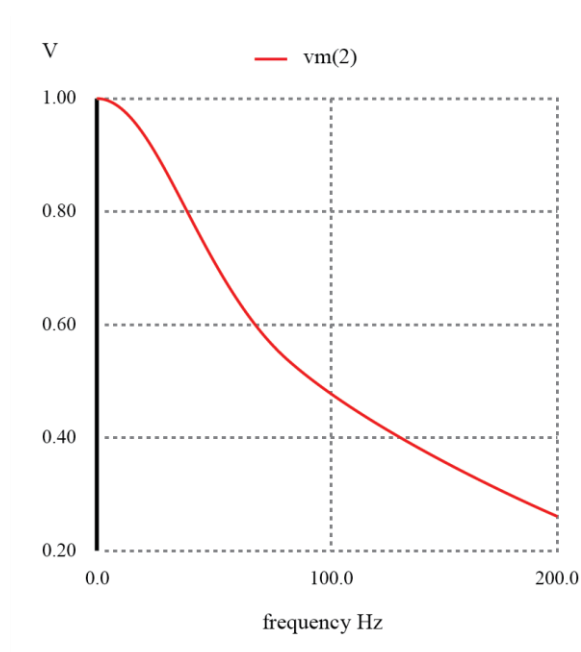


Рис. 3 Графік залежності індуктивного фільтру низьких частот

Принцип роботи ємнісного фільтру низьких частот заключається у зменшенні імпедансу конденсатора зі збільшенням частоти. Цей низький опір паралельно опору навантаження має тенденцію замикати високочастотні сигнали, знижуючи більшу частину напруги на послідовному резисторі R1 (рис.

2). На графіку залежності ємнісного фільтра низьких частот (рис. 4) показано те, що відгук ємнісного фільтра низьких частот падає зі збільшенням частоти.

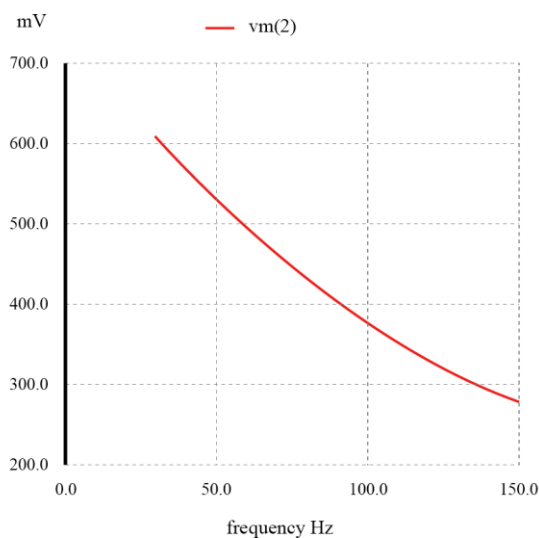


Рис. 4 Графік залежності ємнісного фільтра низьких частот

Однак, незважаючи на підвищену складність, конструкції ємнісних фільтрів, як правило, вони кращі, ніж індуктивні. Через те, що конденсатори вважають кращими реактивними компонентами, ніж котушки індуктивності, через те, що вони є більш передбачуваними у своїй поведінці. Під кращими, мається на увазі, що конденсатори виявляють незначні резистивні ефекти, ніж котушки індуктивності, що робить їх майже на 100% реактивними. А з іншого боку, котушки індуктивності зазвичай виявляють значні дисипативні (подібні до резистора) ефекти як у великій довжині дроту, який використовується для їх виготовлення, так і в магнітних втратах матеріалу сердечника.

Конденсатори також, як правило, менше беруть участь у ефектах «зв'язку» з іншими компонентами, ніж котушки індуктивності, і є менш дорогими. Однак індуктивному фільтру низьких частот часто віддають перевагу в джерелах живлення АС-DC, щоб відфільтрувати хвилю змінного струму, яка створюється, коли змінний струм перетворюється (випрямляється) на постійний, пропускаючи лише чисту компоненту постійного струму.

Основною причиною цього є вимога низького опору фільтра для виходу такого джерела живлення. Для ємнісного фільтра низьких частот потрібен додатковий опір послідовно з джерелом, тоді як для індуктивного фільтра низьких частот цього не потрібно.

Наприклад, у конструкції сильнострумного кола джерела живлення постійного струму, де додатковий послідовний опір небажаний, індуктивний фільтр низьких частот є кращим вибором. Але з іншого боку, якщо низька вага

та компактний розмір є більш пріоритетними, ніж низький внутрішній опір джерела живлення в конструкції джерела живлення, ємнісний фільтр низьких частот більше підходить.

### 1.3 Частота зрізу

У цифровій обробці сигналу частота зрізу фільтра з скінченною імпульсною характеристикою (СІХ) є критичним параметром, який визначає частоту, на якій фільтр починає послаблювати вхідний сигнал.

Частота зрізу  $f_c$  – це частота, на якій сигнал починає послаблюватися у фільтрі або системі. Це важливе поняття в області електроніки та сигналів, особливо при проектуванні фільтрів, підсилювачів та інших електронних пристроїв. Усі фільтри низьких частот мають певну частоту зрізу. Тобто частота, вище якої вихідна напруга падає нижче 70,7% вхідної напруги. Цей граничний відсоток 70,7% не є випадковим, хоча це може здатися таким на перший погляд.

У простому ємнісному фільтрі низьких частот частота зрізу задається як:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

### 1.4 Частота дискретизації

Частота дискретизації у фільтрах низьких частот відіграє ключову роль, оскільки вона визначає, з якою частотою вибірки сигнал обробляється фільтром. Тому для правильного проектування і застосування фільтра необхідне розуміння поняття частоти дискретизації.

Частота дискретизації  $f_s$  – це частота, з якою аналоговий сигнал перетворюється на цифровий. Вона вимірюється у герцах (Гц) і визначає кількість вибірок за секунду. Правильний вибір частоти дискретизації важливий для запобігання накладенню спектрів та точного подання сигналу.

### 1.5 Порядок фільтра

Порядок фільтра – це число відліків, які використовуються для обчислення поточного значення вихідного сигналу на основі вхідних даних та попередніх значень вихідного сигналу. Порядок фільтра може суттєво впливати на його частотні характеристики, включаючи смугу пропускання, крутість перехідної характеристики та поведінку у смузі придушення.

Якщо об'єднати схему підсилювача, що інвертує, зі схемою інтегратора, утворюється схема фільтра нижніх частот першого порядку (рис. 5). Такий фільтр є інвертуючим підсилювачем, що володіє постійним коефіцієнтом посилення в смузі прозорості від постійного струму до граничної частоти.

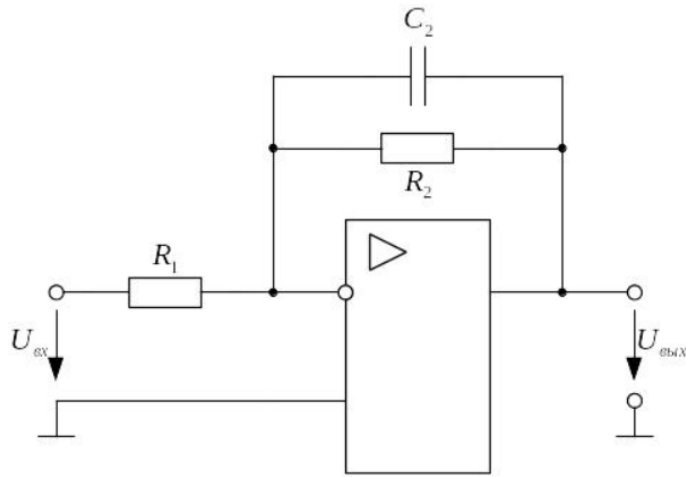


Рис. 5 ФНЧ першого порядку

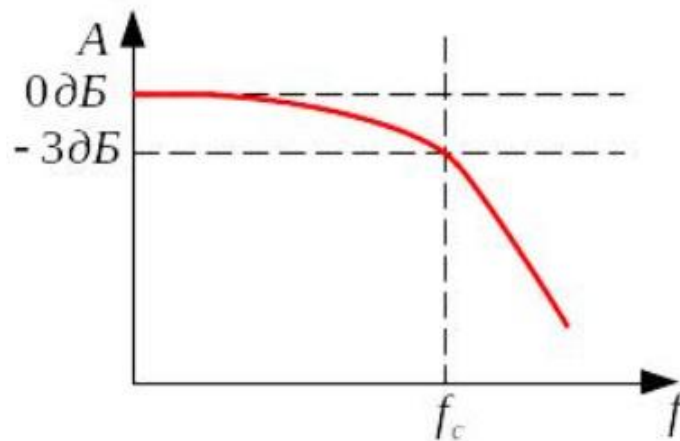


Рис. 6 АЧХ ФНЧ першого порядку

Такий фільтр є інвертуючим підсилювачем, який має постійний коефіцієнт підсилення в смузі пропускання від постійного струму до граничної частоти  $f_{cp}$ . Частотну характеристику цього фільтра можна охарактеризувати формулою:

$$0 \leq f \leq f_{cp}$$

В межах смуги пропускання, коли ємнісний опір конденсатора досить великий, коефіцієнт підсилення схеми відповідає коефіцієнту підсилення інвертуючого підсилювача.

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Частота зрізу такого ФНЧ визначається елементами ланцюга зворотного зв'язку розраховується відповідно до виразу:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

У смузі згасання вище частоти зрізу  $f_{cp}$ , підсилення зменшується з інтенсивністю 20 дБ/декада (або 6 дБ/октава). Це означає, що коефіцієнт підсилення за напругою зменшується у 10 разів при збільшенні частоти також у 10 разів, або зменшується вдвічі при кожному подвоєнні частоти.

Коефіцієнт підсилення фільтра нижніх частот другого порядку (рис.7) такий самий, як у фільтра першого порядку, тому що сумарний опір резисторів у ланцюзі інверсного входу залишається незмінним згідно з формулою:

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Однак АЧХ цього фільтра відрізняється підвищеною крутістю нахилу, яка становить 12 дБ/октава. Таким чином, у смузі згасання зі збільшенням частоти вдвічі напруга сигналу на виході фільтра зменшується вчетверо.

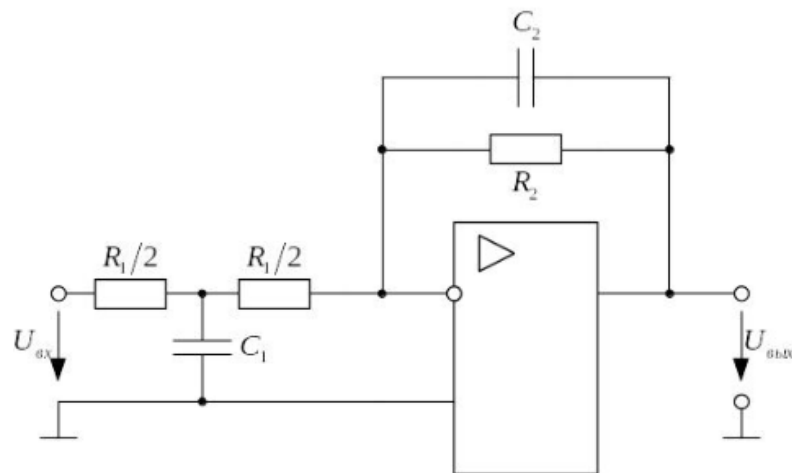


Рис. 7 ФНЧ другого порядку

## РОЗДІЛ 2

### КОНСТРУКЦІЇ СІХ-ФІЛЬТРА У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

#### 2.1 Специфікації конструкції FIR-фільтра

І смуга пропускання, і перехід ширини небажані, але неминучі відхилення у оптимізованому фільтрі низьких частот при апроксимації із кінцевою імпульсною характеристикою. Практичні конструкції FIR-фільтра зазвичай складаються з фільтрів, які відповідають певним специфікаціям конструкції, тобто мають ширину переходу та максимальну пульсації смуги пропускання, які не перевищують допустимі значення.

Крім того, необхідно вибрати порядок фільтра або довжину усіченої імпульсної характеристики. Дизайн у FIR-фільтра полягає в тому, щоб розглядати кожну специфікацію як один із кутів у трикутнику, як на рисунку 8. Така метафора використовується для розуміння ступенів доступу свободи при призначенні проектних специфікацій.

Оскільки сума кутів фіксована, можна щонайбільше вибрати значення двох специфікацій. Третя специфікація буде визначена алгоритмом проектування використання. Крім того, як і з кутами в трикутнику, якщо ми зробимо одну зі специфікацій більше чи менше, це вплине на одну або обидві інші специфікації.



Рис. 8 Специфікації конструкції FIR, які представлені у вигляді трикутника



## 2.2 Оптимальні конструкції FIR з фіксованою шириною переходу та порядком фільтрів

Хоча алгоритм розробки імпульсної характеристики з усіченим вікном є дуже простим і надійним, він не є оптимальним у будь-якому сенсі. Конструкції, які він створює, загалом гірші за ті, що створюються алгоритмами, які використовують деякі критерії оптимізації в тому, що він матиме більший порядок, більшу ширину переходу або більшу смугу пропускання/смугу зупинки брижі. Будь-яке з цього зазвичай небажано на практиці, тому стають у нагоді більш складні алгоритми.

Оптимальні проекти обчислюються шляхом мінімізації деяких вимірювання відхилення між проєктованим фільтром і ідеальний фільтр. Найбільш поширена оптимальна конструкція FIR - це алгоритм заснований на фіксації ширини переходу і порядку фільтра. Відхилення від ідеальної реакції вимірюється лише пульсаціями смуги пропускання. Це відхилення або помилку можна виразити математично як

$$E_W = H_a(\omega) - H_{LP}(e^{j\omega}), \omega \in \Omega,$$

де  $H_a(\omega)$  – нуль-фазова характеристика проєктованого фільтра,  $\Omega = [0, \omega_p] \cup [\omega_s, \pi]$ .

Все ще необхідно визначити міру для визначення «розміру»  $E(\omega)$  – величини, яку ми хочемо мінімізувати в результаті оптимізації. Щоб врахувати різні пікові пульсації в смузі пропускання та смузі зупинки, функція  $W(\omega)$  зазвичай представлений,

$$E_W = W(\omega)[H_a(\omega) - H_{LP}(e^{j\omega})], \omega \in \Omega,$$

### 2.3 Лінійно-фазові конструкції

Фільтр з лінійною фазовою характеристикою є бажаним у багатьох програмах, зокрема обробка зображень і передача даних. Однією з бажаних характеристик FIR-фільтрів є що їх можна дуже легко розробити, щоб мати лінійну фазу. Добре відомо, що СІХ-фільтри з лінійною фазою матимуть імпульсні реакції, які є або симетричними, або антисиметричними. Для цих типів фільтрів нульова фаза характеристики можна визначити аналітично, а конструкція фільтра стає проблемою математичної апроксимації. Алгоритм вирішення проблеми:

- визначити найкраще наближення до заданої функції;
- визначити ідеальну частоту фільтра низьких частот за допомогою полінома.

Під «найкращим» мається на увазі єдиний що мінімізує різницю між ними –  $E_w(\omega)$  – відповідно до заданої міри. У MATLAB функція `remez` реалізує алгоритм, який обчислює рішення задачі проектування для лінійно-фазових СІХ-фільтрів у випадку  $L_\infty$ -norm.

Проблема розробки полягає в тому, щоб знайти фільтр, який мінімізує максимальну похибку між ідеальним і фактичним фільтрами. Цей тип конструкції призводить до застосування так званих фільтрів з рівною пульсацією, тобто фільтри, у яких пікові відхилення від ідеального відгуку рівні.

У MATLAB функція `firls` реалізує алгоритм для обчислення рішення для лінійно-фазових FIR-фільтрів у  $L_2$ -norm справа. Проблема розробки полягає в тому, щоб знайти фільтр, який мінімізує помилки між ідеальним і фактичним фільтрами.

#### 2.4 Фільтри з рівною пульсацією

Лінійно-фазові фільтри з рівною пульсацією є бажаними, оскільки вони мають найменше максимальне відхилення від ідеального фільтра в порівнянні з усіма іншими лінійно-фазовими FIR-фільтрами того ж порядку. Фільтри з рівною пульсацією ідеально підходять для застосувань, у яких необхідно дотримуватися певного допуску. Наприклад, якщо необхідно спроектувати фільтр із заданим мінімальним загасання в смузі пропускання або заданою максимальною пульсацією в смузі пропускання.

Наприклад, фільтри з рівною пульсацією (з фіксованою шириною переходу) 42-го порядку може бути розроблений у MATLAB таким чином:

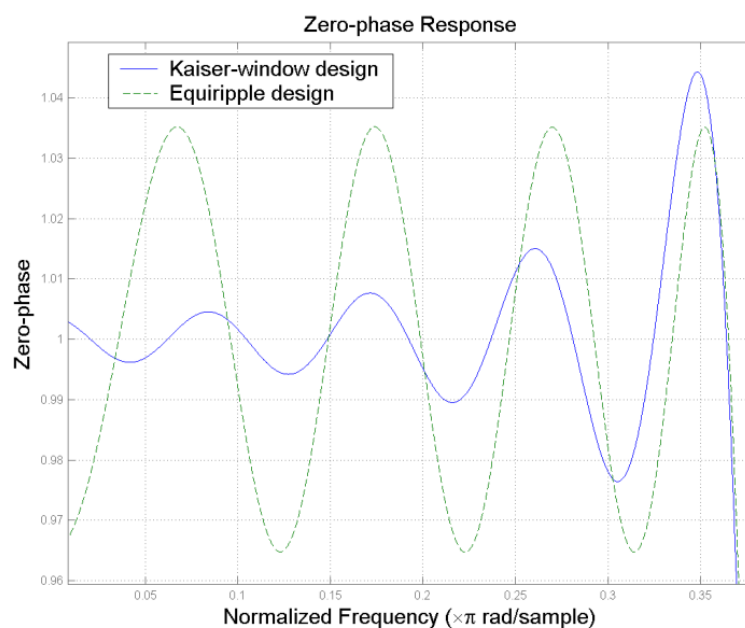


Рис. 9 Пульсація смуги пропускання як для FIR-фільтра, розробленого з вікном Кайзера, так і для FIR-фільтра, розробленого функцією `remez`.

На рисунку 9 показано суперпозицію деталей смуги пропускання для фільтрів, розроблених з вікном Кайзера та з функцією `remez`:

```
br = remez(42,[0 0.37 0.43 1],[1 1 0 0]);
```

Однозначно максимальне відхилення менше для дизайну `remez`. Фактично, так як фільтр призначений для мінімізації максимальної пульсації (мінімаксна конструкція), жодна інша лінійна фаза FIR-фільтра 42-го порядку матиме меншу пікову пульсацію для однакової ширини переходу.

## 2.5 Фільтри найменших квадратів

Якщо є завдання мінімізувати помилку (між ідеальним і фактичним фільтром) у смузі пропускання, використання фільтру з рівною пульсацією є недоцільним. Для такого варіанту задачі більше підходять фільтри найменших квадратів. За допомогою них можна якомога більше зменшити енергію сигналу в певному частотному діапазоні, це називається методом найменших квадратів.

Наприклад, для однакової ширини переходу і порядку фільтра як фільтра з рівною пульсацією, так і можна обчислити FIR-схему методом найменших квадратів:

```
bfs = firfs(42,[0 0.37 0.43 1],[1 1 0 0]);
```

Енергія зони зупинки для цього випадку визначається як:

$$E_{sb} = \frac{1}{2\pi} \int_{0.43}^{\pi} |H_a(e^{j\omega})|^2 d\omega,$$

де  $H_a(e^{j\omega})$  – частотна характеристика фільтра.

У цьому випадку енергія смуги зупинки для фільтра з рівною пульсацією становить приблизно  $1,7608e-004$ , тоді як енергія смуги зупинки для фільтра найменших квадратів дорівнює  $3.3106e-005$ .

Отже, хоча конструкція фільтра з рівною пульсацією має меншу пікову похибку, вона має більшу «загальну» похибку, виміряну в термінах його енергії. Деталі смуги зупинки як для оптимізованого фільтра з рівною пульсацією, так і для оптимізованого фільтра найменших квадратів показані на рисунку 10.

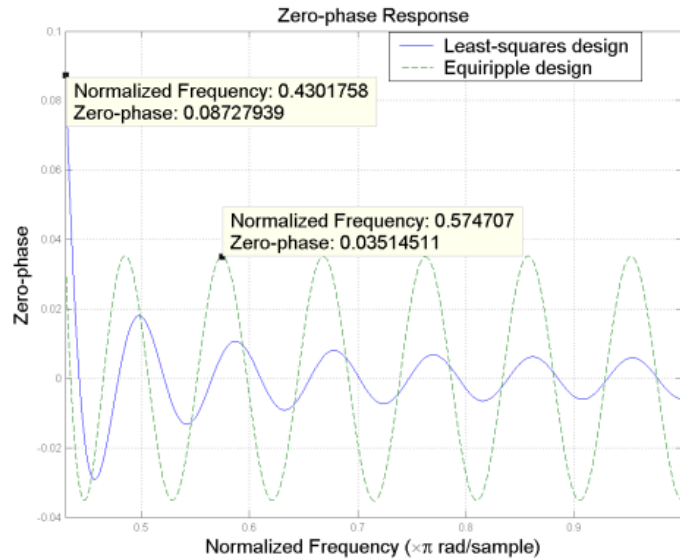


Рис. 10 Порівняння оптимізованого фільтра з рівною пульсацією та оптимізованого фільтра найменших квадратів

### 2.6 Нелінійно-фазові конструкції

Однією з переваг FIR-фільтрів у порівнянні з БІХ-фільтрами – це здатність досягати точної лінійної фази в прямолінійний спосіб. Як ми вже згадували, лінійно-фазова характеристика передбачає властивість симетрії або антисиметрії для коефіцієнтів фільтра. Тим не менш, ця симетрія коефіцієнтів обмежує можливі конструкції, які є досяжними. Це має бути очевидним оскільки для фільтра з  $N + 1$  коефіцієнтами, тільки  $N/2 + 1$  з цих коефіцієнтів можна вільно призначати. Решта коефіцієнтів  $N/2$  відразу визначається лінійно-фазовим обмеженням.

### 2.7 Мінімально-фазові конструкції

Якщо можна послабити обмеження лінійної фази (тобто якщо застосування, яке не вимагає лінійно-фазової характеристики), можна розробити рівнохвильові фільтри з мінімальною фазою, які перевершують оптимальні рівнохвильові лінійно-фазові конструкції на основі техніки.

Наприклад, наступна схема мінімальної фази має як менші пікові пульсації в смузі пропускання, так і менші пікові пульсації в смузі затримки, ніж лінійно-фазова еквіриплідна, конструкція буде виглядати таким чином:

$$bm = gmez(42,[0 0.37 0.43 1],... [1 1 0 0],[1 10], 'minphase');$$

Важливо зазначити, що це не зовсім необмежений дизайн. Вимога мінімальної фази обмежує результуючий фільтр, щоб усі його нулі були на або всередині одиничне коло.

## 2.8 Оптимальні конструкції еквіриплі з фіксованою шириною переходу та піком пульсації смуги пропускання

Оптимальні конструкції еквіриплів перевершують конструкції вікон Кайзера для того самого порядку та ширини переходу. Відмінності ще більш помітні через те, що характеристики пульсацій смуги пропускання та смуги зупинки відрізняються. Причина полягає в тому, що методи скороченої та віконної імпульсної характеристики завжди дають результат з приблизно однаковою смугою пропускання та піком смуги зупинки.

Таким чином, завжди виконується більш суворе обмеження пікових пульсацій, що призводить до перевищення всіх інших обмежень пульсації за рахунок невиправдано великих порядків фільтрів.

Щоб проілюструвати це, ми звернемося до іншого дизайну рівних пульсацій, у якому як пік пульсацій, так і перехід ширина фіксована. Повертаючись до трикутника на рисунку 8, можна зрозуміти, що результуючий порядок фільтрів буде надходити з алгоритму проектування. Функція `gremez` може бути використана для розробки такого фільтра:

```
b = gremez('minorder',[0 .3 .45 1],...  
[1 1 0 0],[.008 .0009]);
```

В результаті фільтр 37-го порядку. Для порівняння, дизайн вікна Кайзера вимагає фільтра 50-го порядку, щоб відповідати тим самим специфікаціям. Смугою пропускання деталі можна побачити на рисунку 11. Очевидно, що конструкція Кайзер-вікон істотно перевищує вимоги.

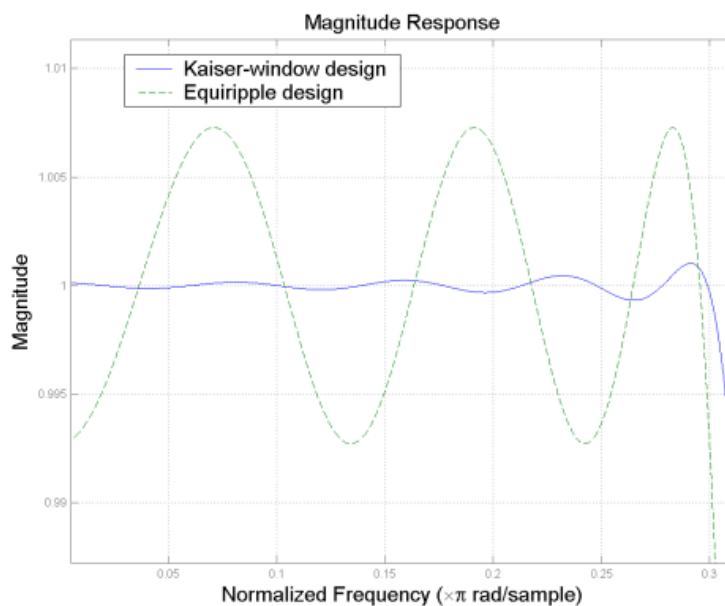


Рис. 11 Деталі пульсації смуги пропускання для FIR-фільтра Kaiser-window і FIR-фільтра `remez`

## 2.9 Оптимальні конструкції еквіриплі з фіксованою піковою пульсацією та порядком фільтрів

Взагалі до цього були описані дизайни еквіриплі з фіксованою шириною переходу та фіксованим порядком і конструкції з фіксованою шириною переходу та фіксованими піковими значеннями пульсації. Фільтр Design Toolbox також надає алгоритми для дизайнів з фіксованими піковими значеннями пульсацій і фіксованим порядком фільтрів. Це дає максимальну гнучкість у використанні ступенів свободи, доступних для розробки FIR-фільтра.

Порівнюючи з вікном Кайзера, конструкції, які фіксують ширину переходу та результати порядку фільтрів в оптимальній еквіриплі конструкції з меншою піковою пульсацією значення, фіксуючи ширину переходу та пікову пульсацію значення призводить до фільтра з меншою кількістю кранів. Тобто, фіксуючи порядок фільтрів і пікові значення пульсацій має призвести до меншої ширини переходу. Щоб перевірити це, ми використовуємо функцію `firseqrip`:

```
bc = firseqrip(50,0.375,[0.008 0.0009]);
```

Порівняння цього нового дизайну з дизайном вікна Кайзера показано на рисунку 12. Перехід ширини було зменшено з  $0,15\pi$  до приблизно  $0,11\pi$ .

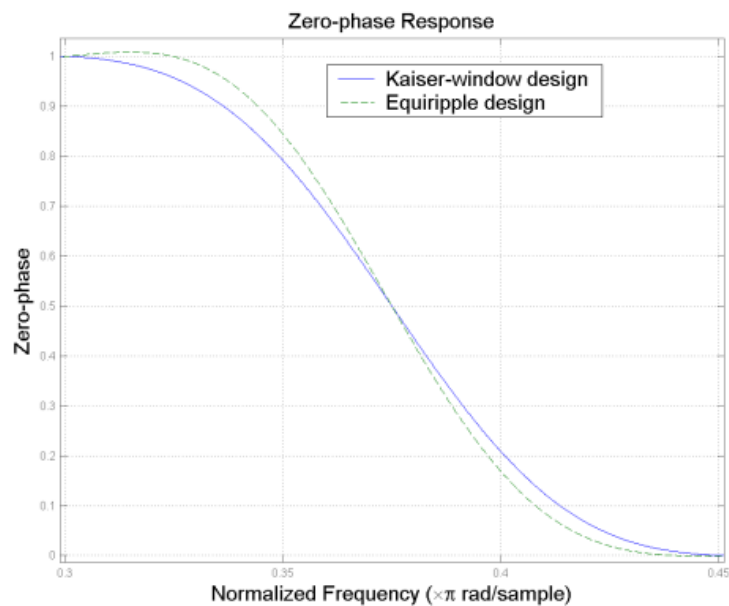


Рис. 12 Порівняння СІХ-фільтра з вікном Кайзера та оптимального фільтра з рівною пульсацією СІХ-фільтра того самого порядку та пікові значення пульсації

## 2.10 Мініально-фазові конструкції з фіксованими піковими пульсаціями та порядком фільтрів

Знову ж таки, якщо лінійна фаза не є обов'язковою, мініально-фазовий фільтр може бути розроблений, що є краще в деякому сенсі до порівнянного лінійно-фазового фільтра. Тоді в цьому випадку для того самого порядку

фільтрів і пікового значення пульсації, конструкція з мінімальною фазою призводить до меншого переходу ширини, ніж лінійно-фазова конструкція.

Наприклад, порівняно з лінійно-фазовою конструкцією 50-го порядку дизайн  $b_{cm}$ , наступний дизайн має помітно менший розмір ширини переходу:

$$b_{cm} = \text{firceqrip}(50, 0.375, [0.008 \ 0.0009], 'min');$$

### 2.11 Розширені алгоритми проектування – інтерпольованих СІХ-фільтрів

Для будь-якого заданого алгоритму проектування СІХ, якщо пік пульсації специфікації залишається незмінним, то необхідний порядок фільтрів у відповідність заданому набору специфікацій обернено пропорційна допустима ширина переходу. Коли ширина переходу невелика, як, наприклад, у Specifications Set 3, необхідний порядок фільтрів може бути досить великим. Це один з основних недоліків СІХ-фільтрів.

Відомо, що послаблення вимог лінійної фази призводить до значної економії кількості коефіцієнти фільтра. Так званий інтерпольований СІХ підхід дає лінійно-фазові СІХ-фільтри, які можуть відповідати заданій специфікації зі зменшеною кількістю множників. Ідея досить проста, оскільки довжина фільтра зростає, коли ширина переходу зменшується, ми не проектуємо фільтр для заданої (малої) ширини переходу. Натомість ми створюємо фільтр для кратної  $L$  ширини переходу. Цей фільтр матиме значно меншу довжину, ніж прямий дизайн для вихідної (малої) ширини переходу. Потім, ми підвищуємо дискретизацію імпульсної характеристики на коефіцієнт, рівний кратний ширині переходу  $L$ .

Збільшення дискретизації спричинить розроблений фільтр для стиснення, відповідаючи оригінальним специфікаціям без введення додаткових множників (він лише вводить нулі, що призводить до більшої затримки). Поява спектральних копій бажаного у відповідь фільтра в межах інтервалу Найквіста. Ці похибки мають бути видалено другим фільтром, який каскадується з оригіналом для отримання бажаного.

Хоча цей додатковий фільтр вводить додаткові множників, у багатьох випадках можливо мати загальну економію обчислювальних засобів порівняно зі звичайними конструкціями.

Ідея зображена на прикладі на рисунку 13 для випадок коефіцієнта підвищення дискретизації 3. Такий дизайн становить приблизно одну третину довжини бажаного дизайну, якщо останній буде розроблений безпосередньо. Дизайн із підвищеною дискретизацією має таку ж ширину переходу, як і бажаний дизайн. Залишилося лише видалити спектральну репліку, яка вводиться шляхом підвищення дискретизації.

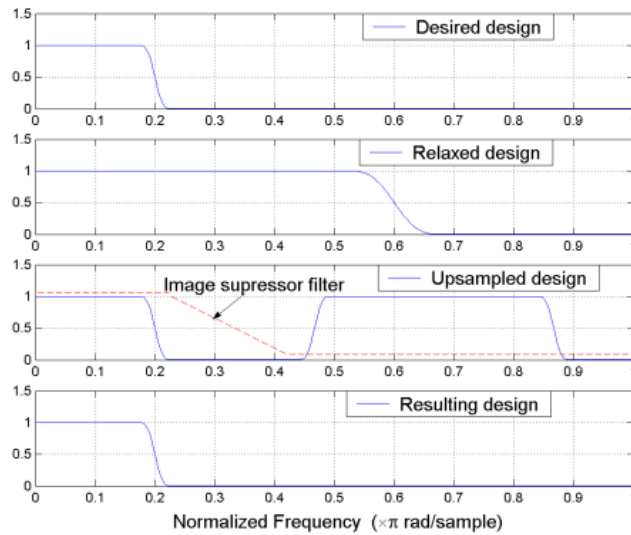


Рис. 13 Ілюстрація парадигми проектування IFIR

Як приклад економії обчислювальних витрат ще раз розглянемо набір специфікацій конструкції 3. Кількість множників, необхідних для однієї лінійно-фазової конструкції було 263. Дизайн IFIR може досягти тих самих характеристик, що й 127 множників при використанні коефіцієнта підвищення дискретизації 6:

```
[bup,bimg]=ifir(6,'low',[.12 .14],[.01 .001]);
```

Відгук фільтра з підвищеною дискретизацією та фільтра придушення зображення показано на рисунку 14. Отже, порівняння з єдиною лінійно-фазною еквіріплійною конструкцією показано на рисунку 15.

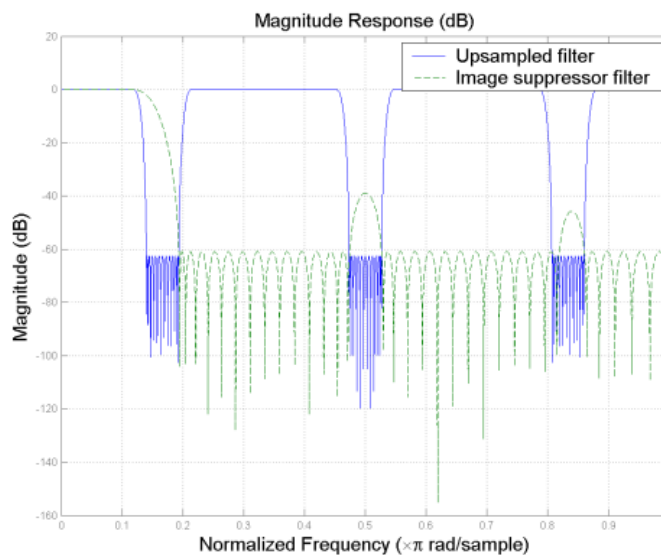


Рис. 14 Амплітудна характеристика фільтра з підвищеною дискретизацією та фільтра придушення зображення в конструкції IFIR



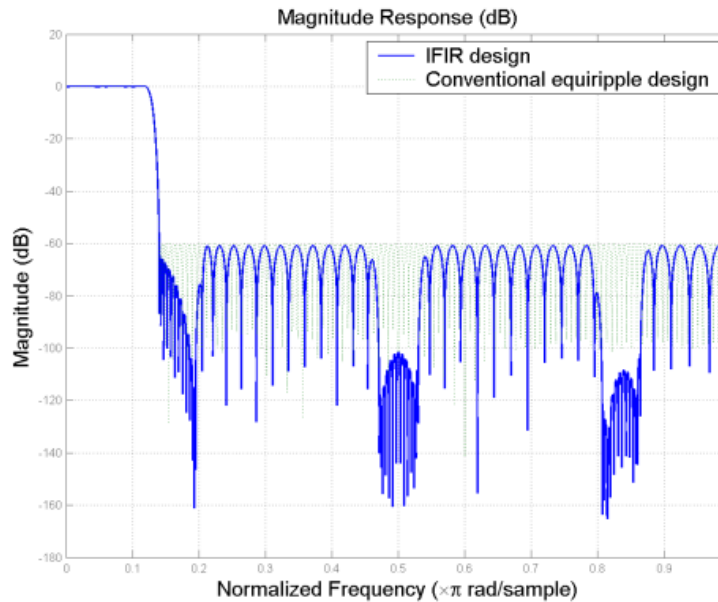


Рис. 15 Загальна амплітудна характеристика конструкції IFIR і звичайна конструкція еквіліпрі

### 2.12 Розробка інтерполяційного фільтра

У контексті багатошвидкісної обробки сигналу інтерполяція зазвичай відноситься до інтерполяції з обмеженою смугою. Інтерполяція з обмеженою смугою частот базується на понятті основного сигналу з обмеженою смугою безперервного часу, який дискретизується. Ідеальною інтерполяцією з обмеженою смугою буде цифровий сигнал та створений інтерпольований сигнал, який буде ідентичний сигналу, який буде отримано шляхом вибірки базового сигналу безперервного часу. Ідеальна інтерполяція з обмеженою смугою може бути виконана за допомогою підвищення дискретизації та використання ідеального фільтра низьких частот. Особливо цікавою є інтерпретація у часовій області ідеального інтерполятора, який природним чином призводить до багатофазності реалізації.

### 2.13 Розробка інтерполяційного СІХ-фільтра

Тоді як інтерполяційні фільтри – це просто фільтри низьких частот, які можуть бути розроблені за допомогою різних методів, описаних раніше, поліфазні фільтри, які складають ідеальний інтерполяційний фільтр, дають деяке уявлення про те, як має виглядати для проектування інтерполяційних фільтрів. Розглянемо інтерполяцію на коефіцієнт  $L$ . Ідеал  $L$  багатофазні фільтри матимуть групову затримку, задану таким чином:

$$-\frac{k}{L}, k = 0, \dots, L - 1$$

Для простоти розглянемо СІХ наближення до ідеального інтерполяційного фільтра, де порядок має форму  $N = 2LM$ . Тоді кожен багатофазний фільтр матиме порядок  $N/L = 2M$ . Зауважте, що ідеальний інтерполяційний фільтр є нескінченним. Після скорочення кінцевої довжини можливо зробити наближення затримки наполовину порядку фільтрів,  $N/2$ .

Однак те, що можна реалізувати в ефективній багатофазній формі можемо зробити кожний багатофазний причинний компонент шляхом затримки його на  $M$  вибірок. Затримка буде означати введення фазової складової у відповідь кожної поліфазної складової. Таким чином, замість наближення ідеального дробового випередження  $e^{j\omega\left(\frac{k}{L}-M\right)}$  поліфазні компоненти будуть наближені  $e^{j\omega\left(\frac{k}{L}-M\right)}$ . Групова затримка, отже, буде мати форму:

$$-\frac{d\varphi(\omega)}{d(\omega)} = -\frac{d\omega\left(\frac{k}{L}-M\right)}{d\omega} = M - \frac{k}{L}$$

Проблема, яка виникає, полягає в тому, що навіть незважаючи на те, що наближення ідеального інтерполяційного фільтра є симетричним і, таким чином, має лінійну фазу, багатофазні компоненти є не обов'язково симетричним і тому не обов'язково буде мати точну лінійну фазу. Однак для кожного несиметричного поліфазного фільтра існує дзеркальний багатофазний фільтр, який матиме таку саму амплітудну характеристику із дзеркальною груповою затримкою, яка компенсує будь-яку фазові спотворення.

## ОПТИМІЗОВАНИЙ ФІЛЬТР НИЗЬКИХ ЧАСТОТ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

## 3.1 Поняття оптимізованого фільтра низьких частот

Фільтри низьких частот є важливими компонентами в обробці сигналів, призначеними для проходження низькочастотних сигналів, одночасно послаблюючи високочастотні компоненти. Оптимізація цих фільтрів має вирішальне значення для досягнення конкретних цілей продуктивності в різних додатках, таких як обробка аудіо, комунікації та прилади. У цій статті досліджуються принципи оптимізованих фільтрів низьких частот, їх типи та застосування. Оптимізація фільтрів низьких частот включає в себе тонке налаштування їх конструкції для задоволення конкретних вимог, таких як частота зрізу, пульсація, крутизна смуги переходу та фазові характеристики.

Основними критеріями оптимізації вважаються: частота зрізу, пульсація смуги пропускання, затухання в смузі зупинки, перехідна смуга та фазова характеристика. Частота зрізу – це частота, на якій фільтр починає послаблювати вхідний сигнал. Пульсація смуги пропускання – це коливання амплітуди в смузі пропускання, які слід мінімізувати для більшості застосувань. Затухання в смузі зупинки – це величина ослаблення, застосована до частот вище граничної частоти. Перехідна смуга – це частотний діапазон, у якому фільтр переходить від смуги пропускання до смуги зупинки. Фазова характеристика – це залежність фази вихідного сигналу фільтра від частоти вхідного сигналу.

## 3.2 Фільтр низьких частот Баттерворта

Фільтр низьких частот Баттерворта є фундаментальним компонентом обробки сигналів, відомий своєю максимально плоскою частотною характеристикою в смузі пропускання та плавними характеристиками спаду в смузі зупинки. Фільтр Баттерворта належить до сімейства фільтрів із нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ), що характеризується максимально плоскою амплітудною характеристикою в смузі пропускання та поступовим спадом у смузі зупинки. Передатна функція фільтра в безперервній області часу визначається поліномом Баттерворта:

$$H(s) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^{2N}}}$$

де  $s$  – змінна Лапласа,  $\omega_c$  - частота зрізу,  $N$  – порядок фільтра.

Фільтр низьких частот Баттерворта забезпечує максимально плоску амплітудну характеристику в смузі пропускання без пульсацій або затухання. Його фазова характеристика нелінійна і змінюється залежно від частоти. Фільтри вищого порядку вносять більше фазових спотворень, що може вплинути на синхронізацію сигналу в програмах реального часу.

### 3.3 Фільтр низьких частот Чебишева I роду

Серед різних типів фільтрів низьких частот фільтри Чебишева мають переваги в області характеристик крутого спаду та здатності досягати різкішого переходу між смугою пропускання та смугою зупинки. Конструкція фільтрів Чебишева I роду базується на поліномах Чебишева, які є сімейством ортогональних поліномів із певними математичними властивостями. Вони характеризуються пульсаціями в смузі пропускання і монотонним спадом в смузі затримки. Пульсація в смузі пропускання забезпечує крутіший перехід між смугою пропускання та смугою зупинки порівняно з іншими типами фільтрів.

Передавальна функція фільтра Чебишева I роду виводиться з полінома Чебишева, що призводить до частотної характеристики, яка відповідає заданим вимогам до смуги пропускання та смуги зупинки. Процес проектування передбачає апроксимацію бажаної частотної характеристики за допомогою поліномів Чебишева. Це дозволяє визначити коефіцієнти фільтра, які відповідають заданим специфікаціям. Порядок фільтра визначає його складність і продуктивність. Фільтри вищого порядку можуть досягти більш чітких характеристик спаду, але можуть потребувати більше обчислювальних ресурсів.

Формула для поліномів фільтрів низьких частот Чебишева I роду  $T_n(x)$  визначається на інтервалі  $[-1,1]$  та має такий вигляд:

$$T_n(x) = \begin{cases} \cos(n * \arccos(x)), & \text{для } |x| \leq 1 \\ \cosh(n * \operatorname{arccosh}(x)), & \text{для } |x| \geq 1 \end{cases}$$

де  $n$  – порядок полінома.

Амплітудно-частотна характеристика такого фільтра задається виразом:

$$G_n(\omega, \omega_0) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_n^2(\omega_0/\omega)}}$$

Фільтри Чебишева I роду пропонують дієве рішення для досягнення характеристик крутого спаду та точних характеристик частотної характеристики в застосуваннях фільтрів низьких частот. Завдяки своїй універсальності та продуктивності фільтри Чебишева типу I продовжують відігравати значну роль у сучасних технологіях обробки сигналів і зв'язку.

### 3.4 Фільтр низьких частот Чебишева II роду

Фільтри Чебишева II роду характеризуються пульсаціями в смузі затримки і монотонною смугою пропускання. На відміну від фільтрів Чебишева I роду, які демонструють пульсації в смузі пропускання, у фільтрах II роду пріоритетним є досягнення різкого переходу між смугою пропускання та смугою зупинки. Взагалі фільтри Чебишева II роду зазвичай використовуються в програмах, де крутий спад у смузі зупинки має вирішальне значення, наприклад, у фільтрах згладжування для аналого-цифрових перетворювачів, де потрібне різке зрізання для усунення високочастотного шуму.

Процес проектування передбачає наближення бажаної частотної характеристики за допомогою поліномів Чебишева. Формула для поліномів Чебишева II роду  $U_n(x)$  визначається на інтервалі  $[1, \infty)$  або  $(-\infty, -1]$  та має такий вигляд:

$$U_n(x) = \{\cosh(n * \operatorname{arccosh}(x))\}, \text{ для } |x| \geq 1,$$

де  $n$  – порядок полінома.

Амплітудно-частотна характеристика такого фільтра задається виразом:

$$G_n(\omega, \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_n^2} \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

У II роді фільтрів основною задачею є досягнення крутого спаду в смузі зупинки при мінімізації пульсацій у смузі пропускання. Це дозволяє ефективно придушувати позасмугові частоти. Смуга пропускання фільтрів Чебишева II роду зазвичай має монотонну характеристику без будь-яких пульсацій. Фільтри Чебишева II роду пропонують дієве рішення для випадків, які потребують різкого переходу між смугою пропускання та смугою затримки з мінімальною пульсацією в смузі пропускання. Завдяки своїм універсальним характеристикам фільтри Чебишева типу II продовжують знаходити широке застосування в сучасних електронних і комунікаційних технологіях.

### 3.5 Еліптичний фільтр

Серед різних типів фільтрів низьких частот еліптичні фільтри, також відомі як фільтри Кауера, пропонують певні переваги з точки зору досягнення різких характеристик спаду та мінімізації як смуги пропускання, так і смуги зупинки пульсацій одночасно. Еліптичні фільтри характеризуються характеристиками рівної пульсації як у смузі пропускання, так і в смузі зупинки. На відміну від інших типів фільтрів, еліптичні фільтри забезпечують найкрутіший можливий спад для даного порядку фільтрів, дозволяючи ефективно придушувати позасмугові частоти. Ключова перевага еліптичних фільтрів полягає в їх здатності досягати різкого переходу між смугою пропускання та смугою затримки, одночасно мінімізуючи пульсації як смуги пропускання, так і смуги затримки, що робить їх ідеальними для додатків із суворими вимогами до частотної характеристики.

Процес проектування передбачає апроксимацію бажаної частотної характеристики за допомогою еліптичних функцій, таких як еліптичні функції Якобіана. Регулюючи параметри фільтра, такі як пульсації в смузі пропускання та смузі зупинки, розробники можуть адаптувати відгук фільтра відповідно до конкретних вимог. Амплітудно-частотна характеристика еліптичного фільтра низьких частот є функцією кругової частоти  $\omega$  і задається наступним виразом:

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 R_n^2(\epsilon, \omega/\omega_0)}}$$

На відміну від інших типів фільтрів, еліптичні фільтри одночасно мінімізують пульсації як смуги пропускання, так і смуги зупинки, забезпечуючи збалансований компроміс між вибірковістю частоти та рівнями пульсацій. Частотна характеристика еліптичних фільтрів оцінюється з точки зору пульсацій смуги пропускання, пульсацій смуги зупинки, пропускну здатності переходу та характеристик спаду, щоб переконатися, що фільтр відповідає заданим вимогам до конструкції.

Еліптичні фільтри пропонують цікаве рішення для досягнення різких характеристик спаду, мінімальної пульсації та точного контролю частотної характеристики в застосуваннях фільтрів низьких частот.

### 3.6 Порівняння оптимізованих аналогових НІХ-фільтрів низьких частот

Порівняємо аналогові БІХ-фільтри низьких частот на прикладі таких фільтрів як: фільтр Баттерворта, фільтр Чебишева I роду, фільтр Чебишева II роду та еліптичний фільтр. Розробимо фільтр Баттерворта 5-го порядку з

частотою зрізу 2 ГГц. Помножимо частоту зрізу на  $2\pi$ , щоб перетворити частоту в радіани за секунду.

```
n = 5;
f = 2e9;

[zb,pb,kb] = butter(n,2*pi*f,'s');
[bb,ab] = zp2tf(zb,pb,kb);
[hb,wb] = freqs(bb,ab,4096);
```

Розробимо фільтр Чебишева 5-го порядку I роду з тією самою граничною частотою та пульсаціями смуги пропускання у 3 дБ. Помножимо частоту зрізу на  $2\pi$ , щоб перетворити частоту в радіани за секунду.

```
n = 5;
f = 2e9;

[z1,p1,k1] = cheby1(n,3,2*pi*f,'s');
[b1,a1] = zp2tf(z1,p1,k1);
[h1,w1] = freqs(b1,a1,4096);
```

Розробимо фільтр Чебишева 5-го порядку II роду з такою ж граничною частотою та затуханням у смузі зупинки у 30 дБ. Помножимо частоту зрізу на  $2\pi$ , щоб перетворити частоту в радіани за секунду.

```
n = 5;
f = 2e9;

[z2,p2,k2] = cheby2(n,30,2*pi*f,'s');
[b2,a2] = zp2tf(z2,p2,k2);
[h2,w2] = freqs(b2,a2,4096);
```

Розробимо еліптичний фільтр 5-го порядку з тією самою граничною частотою, пульсацією смуги пропускання у 3 дБ та затухання в смузі зупинки у 30 дБ. Помножимо частоту зрізу на  $2\pi$ , щоб перетворити частоту в радіани за секунду.

```
n = 5;
f = 2e9;

[ze,pe,ke] = ellip(n,3,30,2*pi*f,'s');
[be,ae] = zp2tf(ze,pe,ke);
[he,we] = freqs(be,ae,4096);
```

Побудуємо графік затухання в дБ, виразимо частоту в ГГц та порівняємо фільтри.

```

plot(wb/(2e9*pi),mag2db(abs(hb)))
hold on
plot(w1/(2e9*pi),mag2db(abs(h1)))
plot(w2/(2e9*pi),mag2db(abs(h2)))
plot(we/(2e9*pi),mag2db(abs(he)))
axis([0 4 -40 5])
grid
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('Attenuation (dB)')
legend('butter','cheby1','cheby2','ellip')

```

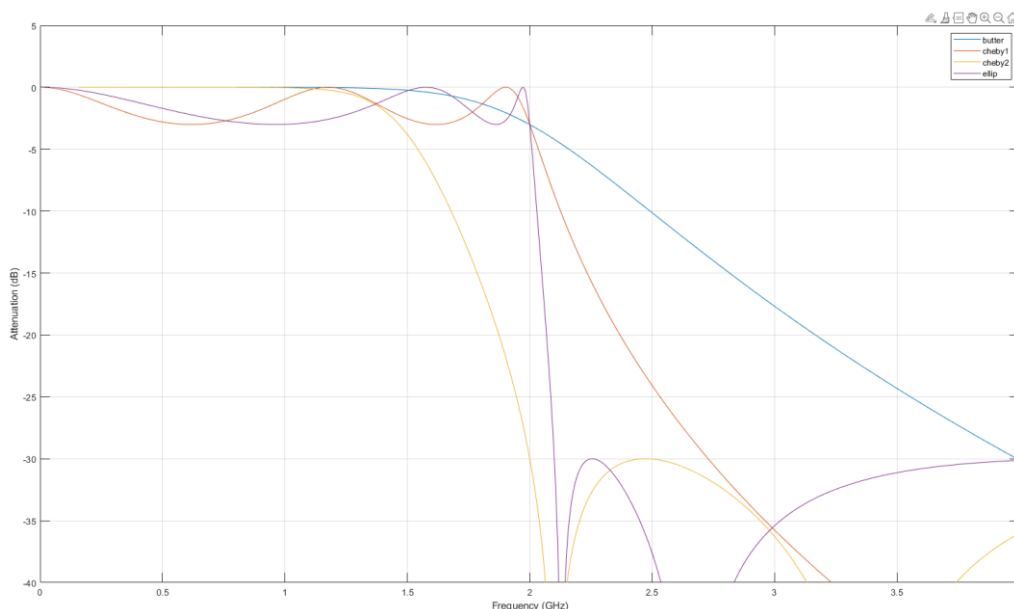


Рис. 16 Графік порівняння фільтра Баттерворта, фільтра Чебишева I роду, фільтра Чебишева II роду та еліптичного фільтра

Отже, фільтр Баттерворта має максимально плоску амплітудно-частотну характеристику у смузі пропускання, тобто без брижі та забезпечує поступовий спад амплітуди у смузі загородження. Беручи до уваги ці факти, фільтр Баттерворта підходить для випадків, коли потрібна гладка передача сигналу без брижі в смузі пропускання. Щодо фільтра Чебишева I роду можна сказати те, що він має бриж у смузі пропускання, але забезпечує більш крутий спад у смузі загородження порівняно з фільтром Баттерворта. Бриж може бути контрольована та задана при проектуванні. Взагалі фільтр Чебишева I роду можна використовувати при умовах, де допускаються невеликі варіації амплітуди у смузі пропускання, але потрібен різкіший перехід до смуги загородження. А ось фільтр Чебишева II роду має бриж у смузі загородження, але смуга пропускання є максимально плоскою (без брижів). Спад амплітуди в смузі загородження може бути крутішим, ніж у фільтра Чебишева I роду. Фільтр краще використовувати у тих ситуаціях, де критично важливо мінімізувати бриж у смузі пропускання, але допустимі варіації у смузі загородження. Як ми бачимо еліптичний фільтр має бриж як у смузі



пропускання, так і в смузі загородження. Тобто забезпечує найкрутіший спад амплітуди у смузі загородження порівняно з іншими типами фільтрів при заданому порядку фільтра. Використання еліптичного фільтру підходить для тих випадків, коли потрібен дуже різкий перехід між смугою пропускання і смугою загородження, навіть якщо це тягне за собою наявність брижі в обох смугах.

В підсумок можна сказати, що оптимізований фільтр низьких частот потрібно вибирати під вимоги, яких потрібно досягти, враховуючи переваги та недоліки кожного з вищеописаних фільтрів. Наприклад, фільтри Чебишева I та II роду та еліптичний фільтр краще використовувати у системах зв'язку, через їх різке обмеження смуги частот із мінімальними втратами у смузі пропускання. А ось, наприклад, фільтр Баттерворта може використовуватись у обробці зображень через те, що він згладжує зображення без значного спотворення даних.

## РОЗДІЛ 4

### ВИКОРИСТАННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО ФІЛЬТРУ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ У АВІОНІЦІ

#### 4.1 ACARS

Система бортового обміну даними ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) – це цифрова канална система передачі коротких повідомлень між повітряним судном і наземною станцією в авіадіапазоні радіохвиль або через супутниковий зв'язок. Вона призначена для обміну оперативною інформацією, пов'язаною з польотом, технічним станом літака та безпекою пасажирів і екіпажу.

Фільтри низьких частот у системі ACARS виконують кілька важливих функцій для забезпечення надійності та чіткості переданих і прийнятих сигналів. Основними функціями оптимізованого фільтра низьких частот в системі ACARS є усунення високочастотного шуму, який може заважати цифровим сигналам, що використовуються в ACARS, відфільтрування небажаних високочастотних компонентів, зменшення спотворення сигналів, роблячи зв'язок чіткішим і надійнішим.

Взагалі повідомлення, які надходять на ACARS є цифровими, тому під час перетворення аналогових сигналів на цифрові та навпаки потрібно використовувати оптимізовані ФНЧ, щоб запобігти накладенню сигналів і уникнути їх спотворення. Спотворення може виникнути коли під час дискретизації високочастотні сигнали неправильно представляють як нижчі частоти. Безумовно, системам ACARS необхідно контролювати смугу пропускання своїх сигналів, щоб відповідати виділеним частотним діапазнам і мінімізувати перешкоди іншим каналам зв'язку. Оптимізований фільтр низьких частот допоможе досягти цього контролю, обмежуючи діапазон частот переданих сигналів. Відповідність стандартам є дуже важливим аспектом у будь-якій системі, тому використання оптимізованих ФНЧ гарантує, що система ACARS відповідає стандартам авіаційного зв'язку та правилам щодо використання смуги пропускання та частоти.

Фільтрація сигналу перед модуляцією за допомогою оптимізованих ФНЧ виконується для очищення сигналу, гарантуючи, що передаються лише потрібні частотні компоненти. Після демодуляції отриманого сигналу фільтри низьких частот допомагають видалити будь-які високочастотні шуми, що виникають під час передачі, забезпечуючи чистіший сигнал для подальшої обробки. А також в аналогових каскадах трансиверів ACARS оптимізовані

ФНЧ часто реалізуються з використанням пасивних компонентів (резисторів, конденсаторів) або активних компонентів (операційних підсилювачів), щоб забезпечити необхідну фільтрацію. ACARS використовується для різних важливих комунікацій, включаючи оновлення погоди, плани польотів і дані технічного обслуговування. Оптимізовані фільтри низьких частот допомагають забезпечити передачу та отримання цих повідомлень без високочастотного шуму, який може пошкодити дані.

Наприклад, коли літак зв'язується з наземною станцією через ACARS, оптимізовані фільтри низьких частот у системі зв'язку літака гарантують, що сигнал, що передається, не містить високочастотного шуму, таким чином запобігаючи помилкам даних і гарантуючи, що наземна станція отримує чистий сигнал.

Отже, оптимізовані фільтри низьких частот необхідні в системі зв'язку ACARS для підтримки цілісності та надійності передачі даних. Відфільтровуючи високочастотний шум, запобігаючи накладенням спектрів і контролюючи смугу пропускання, ці фільтри гарантують, що ACARS може ефективно підтримувати найважливіші комунікаційні потреби сучасної авіації.

#### 4.2 VOR/DME

VOR/DME – комплексна радіонавігаційна система аеронавігаційного обладнання для ЛА. Всеспрямований азимутальний радіомаяк VOR (VHF Omni-directional Radio Range) – є одним з найважливіших наземних радіонавігаційних систем, які використовуються в авіації для забезпечення точної навігації. Система VOR надає пілотам азимутальну інформацію, що дозволяє визначити їхнє місце розташування відносно наземної станції VOR. Всеспрямований далекомірний радіомаяк DME (Distance Measuring Equipment) – навігаційний пристрій, який використовується у повітряному транспорті для вимірювання відстаней між літаком і наземним радіопунктом. DME використовує радіосигнали для визначення точного положення літака в просторі, що дозволяє пілотам точно навігувати в повітрі та знаходити свій шлях.

VOR і DME є критично важливими компонентами навігаційних систем літака, які надають інформацію про азимут і відстань відповідно. Фільтри низьких частот відіграють важливу роль у системах VOR і DME, забезпечуючи цілісність і надійність отриманих сигналів. Оптимізовані ФНЧ можна використовувати для видалення високочастотного шуму з отриманих сигналів VOR і DME. Такий шум може виникати з різних джерел, наприклад, від інших систем літака, електромагнітні перешкоди, тому задля усунення цієї проблеми використовують оптимізовані фільтри низьких частот. Завдяки послабленню високочастотного шуму оптимізовані фільтри низьких частот зменшення

спотворення сигналів, забезпечуючи більш чіткі та надійні сигнали для цілей навігації.

Також оптимізовані ФНЧ допомагають зберегти якість сигналів VOR і DME, запобігають накладенням спектрів, забезпечуючи достатнє ослаблення компонентів сигналу вище частоти Найквіста перед дискретизацією. Важливим є зменшення перешкод від суміжних каналів, що особливо потрібно в переповнених діапазонах VHF і UHF, які використовуються для VOR і DME. Прості фільтри низьких частот на основі резистора-конденсатора (RC) і індуктора-конденсатора (LC) використовуються в аналоговому інтерфейсі для забезпечення початкової фільтрації сигналів VOR і DME. Операційні підсилювачі (ОП) використовуються в конструкціях активних фільтрів низьких частот для забезпечення різкіших зрізів і кращого придушення шуму. Такі фільтри можуть підсилювати бажаний сигнал, одночасно послаблюючи небажані високочастотні компоненти.

У сучасних приймачах VOR/DME цифрові фільтри реалізовані за допомогою методів DSP. Ці фільтри пропонують точний контроль над характеристиками фільтрів і можуть адаптуватися до мінливих умов шуму для підтримки оптимальної якості сигналу.

Після демодуляції сигналу VOR використовуються оптимізовані фільтри низьких частот для видалення будь-якого високочастотного шуму, який виникає під час процесу демодуляції, забезпечуючи точність отриманої інформації про азимут. А також вони допомагають очистити опорні та змінні сигнали в системах VOR, які використовуються для визначення пеленгу літака відносно станції VOR.

Системи DME використовують імпульсні сигнали для вимірювання відстані, тому оптимізовані ФНЧ використовуються для очищення отриманих імпульсів, видаляючи високочастотний шум, який може вплинути на точність вимірювання відстані. А також при забезпеченні чистоти імпульсів і відсутності шумів, оптимізовані ФНЧ допомагають підвищити точність обчислення діапазону в системах DME.

Наприклад, у приймачах VOR оптимізовані фільтри низьких частот мають вирішальне значення для забезпечення чистоти та точності сигналу з амплітудною модуляцією 30 Гц, який надає інформацію про азимут. Ця фільтрація необхідна для правильного визначення пеленгу літака. А у системах DME, наприклад, оптимізовані фільтри низьких частот гарантують, що сигнали запиту та відповіді вільні від високочастотного шуму, що дозволяє точно розрахувати відстань між літаком і наземною станцією.

Отже, можна сказати, що оптимізовані фільтри низьких частот життєво важливі в системах VOR/DME, гарантуючи чіткість, безпеку, точність

навігаційних сигналів і відсутність високочастотних шумів і перешкод. Покращуючи цілісність сигналу, запобігаючи накладенням сигналу та зменшуючи перешкоди, ці фільтри відіграють вирішальну роль у надійності та безпеці навігації літака.

#### 4.3 Автопілот

Автопілот – це автоматична система керування, яка призначена для керування рухом ПС без прямого втручання оператора. На літаку, автопілот може керувати літаководінням, рулем направлення, креном і швидкістю літака за допомогою датчиків, які вимірюють параметри, такі як висота, кут крену, кут курсу, швидкість, прискорення і т. д. Автопілот також призначений для автоматичного керування процесами взльоту та посадки, а також виконувати програмовані маневри.

Оптимізовані фільтри низьких частот відіграють велику роль у системах автопілотування, особливо в контексті фільтрації даних датчиків. Взагалі системи автопілотування покладаються на датчики для збору даних про просторове положення літака, швидкість, висоту тощо. Однак дані датчиків можуть часто містити шум, який може призвести до некоректного керування автопілотом. Тому оптимізовані ФНЧ допомагають послабити високочастотний шум, дозволяючи автопілоту зосередитися на основних низькочастотних компонентах сигналу.

Автопілоту потрібні стабільні та безпечні вхідні дані для прийняття точних керуючих рішень. Пропускаючи сигнали датчиків через оптимізовані ФНЧ, можна згладити швидкі коливання або стрибки даних, забезпечуючи більш послідовний і надійний вхідний сигнал для автопілоту. Швидкі зміни вхідних даних керування можуть призвести до коливань або нестабільності в поведінці літака, тому оптимізовані ФНЧ допомагають запобігти цим коливанням, гарантуючи, що сигнали керування змінюються поступово, а не раптово.

Безумовно, фільтруючи високочастотний шум і перешкоди, оптимізовані фільтри низьких частот сприяють покращенню загальної продуктивності системи автопілоту. Система автопілотування може краще розрізняти бажані входи керування та шум, що забезпечує більш плавне керування польотом і покращує стабільність польоту. Характеристики оптимізованих фільтрів низьких частот можна розробити під конкретні вимоги літака та динаміки системи керування. Враховуючи такі фактори, як бажаний час відгуку, смуга пропускання керуючих сигналів і частотний діапазон шуму, який фільтрується.

Загалом, оптимізовані фільтри низьких частот грають важливу роль у стабільному, надійному, точному керуванні компонентами систем автопілотування у різних умовах польоту. І навіть є можливість розробки

оптимізованого ФНЧ під конкретні вимоги літака та динаміки системи керування.

#### 4.4 Ethernet

Технологія Ethernet все частіше використовується в авіації для різноманітних застосувань, починаючи від бортових розважальних систем до авіоніки та передачі даних. Ethernet використовує методи передачі даних в базовій смузі. Це означає, що послідовні дані для передачі розміщуються безпосередньо на носіях шини. Однак перед передачею двійкові дані кодуються в унікальну варіацію двійкового коду, відомого як Манчестерський код.

Цей метод кодування запобігає зростанню рівня напруги постійного струму на кабелі передачі до неприйняттого рівня. Зі стандартними двійковими імпульсами середня напруга постійного струму буде протікати по кабелю, значення середньої напруги залежить від характеру двійкових даних у кабелі. Особливо вона змінюється від кількості двійкових одиниць або нулів, що виникають у послідовності. Велика кількість двійкових одиниць бітів спричинить дуже високий середній рівень постійного струму. Довгі рядки двійкових нулів спричинять низьку середню напругу.

Стандартна швидкість передачі для оригінальних базових локальних мереж Ethernet становить 10 Мбіт/с. Час для кожного бітового інтервалу є величиною, зворотною швидкості, або  $1/f$ , де  $f$  є частотою передачі. Більш поширена версія Ethernet називається Fast Ethernet. Він має швидкість 100 Мбіт/с. Інші версії Ethernet працюють зі швидкістю 1 Гбіт/с або 10 Гбіт/с або більше, як правило, передають дані по волоконно-оптичному кабелю, але також і по коротшому коаксіальному або витої пари. Найпоширеніший варіант Ethernet – це Gigabit Ethernet, який, по суті, є невід'ємною частиною в авіації сьогодні.

Оптимізовані фільтри низьких частот у мережі передачі даних Ethernet використовуються в основному для придушення високочастотного шуму та небажаних сигналів, які можуть заважати передачі даних. Ці фільтри необхідні для забезпечення цілісності та якості даних, що передаються через кабелі Ethernet. Кабелі Ethernet можуть сприймати електромагнітні перешкоди від різних джерел, як-от електричне обладнання та інші кабелі. Оптимізовані фільтри низьких частот допомагають блокувати ці високочастотні шуми, забезпечуючи проходження лише бажаних частот сигналу. Також сигнали Ethernet призначені для роботи в певному діапазоні частот. Оптимізовані фільтри низьких частот допомагають підтримувати цілісність сигналу, відфільтровуючи будь-які частоти, що виходять за межі цього діапазону, що може спричинити спотворення та погіршення сигналу. Відфільтровуючи небажані високочастотні сигнали, фільтри низьких частот допомагають зменшити бітові помилки та підвищити загальну точність передачі даних.

Багато пристроїв Ethernet PHY (Physical Layer) містять інтегровані фільтри низьких частот як частину своєї конструкції. Ці фільтри, як правило, реалізуються в аналоговій зовнішній схемі PHY, щоб забезпечити початкову фільтрацію шуму перед подальшою обробкою сигналу. Взагалі кабелі Ethernet самі по собі можуть певною мірою діяти як фільтри низьких частот. Скручування пар і використання екранування в кабелях Ethernet допомагають зменшити вплив високочастотного шуму.

У Fast Ethernet оптимізовані фільтри низьких частот в основному використовуються для того, щоб сигнал залишався в потрібному діапазоні частот і зменшував електромагнітні перешкоди. На швидкостях 1 Гбіт/с роль фільтрів низьких частот стає ще важливішою. Вони допомагають керувати підвищеною сприйнятливістю до шуму та перешкод, які пов'язані з високою швидкістю передачі даних. Для 10 Гбіт/с Ethernet і більш високих швидкостей використовуються складні методи фільтрації. Вони часто включають комбінацію аналогових і цифрових фільтрів для керування цілісністю сигналу та ефективного зменшення шуму.

У висновку можна сказати, що фільтри низьких частот є важливими компонентами систем Ethernet, які забезпечують зменшення шуму, підтримку цілісності сигналу та забезпечення відповідності стандартам електромагнітної сумісності. Вони реалізовані в різних формах, як аналогових, так і цифрових, і мають вирішальне значення для надійної роботи мереж Ethernet на будь-якій швидкості.

#### 4.5 GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) – стандартний загальний термін для супутникових навігаційних систем, які забезпечують автономне геопросторове позиціонування з глобальним покриттям. До GNSS відносяться такі системи як: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou та інші регіональні системи. Його перевагою є доступ до кількох супутників, що забезпечує точність, резервування та доступність у будь-який час. Хоч супутникові системи не часто виходять з ладу, але якщо одна з них виходить з ладу, приймачі GNSS можуть приймати сигнали від інших систем. Крім того, якщо лінія прямої видимості закрита, наявність доступу до кількох супутників також є перевагою. Приймач GNSS може використовувати сигнали з будь-якого супутника позиціонування, а не лише з тих, що в системі GPS. Це означає, що навіть якщо всі сигнали GPS заблоковано, він може приймати сигнали від будь-якої іншої супутникової системи по всьому світу. Ця гнучкість робить приймачі GNSS набагато точнішими та надійнішими, ніж сама технологія GPS. Завдяки GNSS можна бути впевненим, що інформація про розташування ЛА в просторі буде отримана не дивлячись ні на що.

Взагалі GNSS служить резервною навігаційною системою, доповнюючи традиційні навігаційні засоби, такі як VOR/DME. У разі відмови обладнання або погіршення сигналу GNSS може надати важливу навігаційну інформацію. Тобто приймачі GNSS інтегровані в комплект авіоніки літака, взаємодіючи з іншими системами, такими як автопілот, системи керування польотом та навігаційні дисплеї, щоб забезпечити точне позиціонування та навігаційну інформацію. Фільтри низьких частот у приймачах GNSS розроблені з певними частотами зрізу, пульсаціями смуги пропускання та затуханням у смузі зупинки, адаптованими до вимог сигналів GNSS та робочого середовища. Оптимізовані фільтри низьких частот у GNSS використовуються в основному для пом'якшення шуму та перешкод у прийнятих сигналах, тим самим покращуючи точність і надійність позиціонування та навігації. На сигнали від GNSS можуть впливати електромагнітні перешкоди від електронних пристроїв, що знаходяться поблизу, або радіочастотних передавачів. Оптимізовані ФНЧ будуть пригнічувати високочастотні перешкоди, дозволяючи GNSS приймачу ефективніше вилучати потрібні супутникові сигнали.

Сигнали GNSS зазвичай займають певні діапазони частот, а оптимізовані фільтри низьких частот допомагають ізолювати ці діапазони, одночасно послаблюючи позасмуговий шум і перешкоди. Тобто, обмежуючи смугу пропускання отриманих сигналів, оптимізовані фільтри низьких частот допомагають запобігти накладенням сигналів, яке може виникати, коли високочастотні компоненти згортаються назад у потрібний діапазон частот, викликаючи спотворення та неточності у вимірюваннях приймача GNSS. В архітектурі приймача GNSS оптимізовані фільтри низьких частот часто включені в передню радіочастотну схему для придушення позасмугових сигналів і запобігання перевантаженню приймача, особливо в середовищах із сильними радіочастотними перешкодами.

Перешкоди сусіднього діапазону можуть погіршити продуктивність приймача GNSS. Через це використовують оптимізовані фільтри низьких частот для забезпечення різких характеристик спаду, що дозволяє їм ефективно відхиляти сигнали з сусідніх діапазонів частот. А також приймачі GNSS можуть зіткнутися з перешкодами від гармонійних сигналів, що генеруються електронними пристроями чи системами зв'язку поблизу. Тому використання оптимізованих фільтрів низьких частот є актуальним для послаблення цих гармонічних сигналів, гарантуючи, що вони не спотворюють вимірювання приймача GNSS.

Загалом можна сказати, що оптимізовані фільтри низьких частот грають важливу роль у коректній роботі системи GNSS пом'якшуючи шум та перешкоди у прийнятих сигналах, тим самим покращуючи точність і надійність позиціонування та навігації.



## 4.6 TCAS

Система попередження зіткненням (TCAS) – це бортова система, призначена для підвищення рівня інформованості в кабіні екіпажу про літаки, що знаходяться поблизу, і служить останнім захистом від зіткнень у повітрі. Система контролює повітряний простір навколо літака на наявність інших літальних апаратів, обладнаних транспондерами, які можуть становити загрозу зіткнення. TCAS працює незалежно від наземного обладнання, щоб надати пілотам вказівки щодо того, як уникнути потенційного зіткнення.

Технологія першого покоління TCAS I, здатна відстежувати ситуацію навколо літака та надавати детальну інформацію про пеленг і висоту руху поблизу. Він також може генерувати попередження про зіткнення, відомі як «Traffic Advisory» (ТА). Коли видається ТА, пілот отримує повідомлення про загрозу, але він повинен прийняти рішення задля уникнення зіткнення. Технологія другого покоління TCAS II, надає пілоту конкретні інструкції щодо того, як уникнути конфлікту з трафіком. Ці інструкції відомі як «Resolution Advisory» (РА) і можуть вказувати пілоту знизитися, набрати висоти або відрегулювати вертикальну швидкість. Системи TCAS II також можуть спілкуватися одна з одною, щоб гарантувати, що РА, що надається кожному літаку, максимізує ешелонування.

Під час розробки оптимізованого фільтру низьких частот для системи TCAS потрібно приймати до уваги той факт, що частота зрізу, пульсація в смузі пропускання та затухання у смузі зупинки повинні бути адаптованими до вимог сигналів транспондера та робочого середовища. Взагалі розробники приймачів повинні збалансувати потребу в агресивній фільтрації для придушення шуму та перешкод із бажанням зберегти цілісність сигналу та підтримувати чутливість, особливо в складних радіочастотних середовищах, які зустрічаються в авіації.

Оптимізовані фільтри низьких частот у TCAS використовуються в основному для пом'якшення шуму та перешкод у прийнятих сигналах, тим самим дають змогу TCAS точно виявляти літак поблизу та забезпечують надійну роботу системи. Вони використовуються для послаблення високочастотного шуму, присутнього в отриманих сигналах від транспондерів інших літаків. Такий шум може виникати з різних джерел, включаючи атмосферні умови, електромагнітні перешкоди та електроніку приймача. Приймачі TCAS можуть стикатися з перешкодами від електронних пристроїв, що знаходяться поблизу, або радіочастотних передавачів, тому оптимізовані фільтри низьких частот пригнічують високочастотні сигнали перешкод, дозволяючи приймачу більш ефективно вилучати потрібні сигнали транспондера.

Оптимізовані фільтри низьких частот обмежують смугу пропускання прийнятих сигналів до потрібного діапазону частот, що відповідає сигналам

транспондерів, що випромінюються іншими літальними апаратами. TCAS працює в певних діапазонах частот, наприклад, 1030 МГц для опитування інших транспондерів, 1090 МГц для отримання відповідей, а оптимізовані фільтри низьких частот допомагають ізолювати ці діапазони, одночасно відкидаючи позасмуговий шум і перешкоди. Тобто обмежуючи смугу пропускання прийнятих сигналів, оптимізовані фільтри низьких частот допомагають запобігти накладенням сигналів, яке може виникнути, коли високочастотні компоненти згортаються назад у потрібний діапазон частот, викликаючи спотворення та неточності у вимірюваннях приймача TCAS.

Вони допомагають забезпечити надійність роботи TCAS, зводячи до мінімуму помилкові тривоги та помилкові виявлення, спричинені шумом і перешкодами, тим самим підвищуючи ефективність маневрів запобігання зіткненням. Також зменшуючи шум і перешкоди, оптимізовані фільтри низьких частот сприяють загальній якості отриманих сигналів, забезпечуючи більш точне виявлення та відстеження літака поблизу за допомогою логіки роботи запобігання зіткненням TCAS.

Отже, використання оптимізованих фільтрів низьких частот у роботі системи TCAS є дуже важливим задля послаблення високочастотного шуму, присутнього в отриманих сигналах від транспондерів інших літаків, придушення шуму та перешкод із бажанням зберегти цілісність сигналу та підтримки чутливості, особливо в складних радіочастотних середовищах, які зустрічаються в авіації.

#### 4.7 ILS

Радіотехнічна система посадки повітряних суден метрового діапазону хвиль ILS (Instrument Landing System) – це допоміжний засіб точного заходу на посадку на злітно-посадковій смузі на основі двох радіопроменів, які разом забезпечують пілотів як вертикальним, так і горизонтальним наведенням під час заходу на посадку. Локалізатор (LOC) забезпечує наведення по азимуту, а глісада (GS) визначає правильний вертикальний профіль зниження. Маркерні маяки та вогні злітно-посадкової смуги високої інтенсивності також можуть надаватися як допоміжні засоби для використання ILS. Визначаються спеціальні категорії заходження на посадку ILS, які дозволяють пілотам з відповідною кваліфікацією, які здійснюють політ на відповідно обладнаних літаках на відповідно обладнаних злітно-посадкових смугах, використовуючи належно кваліфіковані системи ILS, продовжувати посадку.

У радіотехнічній системі посадки повітряних суден метрового діапазону хвиль ILS оптимізовані фільтри низьких частот потрібно використовувати для підвищення точності та надійності отриманих сигналів, забезпечуючи точне наведення літака під час заходу на посадку та безпосередньо під час самої посадки. Оптимізовані фільтри низьких частот у ILS використовуються в

основному для пом'якшення шуму та перешкод у прийнятих сигналах, тим самим дають змогу ILS точно виявляти літак поблизу та забезпечують надійну роботу системи. Приймачі ILS можуть стикатися з перешкодами від електронних пристроїв, що знаходяться поблизу, радіочастотних передавачів або відбиття сигналу від будівель чи місцевості. Тому оптимізовані фільтри низьких частот пригнічують високочастотні сигнали перешкод, дозволяючи приймачу ефективніше виділяти потрібні сигнали ILS.

Вони обмежують смугу пропускання прийнятих сигналів бажаним частотним діапазоном, що відповідає сигналам ILS, який випромінюються наземними передавачами. ILS працює в певних діапазонах частот, наприклад, 108,15-111,90 МГц для локалізатора, 329,10-335,00 МГц для глісади, а фільтри низьких частот допомагають ізолювати ці діапазони, одночасно відкидаючи позасмуговий шум і перешкоди. Обмеження смуги пропускання прийнятих сигналів оптимізованими фільтрами низьких частот допомагають запобігти накладенням спектрів, викликаючи спотворення та неточності у вимірюваннях приймача ILS. Якщо говорити про розташування фільтрів низьких частот, то їх можна інтегрувати в антену ILS або розмістити відразу після антени, щоб відфільтрувати небажані високочастотні сигнали до того, як вони досягнуть переднього кінця приймача. Це допомагає покращити співвідношення сигнал/шум і загальну продуктивність приймача. Взагалі в архітектурі приймача ILS фільтри низьких частот часто включені в радіочастотну інтерфейсну схему для придушення позасмугових сигналів і запобігання перевантаженню приймача, особливо в середовищах із сильними радіочастотними перешкодами.

Тому основною функцією оптимізованих фільтрів низьких частот є забезпечення надійності роботи ILS, мінімізуючи спотворення сигналу та колювання, викликані шумом і перешкодами, тим самим підвищуючи ефективність системи наведення ILS у забезпеченні точного бокового та вертикального наведення літака під час заходу на посадку та посадки.

#### 4.8 FMS

Система керування польотом FMS (Flight Management System) – це бортовий багатоцільовий комп'ютер для навігації, продуктивності та керування літаком, призначений для надання віртуальних даних і операційної гармонії між закритими та відкритими елементами, пов'язаними з польотом від запуску двигуна до зльоту, до посадки і зупинки двигуна. Система керування польотом FMS використовує велику базу даних для попереднього програмування маршрутів і введення їх у систему за допомогою завантажувача даних. Система постійно оновлюється інформацією про місцезнаходження літака за допомогою наявних засобів навігації. Під час оновлення інформації автоматично вибираються найбільш відповідні допоміжні засоби.

У системах керування польотом FMS оптимізовані фільтри низьких частот використовуються для обробки вхідних сигналів даних і забезпечення цілісності та точності інформації, яка використовується для навігації, планування польоту та управління продуктивністю. Тобто оптимізовані фільтри низьких частот використовуються для зменшення високочастотного шуму, наявного у вхідних даних датчика, таких як повітряна швидкість, висота, напрямок і положення GPS. Також вони допомагають згладити швидкі коливання або варіації даних датчика, забезпечуючи більш стабільний і послідовний вхідний сигнал для FMS. Цей процес згладжування допомагає підвищити точність розрахунків параметрів польоту та підвищує продуктивність автоматизованих систем керування польотом.

FMS зазвичай об'єднує дані з різних датчиків, включаючи інерціальні навігаційні системи, приймачі GPS, комп'ютери повітряних даних (ADC) та інші системи авіоніки. Отже, оптимізовані фільтри низьких частот використовуються для поєднання та фільтрації таких вхідних сигналів датчиків для створення комплексного навігаційного рішення, яке є надійним і надійним навіть у складних умовах польоту. А також вони покращують ідентифікацію та відхилення помилкових даних датчика або помилки, які можуть бути результатом несправності датчика, помилок вимірювання або перехідних збурень. Відфільтровуючи такі помилки, FMS може підтримувати точні та послідовні навігаційні рішення протягом усього польоту. Якщо говорити про їх розташування на системі керування польотом, то оптимізовані фільтри низьких частот інтегровані в програмну та апаратну архітектуру FMS для фільтрації вхідних потоків даних датчиків у режимі реального часу. Вони можуть працювати на різних етапах обробки даних, включаючи збір даних, злиття та генерацію вихідних даних, щоб забезпечити послідовну та точну навігаційну інформацію.

Тобто FMS використовує оптимізовані фільтри низьких частот для прогнозування майбутньої траєкторії літака на основі відфільтрованих даних датчиків і інформації про план польоту. Передбачення траєкторії використовуються для обчислення оптимальних траєкторій польоту, маршрутів з ефективним використанням палива та часу прибуття з урахуванням багатьох факторів як, наприклад, вітер та обмеження повітряного простору. Взагалі оптимізовані ФНЧ забезпечують виправлення відхилення від запланованої траєкторії польоту шляхом постійного коригування навігаційного рішення на основі оновлень датчиків у реальному часі. Ця динамічна корекція курсу гарантує, що літак залишається на траєкторії та дотримується запланованого маршруту, мінімізуючи відхилення та оптимізуючи споживання палива. Взагалі фільтри низьких частот у системі керування польотом FMS стійкі до коливань якості даних датчиків, умов навколишнього середовища та робочих сценаріїв. Вони призначені для адаптивного налаштування параметрів фільтра на основі

динамічних характеристик середовища польоту, забезпечуючи надійну навігаційну роботу в різноманітних умовах.

Підводячи підсумок, оптимізовані фільтри низьких частот є незамінними компонентами системи керування польотом FMS. Загалом вони забезпечують зменшення шуму, згладжування сигналу, об'єднання датчиків, обчислення навігації, системну інтеграцію та можливості оптимізації продуктивності. А також вони відіграють велику роль у забезпеченні надійності, точності та ефективності навігації літака та керування польотом.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи була розглянута тема важливості фільтрів низьких частот в системах авіоніки та приведені теоретичні дані задля створення оптимізованого фільтру низьких частот.

Авіоніка та електронні системи, що використовуються в літаках, мають вирішальне значення для забезпечення безпеки, навігації, зв'язку, надійності та продуктивності. Одними із важливих компонентів всіх приймачів та передавачів на літаку є фільтри низьких частот. Вони виконують багато різних корисних функцій, наприклад, забезпечують зменшення шуму, згладжування сигналу, об'єднання датчиків, обчислення навігації, системну інтеграцію, дають можливості оптимізації продуктивності, мінімізують спотворення сигналу та коливань, викликані шумом і перешкодами.

Через те, що в авіоніці підтримка цілісності сигналу має першочергове значення для точного зв'язку, навігації та контролю. Фільтри низьких частот служать незамінними інструментами для послаблення високочастотного шуму та перешкод, гарантуючи, що важливі сигнали залишаються чіткими та надійними серед електромагнітних перешкод, радіочастотних перешкод та інших факторів навколишнього середовища. В повітрі літаки піддаються впливу різних джерел шуму, включаючи електромагнітні перешкоди від бортової електроніки, радіопередачі поблизу та атмосферні збурення. Фільтри низьких частот ефективно пом'якшують ці джерела шуму, покращуючи співвідношення сигнал/шум і підвищуючи точність і надійність критичних систем авіоніки, таких як засоби навігації, радіозв'язок і системи управління польотом.

Взагалі системи авіоніки базуються на чіткій і безперебійній передачі голосу та сигналів даних між літаками, наземними станціями та іншими літаками. Фільтри низьких частот допомагають формувати частотний спектр сигналів зв'язку, мінімізуючи перекриття спектрів і перешкоди, а також забезпечуючи міцні та надійні канали зв'язку, особливо в перевантаженому повітряному просторі та несприятливих погодних умовах.

Системи авіоніки значною мірою покладаються на дані датчиків для управління польотом, навігації та моніторингу. Фільтри низьких частот використовуються в обробці даних датчиків для фільтрації високочастотного шуму, забезпечуючи точні та надійні вимірювання від таких датчиків, як акселерометри, гіроскопи, висотоміри та індикатори повітряної швидкості. Оптимізовані методи фільтрації допомагають отримувати значущу інформацію з даних датчиків, полегшуючи точне керування польотом і навігацію. Окрім зменшення шуму та формування сигналу, фільтри низьких частот сприяють загальній оптимізації та надійності систем авіоніки. Ретельно розробляючи та оптимізуючи такі параметри фільтра, як частота зрізу, нахил і час відгуку,

інженери авіоніки можуть адаптувати фільтри до конкретних вимог застосування, збалансовуючи продуктивність, складність і обмеження ресурсів для досягнення оптимальної роботи системи та довговічності.

Фільтри низьких частот є незамінними компонентами сучасних систем авіоніки, що сприяють безпеці, надійності та продуктивності в комерційних, військових і загальних застосуваннях авіації. Ефективно послаблюючи шуми, усуваючи перешкоди та формуючи спектр сигналу, фільтри низьких частот відіграють вирішальну роль у забезпеченні чіткого зв'язку, точної навігації та точного керування польотом у складному та вимогливому середовищі авіації.

У галузі, де безпека має першочергове значення, актуальність фільтрів низьких частот в авіоніці неможливо переоцінити. Оскільки авіація продовжує розвиватися, прогрес у конструкції та оптимізації фільтра низьких частот залишатиметься важливим для того щоб задовольняти постійно зростаючі вимоги до безпеки, ефективності та надійності бортових систем.

Також в кваліфікаційній роботі були розглянуті та порівняні такі оптимізовані фільтри низьких частот як: фільтр Баттерворта, фільтр Чебишева I роду, фільтр Чебишева II роду та еліптичний фільтр. Результатом порівняння стали висновки та застосування таких фільтрів в авіоніці.

У висновок можна сказати декілька слів про ці оптимізовані фільтри низьких частот. Фільтр Баттерворта має максимально плоску амплітудно-частотну характеристику у смузі пропускання, тобто без брижі та забезпечує поступовий спад амплітуди у смузі загородження. Беручи до уваги ці факти, фільтр Баттерворта підходить для випадків, коли потрібна гладка передача сигналу без брижі в смузі пропускання. Щодо фільтра Чебишева I роду можна сказати те, що він має бриж у смузі пропускання, але забезпечує більш крутий спад у смузі загородження порівняно з фільтром Баттерворта. Бриж може бути контрольована та задана при проектуванні. Взагалі фільтр Чебишева I роду можна використовувати при умовах, де допускаються невеликі варіації амплітуди у смузі пропускання, але потрібен різкіший перехід до смуги загородження.

А ось фільтр Чебишева II роду має бриж у смузі загородження, але смуга пропускання є максимально плоскою (без брижів). Спад амплітуди в смузі загородження може бути крутішим, ніж у фільтра Чебишева I роду. Фільтр краще використовувати у тих ситуаціях, де критично важливо мінімізувати бриж у смузі пропускання, але допустимі варіації у смузі загородження. Як ми бачимо еліптичний фільтр має бриж як у смузі пропускання, так і в смузі загородження. Тобто забезпечує найкрутіший спад амплітуди у смузі загородження порівняно з іншими типами фільтрів при заданому порядку фільтра. Використання еліптичного фільтра підходить для тих випадків, коли

потрібен дуже різкий перехід між смугою пропускання і смугою загородження, навіть якщо це тягне за собою наявність брижі в обох смугах.

В підсумок кваліфікаційної роботи можна сказати, що оптимізований фільтр низьких частот потрібно вибирати під вимоги, яких потрібно досягти, враховуючи переваги та недоліки кожного з вищеописаних фільтрів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. J. Orfanidis, Introduction to Signal Processing, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
2. J. H. McClellan, T. W. Parks, and L. R. Rabiner, "A computer program for designing optimum FIR linear phase digital filters," IEEE Trans. Audio Electroacoust. AU-21, 506-526, 1973.
3. R. Lyons, "Interpolated narrowband lowpass FIR filters," IEEE Signal Proc. Mag., pp. 50-57, January, 2003.
4. N. J. Fliege, Multirate Digital Signal Processing, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 1994.
5. T. Saramaki, "A class of FIR Nyquist (Nth-band) filters with zero intersymbol interference," IEEE Trans. Circuits Syst. CAS-34, pp. 1182-1190, 1987.
6. O. Hermann, and H. W. Schussler, "Design of non-recursive digital filters with minimum phase," Electron. Lett. 6, pp. 329-330, 1970.
7. Ricardo A. Losada, "Practical FIR Filter Design in MATLAB", The MathWorks, Inc., pp. 6-20, 2004.