

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІМ. О.С. ПОПОВА

Кафедра телебачення та радіомовлення

**Методичні вказівки до курсового проектування з курсу
“Цифрова обробка сигналів”**

ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

для студентів ННІ РТІБ

**Напрямок підготовки: 6.050901 “Радіотехніка”
Модуль 1**

Одеса 2015

Рецензент: **Баляр В.Б.**

Укладачі: **Ошаровська О.В., Неграй О.В., Патласенко М. О., Мазуркевич О.Ф.**

Методичні вказівки містять короткі теоретичні відомості щодо існуючих класів цифрових фільтрів та методів їх проектування, а також настанови щодо виконання курсової роботи з курсу “Цифрова обробка сигналів” з поясненням окремих етапів розрахунку та визначенням вимог до оформлення відповідного графічного матеріалу та результатів розрахунку. Наведено 25 варіантів індивідуальних завдань з курсової роботи для двох груп окремо, які дозволяють набути навичок з проектування та дослідження часових і спектральних характеристик цифрових СІХ- та НІХ-фільтрів.

Методичні вказівки призначено студентам усіх форм навчання за напрямом “Радіотехніка” для здобуття практичних знань студентами, які вивчають дисципліни “Цифрова обробка сигналів”, а також можуть бути корисними студентам, що навчаються за спеціальністю “Апаратура радіозв’язку, радіомовлення та телебачення” ОНАЗ ім. О.С. Попова при виконанні завдань з курсів “Аудіовізуальні та мультимедійні системи”, “Новітні аудіовізуальні та мультимедійні технології” і під час дипломного проектування.

СХВАЛЕНО

на засіданні кафедри телебачення та радіомовлення
і рекомендовано до друку.
Протокол № 4 від 28.11.2014 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

методичною радою
ОНАЗ ім. О.С. Попова
Протокол № 3 від 24.03.2015 р.

Підписано до друку

Формат 60/88/16 Зам. №

Тираж 50 прим. Обсяг 2,0 ум. друк. арк.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO

у друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова

ОНАЗ, 2015

ЗМІСТ

С.	
ВСТУП.....	4
СКОРОЧЕННЯ.....	4
1 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	5
2 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	7
3 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	7
3.1 Вступ.....	7
3.2 Проектування цифрового СІХ-фільтра нижніх частот методом частотних вибірок для радіотехнічних застосувань.....	7
3.3 Проектування цифрового НІХ-фільтра методом білінійного z -перетворення для радіотехнічних застосувань.....	15
4 ВИСНОВКИ.....	22
5 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	23
Додаток А. Індивідуальні варіанти курсової роботи.....	24
Додаток Б. Приклад титульної сторінки до курсової роботи.....	30
Додаток В. Розробка цифрових фільтрів у MATLAB за допомогою графічного середовища "Filter Design and Analysis Tool".....	31

ВСТУП

Дисципліна “Цифрова обробка сигналів” викладається у 1-му семестрі студентам третього курсу очної та заочної форм навчання, які навчаються за напрямом 6.050901 “Радіотехніка”. Методи та алгоритми розв’язання інженерних задач, що надані в цих методичних вказівках, можуть бути використані студентами, які вивчають дисципліни “Цифрова обробка сигналів”, “Аудіовізуальні та мультимедійні системи”, “Новітні аудіовізуальні та мультимедійні технології” під час дипломного проектування та ін.

Метою дисципліни “Цифрова обробка сигналів” є формування знань з основ цифрового оброблення сигналів: математичний апарат цифрового оброблення сигналів, дискретизація, квантування, цифрове кодування, одновимірна та багатовимірна скалярна та векторна згортка, кореляція, фільтрація, скорочення надмірності, реставрація, покращення та оптимізація представлення аудіовізуальної інформації, використання ЦОС для математичного моделювання, апаратного та програмного забезпечення у системах зв’язку, мовлення, комп’ютерних комплексах, системах відтворення інформації та інших.

Метою цих методичних вказівок є надання пояснень щодо існуючих класів цифрових фільтрів, методів їх проектування та дослідження їх часових і спектральних характеристик на базі пакетів DSP, Simulink, що є частиною Matlab.

Курсове завдання містить 25 варіантів, що не повторюються, для двох груп окремо. Студент за вказівкою викладача вибирає завдання згідно з номером прізвища студента у списку групи.

СКОРОЧЕННЯ

Для цілей цих методичних вказівок використані наступні скорочення.

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика фільтра

ДПФ – дискретне перетворення Фур’є

ЗДПФ – зворотне дискретне перетворення Фур’є

НІХ – фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою

СІХ – фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою

ФЧХ – фазочастотна характеристика фільтра

ЦОС – цифрова обробка сигналів

КУРСОВА РОБОТА з дисципліни “Цифрова обробка сигналів” на тему: “ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ”

Мета: набуття практичних навичок розв’язання інженерних задач під час проектування цифрових фільтрів для використання в радіотехнічних системах, зокрема у системах радіомовлення та цифрового телебачення.

1 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Структурними елементами курсової роботи є:

1. Титульний лист.
2. Зміст.
3. Вступ.
4. Розділи основної частини.
5. Висновки.
6. Рекомендована література.

Курсова робота повинна мати такі розділи:

- 1 Вступ.
- 2 Проектування цифрового СІХ-фільтра нижніх частот методом частотних вибірок в радіотехнічних системах.
- 3 Проектування цифрового НІХ-фільтра методом білінійного z -перетворення в радіотехнічних системах.
- 4 Висновки.
- 6 Використана література.

Пояснювальна записка, в разі, якщо виконується в текстовому редакторі Microsoft Word, має бути виконана шрифтом Times New Roman розміром 14, вирівнювання тексту – по ширині, інтервал одинарний, інтервал перед та після 3 пт., абзацний відступ – 1,25 см, переноси слів мають бути встановлені на режим "Авто" з шириною зони переносу слів 0,25 см.

Курсова робота оформлюється друкованим способом з використанням комп'ютера та принтера на паперовому носії. Текст роботи повинен бути набраний в текстовому редакторі “Microsoft Word” з наступними параметрами: розмір (формат) паперу - А4 (21,0 см х 29,7 см); береги: верхнє - 2,0 см; нижнє - 2,0 см; ліве - 2,5 см; праве - 1,5 см.

При рукописному способі написання використовується паста одного кольору (чорного, синього або фіолетового). Щільність тексту повинна бути рівномірною. *Вписувати* в текст слова, формули, умовні знаки допускається тільки одним кольором з текстом при одній і тій самій щільності.

Титульний лист є *першим* листом курсової роботи і заповнюється за прикладом, наведеним у додатку Б.

Кожний розділ курсової роботи, який відповідає окремому завданню, слід починати з нового аркуша. Заголовки розділів друкуються симетрично тексту

прописними літерами. Заголовок підрозділів друкується з абзацу, малими літерами, крім першої великої. Перенесення слів у заголовках не допускаються. Крапку в кінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох речень, їх розділяють крапкою.

Слова-заголовки відповідного розділу роботи друкуються на окремому рядку прописними літерами жирним шрифтом (**ЗМІСТ, ВСТУП, ВИСНОВКИ**). Підкреслення заголовка не допускається.

Сторінки нумерують арабськими цифрами у верхньому колонтитулі справа. Титульний лист включається в загальну нумерацію роботи. На титульному листі номер не ставиться. Нумерація сторінок повинна бути наскрізною.

Розділи курсової роботи повинні мати порядкову нумерацію в межах усієї роботи і позначатися цифрами з крапкою в кінці. Вступ і висновки не нумеруються.

Якщо розділи поділяються на підрозділи, то вони нумеруються арабськими цифрами в межах кожного розділу. В кінці назви підрозділу крапка не ставиться, наприклад “3.2 Назва другого підрозділу третього розділу”.

Ілюстрації розміщують після першого посилання на них. Ілюстрації позначаються словом “Рисунок” і нумеруються послідовно арабськими цифрами в межах *розділу*. **Номер повинен складатися з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, розділених крапкою**, наприклад “Рисунок 1.2 - Назва другого рисунку першого розділу”.

Таблиці нумеруються послідовно арабськими цифрами в межах розділу. Перед таблицею вказується її найменування. У лівому верхньому куті над відповідним найменуванням міститься напис “Таблиця” із зазначенням її номера та назви. Номер повинен складатися з номера розділу і порядкового номера таблиці, розділеного крапкою, наприклад “Таблиця 1.2 - Назва другої таблиці першого розділу”. При перенесенні частини таблиці на інший лист вказують над нею, наприклад, “Закінчення табл. 1.2” (якщо на цьому листі розташовано закінчення таблиці) або “Продовження табл. 1.2” (якщо на цьому листі розташовано лише частину таблиці та її продовження розташовано на наступних листах). На всі таблиці повинні бути посилання в тексті.

Нумерація формул має бути наскрізною арабськими цифрами.

Посилання в тексті на джерела беруться у квадратні дужки із зазначенням номера, що відповідає списку літератури та сторінки із джерела посилання. Посилання оформлюється згідно з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 “Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання”.

Курсові роботи, що не відповідають наведеним вище вимогам на перевірку не приймаються. Курсові роботи, що містять ідентичні текстові та розрахункові фрагменти, розглядаються як виконані не самостійно та будуть повертатись з заміною завдання.

2 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

2.1 Вступ

2.2 Проектування цифрового СІХ-фільтра нижніх частот методом частотних вибірок для радіотехнічних застосувань

Відповідно до індивідуального варіанта (таблиці А.1, А.4 додатка А):

- а) виконати синтез АЧХ та ФЧХ СІХ-фільтра;
- б) знайти імпульсний відгук фільтра та значення коефіцієнтів фільтра;
- в) скласти структурну схему синтезованого СІХ-фільтра;
- г) Дослідити відгук синтезованого СІХ-фільтра на вхідну послідовність відліків $x(n)$.

2.3 Синтез цифрового НІХ-фільтра методом білінійного z -перетворення для радіотехнічних застосувань

Відповідно до індивідуального варіанта (таблиці А.2–А.3 та А.5–А.6 додатка А):

- а) обчислити передавальну функцію $H(z)$ НІХ-фільтра;
- б) знайти значення коефіцієнтів фільтра;
- в) побудувати АЧХ НІХ-фільтра, привести різницеве рівняння, яке описує фільтр;
- в) скласти структурну схему синтезованого НІХ-фільтра.

2.4 Висновки

3 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

3.1 Вступ

У вступі мають бути надані основні відомості щодо класів цифрових фільтрів, переваги цифрової фільтрації, застосування методів цифрової фільтрації в радіотехніці. У якості застосування методів цифрової фільтрації можна надати приклад формування частотних піддіапазонів звукового сигналу при цифровій звуковій обробці сигналів або приклад змінення частотного спектру звукового сигналу в графічних цифрових еквайзерах тощо. Для цього можуть бути використані посилання [1–3] або будь-яка інша література, яку запропоновано викладачем.

3.2 Проектування цифрового СІХ-фільтра нижніх частот методом частотних вибірок для радіотехнічних застосувань

Цифрові фільтри є класом лінійних дискретних систем, що здійснюють обробку сигналу в часовій області і змінюють спектральний склад сигналу. Зміни спектрального складу полягають у подавленні небажаних з точки зору прикладного завдання спектральних компонент вхідного сигналу. Наприклад, в сучасних системах звукового оточення для подавлення шумів використовують процедуру цифрової попередньої фільтрації або в акустичних системах класу *hi-fi* вводять вирівнюючий фільтр для компенсації нелінійності частотної характеристики гучномовців.

Цифрові СІХ-фільтри можуть бути реалізовані різними шляхами – комп'ютерною програмою, програмованим апаратним сигнальним процесором

або інтегральною схемою. Загальна структурна схема СІХ-фільтра показана на рис. 3.1.

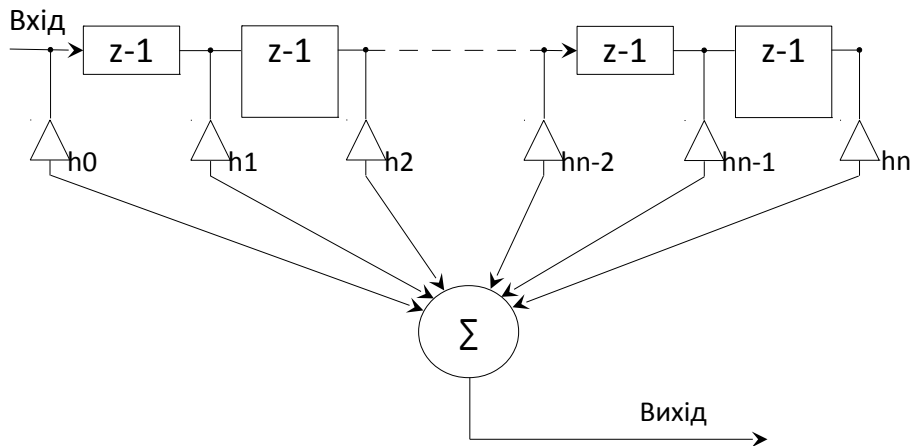


Рисунок 3.1 – Структурна схема СІХ-фільтра у вигляді ліній затримки з відведеннями

Передавальна функція СІХ-фільтра є z -перетворенням кінцевої послідовності коефіцієнтів його імпульсної характеристики $h(k)$ і в загальному вигляді може бути записана як:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} = h(0) + h(1)z^{-1} + h(2)z^{-2} + \dots + h(N-1)z^{-(N-1)}$$

де $k=0,1,\dots,N-1$; N – порядок фільтра.

Результатом проектування будь-якого СІХ-фільтра є значення його коефіцієнтів, кількість яких збігається з порядком фільтра. Метод проектування СІХ-фільтрів за допомогою частотних вибірок можна умовно розбити на 2 етапи:

1. Завдання частотних вибірок дискретної АЧХ СІХ-фільтра $H(m)$ на інтервалі $(0, f_d)$, де f_d – частота дискретизації вхідного сигналу.

2. Виконання ЗДПФ над частотними вибірками заданої дискретної АЧХ $H(m)$ для отримання коефіцієнтів СІХ-фільтра.

На першому етапі необхідно задати N частотних вибірок на інтервалі $(0, f_d)$ дискретної періодичної АЧХ з періодом рівним f_d , де N – порядок фільтра. При цьому k з цих вибірок є одиничними і відповідають смузі пропускання проектованого фільтра.

На рис. 3.2 наведений приклад дискретної періодичної АЧХ СІХ-фільтра 32-го порядку (далі в усіх викладках буде використано саме приклад СІХ-фільтра 32-го порядку). Як можна бачити з рис. 3.2 вибірку відліків АЧХ виконують через інтервал частот рівний $(kf_d)/N$, де $k=0,1,\dots,N-1$. Частота перерізу фільтра в даному прикладі відповідає вибірці $H(3)$ та дорівнює $(3f_d)/32$. Вибірки АЧХ СІХ-фільтра приймають на інтервалі $(0, f_d)$ наступні значення:

$$\begin{aligned} H(0) &= H(3) \text{ ці } H(27) = 1 \\ H(4) &= H(27) \text{ ці } H(28) = 1 \\ H(28) &= H(31) \text{ ці } H(31) = 1 \end{aligned}$$

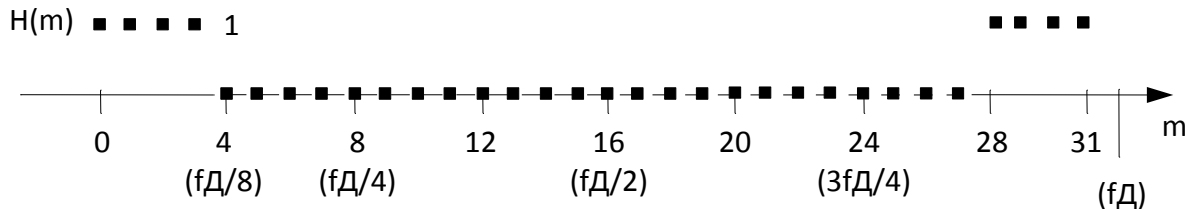


Рисунок 3.2 – Дискретна АЧХ заданого СІХ-фільтра $H(m)$

СІХ-фільтри мають дуже важливу властивість: **значення коефіцієнтів фільтра є значеннями відліків його імпульсної характеристики**. Отже, СІХ-фільтр може бути однозначно заданий як коефіцієнтами імпульсної характеристики в часовій області, так і коефіцієнтами ДПФ імпульсної характеристики у спектральній області. Таким чином, виконання ЗДПФ над вибірками заданої дискретної АЧХ дозволить нам отримати відліки імпульсної характеристики фільтра, яка і дасть значення коефіцієнтів проєктованого фільтра:

$$h(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} H(m) e^{j \frac{2\pi m k}{N}} \quad (1)$$

де $h(k)$ – відліки імпульсної характеристики; $H(m)$ – відліки заданої АЧХ-фільтра; N – порядок фільтра.

Приклад дискретної імпульсної характеристики $h(k)$, отриманої в Matlab із застосуванням ЗДПФ, наведено на рис. 3.3.

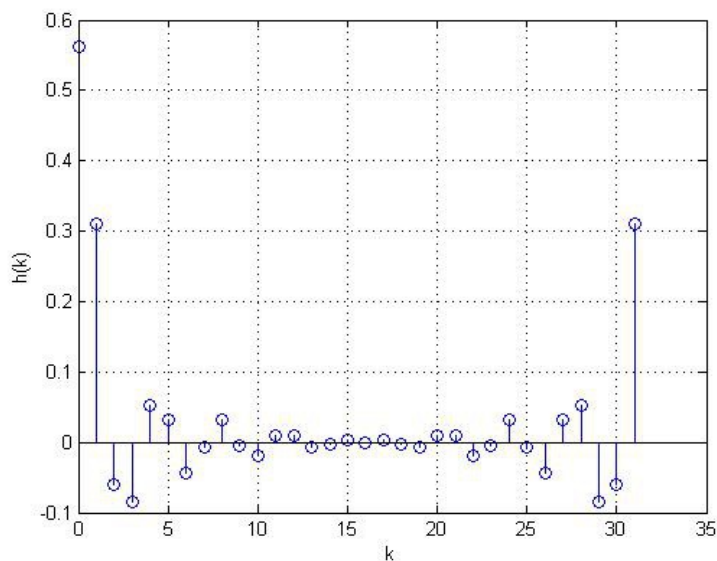


Рисунок 3.3 – Дискретна імпульсна характеристика фільтра

Оскільки отримана імпульсна характеристика є періодичною функцією часу, то виконуючи її зсув вправо на $(N-1)/2=15$ відліків й опускаючи коефіцієнт $(N-1)=h(31)$, можна отримати імпульсну характеристику симетричну відносно свого максимального значення, форма якої описується функцією виду $\sin(x)/x$. Даний зсув у часовій області проявляється в частотній області тільки як лінійний фазовий зсув, без зміни модуля спектра, тобто без зміни АЧХ фільтра. Втрата одного коефіцієнта $h(31)$ також не приведе до зміни АЧХ фільтра. Результуюча імпульсна характеристика СІХ-фільтра, яка містить 31 коефіцієнт та має парну симетрію наведена на рис. 3.4.

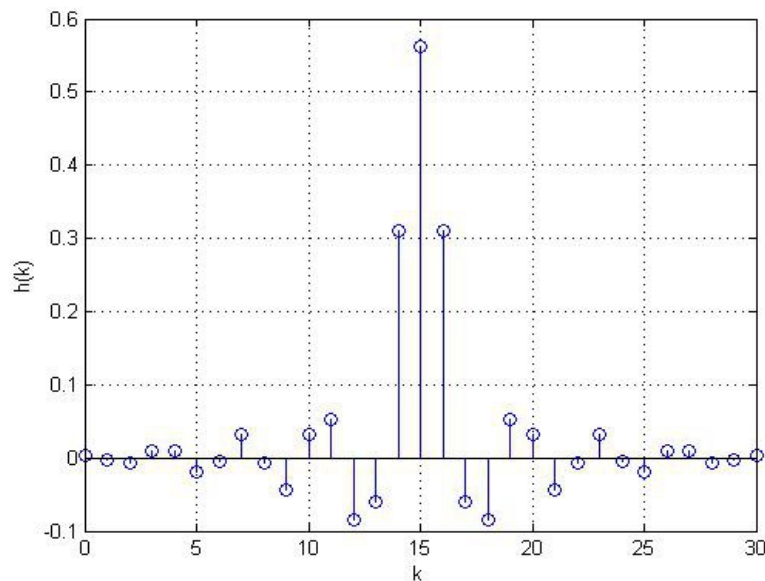


Рисунок 3.4 – Симетрична імпульсна характеристика СІХ-фільтра

Оскільки імпульсна і частотна характеристики пов'язані один з одним парою перетворень Фур'є, то реальна частотна характеристика фільтра $H_p(m)$ може бути визначена за допомогою ДПФ узятого від симетричної імпульсної характеристики $h(k)$:

$$H(j\omega) = H_\delta(m) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) e^{-j2\pi mk/N} \quad (2)$$

Таким чином, використовуючи перетворення (2), можна визначити АЧХ синтезованого фільтра як модуль розрахованих комплексних відліків $H_p(m)$:

$$H(\omega) = 20 \lg |H(j\omega)|, \quad (3)$$

де $H(\omega)$ – АЧХ СІХ-фільтра, виражена в дБ.

При виконанні курсової роботи кількість точок перетворення Фур'є N при обчисленні $H_p(m)$ має перевищувати порядок фільтра у два рази. Це означає, що якщо порядок фільтра відповідно до індивідуального завдання дорівнює 32, а довжина $h(k)$ дорівнює 31, то при проведенні розрахунків $H_p(m)$ змінна k буде приймати значення від 0 до 63. Для цього до $h(k)$ необхідно додати відповідну кількість нулів.

На рис. 3.5 надано АЧХ СІХ-фільтра, яка відповідає імпульсній характеристиці з рис. 3.4.

З рисунку видно, що отримана результуюча АЧХ фільтра проходить через точки вибірки відліків частотної характеристики у смузі пропускання своєї дискретної версії $H(m)$ (див. рис. 3.2) та є інтерполяцією значень дискретної АЧХ фільтра. Проте ця АЧХ має низку недоліків. Найбільшим недоліком з них є малий рівень подавлення в смузі затримки (як можна бачити з рис. 3.5 він складає 20-25 дБ).

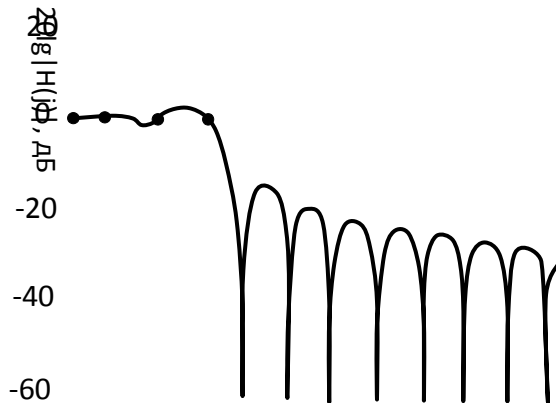


Рисунок 3.5 – АЧХ СІХ-фільтра на інтервалі $(0, f_d)$

Іншим важливим недоліком є викид або пульсація АЧХ на межі смуги пропускання і смуги затримки. Цей викид проявляється в результаті явища Гіббса. Це явище спостерігається в тих випадках, коли деяка функція, в нашому випадку $H(m)$, яка має розриви (перехід з 1 в 0 та навпаки), піддається перетворенню Фур'є. Викиди і пульсації проявляються до та після точок розриву, тобто на межі смуги пропускання і перехідної смуги (якщо вона є) АЧХ фільтра. Єдиним способом збільшити затухання в смузі затримки є розширення перехідної смуги. Добитися розширення перехідної смуги можна вибравши відлік частотної характеристики на межі між смугою пропускання і смугою затримки, при цьому значення цього відліку має відрізнятися від 0 та 1. Приклад АЧХ із відліком, який має значення 0,5, наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 – Дискретна характеристика $H(m)$ із відліком в перехідній смузі

Вибірки з АЧХ $H(m)$ приймають на інтервалі $(0, f_d)$ наступні значення:

$$H(0) \approx H(3) \quad \text{і} \quad H(4) = 0,5$$

$$H(4) = 0,5$$

$$H(5) \approx H(26) \quad \text{і} \quad H(27) = 0,5$$

$$H(27) = 0,5$$

$$H(28) \approx H(31) \quad \text{і} \quad H(32) = 0,5$$

Амплітудно-частотна характеристика СІХ-фільтра з відліком у перехідній смузі надана на рис. 3.7.

Порівнюючи АЧХ СІХ-фільтрів, наведених на рис. 3.5 та 3.7, можна зробити висновок, що вибір відліку частотної характеристики зі значенням 0,5 призводить до збільшення рівня подавлення в смузі затримки, а також до усунення викиду АЧХ на межі смуг пропускання і перехідної смуги (явище Гіббса), проте при цьому відбувається розширення перехідної смуги АЧХ приблизно в 2 рази.

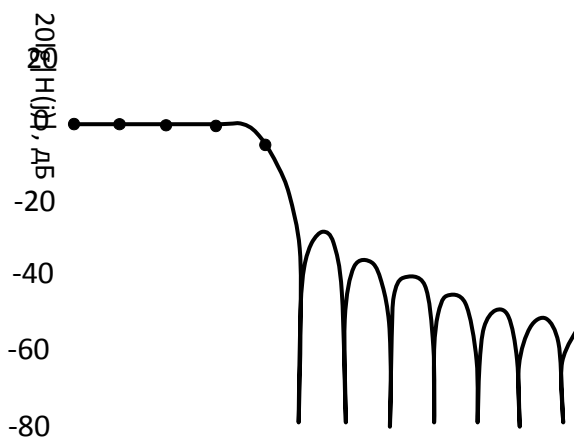


Рисунок 3.7 – АЧХ СІХ-фільтра на інтервалі $(0, f_d)$ з відліком у перехідній смузі

Під час виконання курсової роботи використати описаний вище підхід з відліком частотної вибірки в перехідній смузі АЧХ, значення цього відліку прийняти рівним 0,5.

До недоліків цього методу синтезу СІХ-фільтрів слід віднести неможливість точного визначення частоти зрізу фільтра (граничної частоти смуги пропускання), а також граничної частоти смуги затримки.

Додаткового розгляду вимагає також ФЧХ СІХ-фільтра, яка в смузі пропускання фільтра має змінюватись за лінійним законом. Це означає що вихідний сигнал фільтра не піддається фазовим спотворенням та усі частотні компоненти вхідного сигналу фільтра затримуються на його виході на однаковий час, рівний груповій затримці G , яка визначається як похідна ФЧХ узята зі зворотним знаком:

$$G = - \frac{\varphi(\omega)}{\omega}. \quad (4)$$

Фазочастотна характеристика є аргументом комплексних відліків відомої частотної характеристики $H_p(m)$ та обчислюється як арктангенс відношення уявної частини до дійсної частини:

$$\varphi(m) = \arctg \left(\frac{\operatorname{im}(H_p(m))}{\operatorname{real}(H_p(m))} \right) \quad (5)$$

Приклад ФЧХ СІХ-фільтра 32 порядку, обчисленої за виразом (5) наведено на рис. 3.8.

З рис. 3.5 видно, що ФЧХ у відповідній смузі пропускання фільтра має безліч розривів значень кутів, які лежать в діапазоні $(-\pi/2; \pi/2)$. Ці розриви в значеннях кутів викликані властивостями функції арктангенса, згідно з якими функція повертає значення кутів з діапазону $(-\pi/2; \pi/2)$, який охоплює тільки праву частину одиничного кола комплексної площини. До значень кутів з діапазону $(-\pi/2; 3\pi/2)$, які знаходяться в лівій частині одиничного кола комплексної площини, автоматично додається π радіан (180°) для їх відображення на праву частину площини в діапазон $(-\pi/2; \pi/2)$.

Для того, щоб отримати вірні значення кутів у діапазоні $(-\pi/2; \pi/2)$ необхідно віднімати 180° від кутів, які лежать у діапазоні $(-\pi/2; 3\pi/2)$. Таким чином, можна отримати вірні значення фазових кутів які знаходяться в інтервалі $(-\pi; \pi)$ та усунути розриви в значеннях фазових кутів. Продемонструємо процес усунення розривів в значеннях фазових кутів на прикладі.

Нехай при обчисленні арктангенса отримано наступні значення фазових кутів (перші 12 кутів рис. 3.8): $\varphi(m)=[0, -84,375; 11,25; -73,125; 22,5; -61,875; 33,75; -50,625; 45; -39,375; 56,25; -28,125]$.

Перші два кути не вимагають змін своїх значень, оскільки вони розташовані в правій частині одиничного кола. Інші кути мають знаходитись в лівій частині одиничного кола, в третій і другій чверті кола, завершуючи його обхід за годинниковою стрілкою. Таким чином, від цих значень кутів необхідно відняти 180° для отримання їх вірних значень:

$$\varphi(0) = 0,$$

$$\varphi(1) = -84,375,$$

$$\varphi(2) = 11,25 - 180 = -168,75,$$

$$\varphi(3) = -73,125 - 180 = -253,125.$$

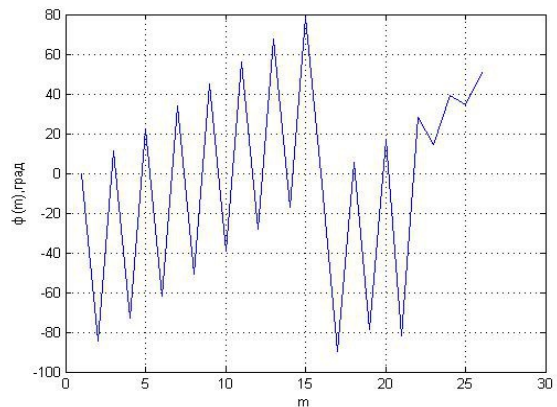


Рисунок 3.8 – ФЧХ СІХ-фільтра з розривами в значеннях фазових кутів

Наступні два значення $\varphi(4)$ та $\varphi(5)$ розташовані в правій частині одиничного кола проте вони відносяться вже до іншого обходу одиничного кола, тому від їх значень необхідно відняти 360° :

$$\begin{aligned}\varphi(4) &= 22,5 - 360 = -337,5, \\ \varphi(5) &= -61,875 - 360 = -421,875.\end{aligned}$$

Кути $\varphi(6)$ та $\varphi(7)$ знаходяться в лівій частині кола, отже, з урахуванням другого обходу одиничним колом від їх значень необхідно відняти $180^\circ + 360^\circ = 540^\circ$:

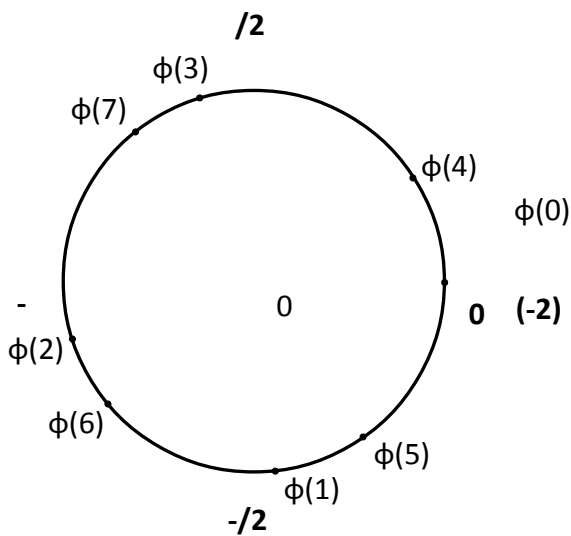
$$\begin{aligned}\varphi(6) &= 33,75 - 540 = -506,25, \\ \varphi(7) &= -50,625 - 540 = -540,625.\end{aligned}$$

Для кутів $\varphi(8)$ та $\varphi(9)$, які відносяться до 3 обходу вздовж одиничного кола відповідно можна записати:

$$\begin{aligned}\varphi(8) &= 45 - 360 \times 2 = -675, \\ \varphi(9) &= -39,375 - 360 \times 2 = -759,375.\end{aligned}$$

Для кутів $\varphi(10)$ та $\varphi(11)$ відповідно:

$$\begin{aligned}\varphi(10) &= 56,25 - (720 + 180) = -843,75, \\ \varphi(11) &= -28,125 - (720 + 180) = -928,125.\end{aligned}$$



Положення перших восьми кутів на одиничному колі наведено на рис. 3.9, результуюча ФЧХ, визначена описаним способом, наведена на рис. 3.10.

Обчислення вірних фазових кутів необхідно виконувати до першого кута, значення якого буде дорівнювати нулю, що позначить перший реальний розрив ФЧХ і перехід ФЧХ в смугу затримки.

Рисунок 3.9 Положення кутів $\varphi(0) \dots \varphi(7)$ на одиничному колі

Послідовне віднімання від значень ФЧХ кутів кратних 360° (360° , 720° , 1080° , 1440° або 2π , 4π , 6π , 8π) відповідає обходу одиничним колом у напрямку за годинниковою стрілкою цілу кількість разів. Таким чином, до першого нуля, який вказує на кінець смуги пропускання та початок смуги затримання, значення ФЧХ є від'ємними та зменшуються за лінійним законом (рис. 3.10).

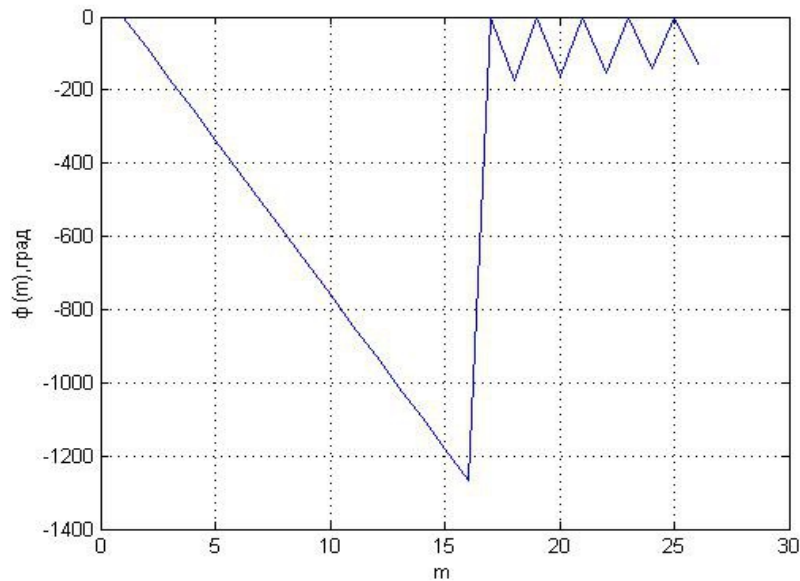


Рисунок 3.10 – Лінійна ФЧХ СІХ-фільтра

Фазочастотні характеристики на рис. 3.8 та 3.10 наведені в діапазоні $(0, f_d/2)$, оскільки ФЧХ має непарну симетрію. Отже, якщо порядок фільтра дорівнює 32, а кількість коефіцієнтів частотної характеристики $H_p(m)$ складає 64, то є достатнім обчислити тільки перші 32 значення кутів ФЧХ.

Цифровий СІХ-фільтр є лінійною дискретною системою, яка однозначно описується своєю імпульсною характеристикою, що дозволяє визначити відгук фільтра $y(n)$ за допомогою операції дискретної згортки вхідної послідовності відліків $x(n)$ й імпульсної характеристики $h(k)$. Операцію дискретної згортки описують наступним виразом:

$$y(n) = x(n) * h(k) = \sum_{k=0}^{P+N-1} h(k)x(n-k), \quad (6)$$

де P – кількість відліків вхідної послідовності $x(n)$; N – кількість коефіцієнтів імпульсної характеристики фільтра.

Виходячи з опису дискретної згортки процес знаходження відгуку фільтра $y(n)$ полягає в наступному: необхідно виконати інвертування слідування відліків $x(n)$ вхідної послідовності і їх наступний зсув відносно коефіцієнтів фільтра $h(k)$, що є еквівалентним подачі інвертованої вхідної послідовності на вхід фільтра (рис. 3.1). Вираз для визначення відгуку носить назву *різницевого рівняння* СІХ-фільтра і повністю описує структуру фільтра, а також ілюструє процес обчислення вихідних відліків:

$$y(n) = h(0)x(n-0) + h(1)x(n-1) + h(2)x(n-2) + \dots + h(N-1)x(n-N+1).$$

Операція дискретної згортки має важливу властивість, яка полягає в наступному: згортка двох сигналів в часовій області еквівалентна добутку їх Фур'є-образів в частотній області. Для СІХ-фільтрів теорему про згортку можна представити наступним чином: ДПФ згортки вхідної послідовності $x(n)$ та імпульсної характеристики фільтра $h(k)$ дорівнює добутку спектру вхідної послідовності $X(m)$ та частотної характеристики фільтра $H_p(m)$:

$$y(n) = h(k) * x(n) \xrightarrow{\text{ДТФ}} H_p(m) \times X(m).$$

3.3 Проектування цифрового НІХ-фільтра методом білінійного z -перетворення для радіотехнічних застосувань

Структурна схема НІХ-фільтра у вигляді ліній затримок з відведеннями наведена на рис. 3.11.

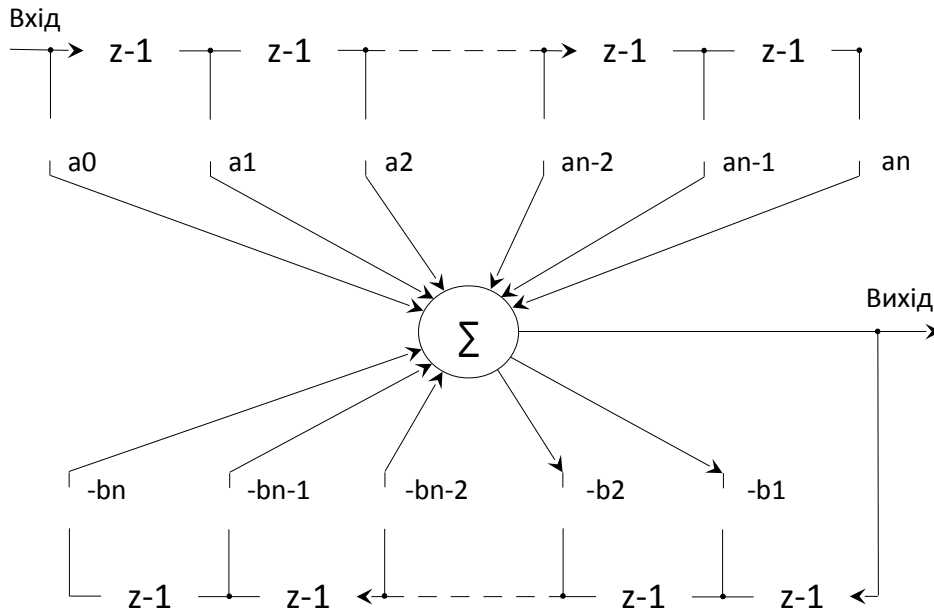


Рисунок 3.11 – Структурна схема НІХ-фільтру

Виконуючи z -перетворення імпульсної характеристики НІХ-фільтра $h(k)$ можна отримати вираз для передавальної функції НІХ-фільтра $H(z)$:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h(k)z^{-k} = \frac{\sum_{k=0}^N b(k)z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^M a(k)z^{-k}}, \quad (7)$$

де $M \geq N$.

Порядок отриманої передавальної функції, а отже і порядок фільтра, визначається максимальним показником коефіцієнту при z в знаменнику (в виразі (7) таким показником є змінна M). Таким чином процес синтезу НІХ-фільтра зводиться до визначення коефіцієнтів фільтра $b(k)$ та $a(k)$ в (7), які забезпечують апроксимацію АЧХ та ФЧХ фільтра.

Найбільш поширеним способом проектування НІХ-фільтрів є метод дискретизації аналогового фільтра що задовольняє встановленим вимогам до його характеристик. Цей метод дозволяє використовувати широко відомі і розроблені методи проектування аналогових фільтрів з різними видами апроксимації, до яких можна віднести фільтри Баттерворта, Чебишева 1 і 2 типів, а також фільтри Золотарева-Кауера.

Існує декілька методів перетворення або дискретизації існуючого аналогового фільтра в еквівалентний йому цифровий фільтр:

- метод відображення диференціалів;
- метод інваріантного перетворення імпульсної характеристики;
- метод білінійного z -перетворення;
- метод узгодженого z -перетворення.

Таким чином, якщо відомі характеристики аналогового фільтра-прототипу, є можливим синтезувати цифровий НІХ-фільтр за допомогою цих методів. Методи синтезу НІХ-фільтрів на основі аналогових фільтрів-прототипів знайшли широке застосування з наступних причин:

- способи розрахунку аналогових фільтрів є відомими та добре опрацьованими, тому є доцільним використовувати вже розвинені для аналогових фільтрів процедури розрахунку;
- багато корисних методів розрахунку аналогових фільтрів мають достатньо прості процедури розрахунку. З цієї причини методи розрахунку НІХ-фільтрів, засновані на таких аналогових розрахункових формулах, також є досить простими.

Перш ніж перейти до розгляду методу білінійного z -перетворення, наведемо опис операторних передавальних функцій, використовуваних для представлення частотних характеристик аналогових фільтрів і на підставі яких можна отримати передавальну функцію $H(z)$ НІХ-фільтра.

3.3.1 Передавальні функції аналогових фільтрів

Операторна передавальна функція аналогового фільтра в s -площині, яка є перетворенням Лапласа від імпульсної характеристики фільтра, описується дробово-раціональною функцією з коефіцієнтами b_i та a_i :

$$H(s) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i s^i}{\sum_{i=0}^N a_i s^i} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_M s^M}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_N s^N}. \quad (8)$$

Змінна s є комплексним числом виду $s = \sigma + j\omega$, де σ – дійсне число, ω – частота в радіанах, а змінну s називають *комплексною частотою*. Коли $\sigma = 0$, то $s = j\omega$ та перехід від операторної передавальної функції $H(s)$ до комплексної передавальної функції $H(j\omega)$ здійснюється шляхом заміни оператора s на $j\omega$.

Введемо також поняття стійкості фільтра, а також опишемо умови за яких фільтр буде стійким. Лінійне електричне коло, а отже і фільтр, називається стійким, якщо при обмеженому вхідному сигналі, вихідний сигнал є затухаючим. Передавальна функція фільтра є відношенням поліномів степенів M та N , отже розкладаючи поліноми в чисельнику і знаменнику операторної передавальної функції на множники, можемо записати:

$$H(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_M s^M}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_N s^N} = \frac{(s - s_{01})(s - s_{02}) \dots (s - s_{0M})}{(s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_N)}. \quad (9)$$

Нулями передавальної функції називаються корні полінома чисельника $(s - s_{01})(s - s_{02}) \dots (s - s_{0M})$, які перетворюють операторну передавальну функцію в нуль.

Полюсами передавальної функції називаються корні полінома знаменника $(s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_N)$, які перетворюють операторну передавальну функцію в безкінечність.

Для виконання умови стійкості необхідно щоб полюси операторної передавальної функції $H(s)$ були або від'ємними, або комплексно-зв'язаними числами з від'ємною дійсною частиною, тобто усі полюси передавальної функції повинні знаходитися в лівій півплощині комплексної площини s .

Найбільш важливим параметром, який описує характеристику передавання фільтра є частотна характеристика загасання $a(\omega)$, технічні вимоги до якої задають графічно (рис. 3.12).

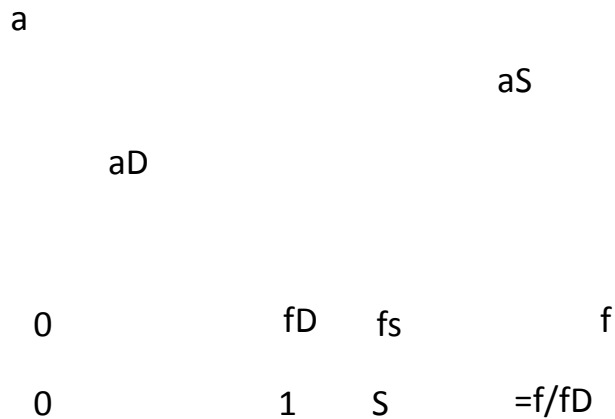


Рисунок 3.12 – Технічні вимоги до функції загасання

Вимоги до характеристики загасання задаються наступними параметрами:

a_D – максимальне значення загасання у смузі пропускання;

a_S – задане мінімальне загасання у смузі затримки;

f_D – гранична частота смуги пропускання (частота зрізу);

f_S – гранична частота смуги затримки;

$\Omega_S = f_S/f_D$ – нормована границя смуги затримки.

Операторна передавальна функція фільтра Золотарева-Кауера 3-го порядку описується виразом:

$$H(s) = C \frac{(s - \alpha_1)(s^2 - 2\alpha_2 s + \gamma_2)}{s^2 + \Omega_{\infty 2}^2},$$

$$\gamma_2 = \alpha_2^2 + \beta_2^2, \quad (10)$$

де C – деяка константа;

$\Omega_{\infty 2}^2$ – полюс передавальної функції $H(s)$;

α_1 – дійсна частина першого нуля передавальної функції $H(s)$;

α_2 – дійсна частина другого нуля передавальної функції $H(s)$;

β_2 – від'ємна частина другого нуля функції $H(s)$.

Частотну характеристику загасання $a(\omega)$ фільтра знаходять шляхом заміни оператора s передавальної функції $H(s)$ на $j\omega$ у виразі: $a(\omega) = 20 \lg |H(j\omega)|$.

Амплітудно-частотна характеристика фільтра відповідно визначається з виразу:

$$H(\omega) = -20 \lg |H(j\omega)| \quad (11)$$

3.3.2 Метод білінійного z -перетворення

Білінійне z -перетворення є процедурою синтезу НІХ-фільтра шляхом перетворення аналогового фільтра в цифровий фільтр, який задовольняє заданим вимогам.

Метод білінійного z -перетворення має наступні властивості:

- дозволяє підставляти деяку функцію z замість функції s в передавальну функцію аналогового фільтра-прототипу $H(s)$ для отримання передавальної функції $H(z)$;
- відображає всю s -площину на z -площину, повністю усуваючи можливі накладання в частотній області;
- вносить нелінійні спотворення частотної осі передавальної функції $H(z)$ відносно передавальної функції аналогового фільтра-прототипу $H(s)$.

Синтез НІХ-фільтра методом білінійного z -перетворення виконують у відповідності з наступними етапами:

- 1) отримати або визначити операторну передавальну функцію аналогового фільтра-прототипу $H(s)$;
- 2) обрати частоту дискретизації фільтра f_d та визначити період дискретизації t_d ;
- 3) підставити у передавальну функцію $H(s)$ замість функції s наступний вираз

$$s = k \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

$$k = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{t_a \omega_c}{2}\right)},$$

де ω_c – частота зрізу АЧХ цифрового фільтра

та отримати передавальну функцію дискретного фільтра $H(z)$;

- 4) виконати множення чисельника та знаменника передавальної функції $H(z)$ на $(1+z^{-1})$ у відповідному ступені та виконати подальші перетворення для отримання $H(z)$ у вигляді

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b(k)z^{-k}}{1 - \sum_{k=0}^M a(k)z^{-k}}.$$

Оскільки операторна передавальна функція аналогового фільтра описується виразом (10), то, на етапах перетворення з 2) по 4), необхідна передавальна функція НІХ-фільтра Золотарева-Кауера 3-го порядку буде описуватись виразом:

$$H(z) = \frac{b(0) + b(1)z^{-1} + b(2)z^{-2} + b(3)z^{-3}}{1 - (a(1)z^{-1} + a(2)z^{-2} + a(3)z^{-3})}. \quad (12)$$

Значення коефіцієнтів фільтра $a(k)$ та $b(k)$ визначаються з наступних виразів:

$$\begin{aligned} b(0) &= \frac{C(k^3 - k^2(2\alpha_2 + \alpha_1) + k(2\alpha_2\alpha_1 + \gamma_2) - \alpha_1\gamma_2)}{k^2 + \Omega_{\infty 2}^2}; \\ b(1) &= \frac{C(-3k^3 + k^2(2\alpha_2 + \alpha_1) + k(2\alpha_2\alpha_1 + \gamma_2) - 3\alpha_1\gamma_2)}{k^2 + \Omega_{\infty 2}^2}; \\ b(2) &= \frac{C(3k^3 + k^2(2\alpha_2 + \alpha_1) - k(2\alpha_2\alpha_1 + \gamma_2) - 3\alpha_1\gamma_2)}{k^2 + \Omega_{\infty 2}^2}; \\ b(3) &= \frac{C(-k^3 - k^2(2\alpha_2 + \alpha_1) - k(2\alpha_2\alpha_1 + \gamma_2) - \alpha_1\gamma_2)}{k^2 + \Omega_{\infty 2}^2}; \\ a(1) = a(2) &= \frac{k^2 - 3\Omega_{\infty 2}^2}{k^2 + \Omega_{\infty 2}^2}, \quad a(3) = -1. \end{aligned}$$

Застосування білінійного перетворення відображує всі полюси, розташовані в лівій частині комплексної площини s у внутрішню частину одиничного кола z -площини (рис. 3.13). Ця властивість забезпечує перетворення будь-якого стійкого фільтра прототипу в s -площині у стійкий полюс НХ-фільтра на z -площині, що означає отримання стійкого цифрового фільтра із стійкого аналогового. Якщо якийсь полюс, розташований в правій частині площини s , розташований поза одиничним колом на z -площині. На розташування нулів передавальної функції $H(z)$, так само як і на розташування нулів передавальної функції $H(s)$, жодних обмежень не накладається через те, що розташування нулів не впливає на стійкість фільтра.

Однією з важливих властивостей білінійного z -перетворення є деформація частотної осі дискретного НХ-фільтра відносно частотної осі фільтра-прототипу. Вираз, який встановлює зв'язок між частотами дискретного і аналогового фільтра-прототипу відповідно, має вигляд:

$$\omega_d = \frac{2}{t_a} \arctg \left(\frac{\omega_a t_a}{2} \right);$$

$$\omega_a = \frac{2}{t_a} \tg \left(\frac{\omega_d t_a}{2} \right).$$

(13) Re [s]

Ці вирази встановлюють зв'язок між частотою ω_d z -площини та частотою ω_a s -площини. Ці частоти пов'язані з частотою дискретизації f_d наступним виразом:

$$f_d = \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{\pi f_a}{f_a} \right).$$

с

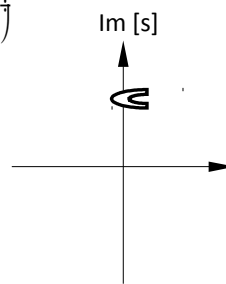


Рисунок 3.13—Процедура переходу з s -площини в z -площину шляхом білінійного z -перетворення

Розглянемо процес синтезу НІХ-фільтра білінійним z -перетворенням на прикладі. В додатку В надано опис графічного середовища fdatool в MATLAB, який є інструментом побудови АЧХ та ФЧХ НІХ-фільтра за розрахованими коефіцієнтами із заданим порядком фільтра. Додаткові відомості щодо синтезу НІХ-фільтрів у середовищі MATLAB описано в [6].

Нехай необхідно синтезувати НІХ-фільтр нижніх частот методом білінійного z -перетворення з частотою зрізу $f_d=9,6$ кГц, частотою дискретизації $f_d=48$ кГц, з заданим максимальним затуханням в смузі затримки $a_s=30,5$ дБ. В якості аналогового фільтра-прототипу будемо використовувати фільтр Золотарева-Кауера третього порядку з наступними значеннями коефіцієнтів передавальної характеристики:

$$C = 3,082672673;$$

$$\Omega_{\infty 2} = 5,116820990;$$

$$\alpha_1 = -2,02241873505;$$

$$\alpha_2 = -0,8496967594;$$

$$\beta_2 = 1,8636578113;$$

$$\Omega_s = 4,445411483.$$

Для отримання необхідної частоти зрізу цифрового фільтра необхідно врахувати нелінійне співвідношення частот цифрового й аналогового фільтрів і заздалегідь виконати спотворення смуги частот аналогового фільтра використовуюваного як прототип. Скориставшись виразами (13), визначимо частоту зрізу аналогового фільтра:

$$\omega_a = \frac{2}{t_a} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_d t_a}{2} \right) = 2f_a \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f_d}{2f_a} \right) = 2 \times 48000 \times \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi \times 9600}{2 \times 48000} \right); \quad f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = 11,101 \text{ кГц}.$$

Гранична частота смуги затримки аналогового фільтра:

$$f_s = f_a \times \Omega_s = 11101 \times 4,445411483 = 49,347 \text{ кГц}.$$

Граничну частоту смуги затримки цифрового фільтра визначимо також з виразів (13):

$$\omega_d = 2f_s \arctg\left(\frac{2\pi f_s t_a}{2}\right) = 2 \times 48000 \times \arctg\left(\frac{2\pi \times 49347}{2 \times 48000}\right), \quad f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = 19,412 \text{ кГц}.$$

Амплітудно-частотна характеристика використаного аналогового фільтра-прототипу Золотарева-Кауера наведена на рис. 3.14. Далі виконуючи білінійне z -перетворення, відповідно до описаних вище етапів, отримуємо вираз для передавальної функції НІХ-фільтра:

$$H(z) = \frac{b(0) + b(1)z^{-1} + b(2)z^{-2} + b(3)z^{-3}}{1 - (a(1)z^{-1} + a(2)z^{-2} + a(3)z^{-3})}.$$

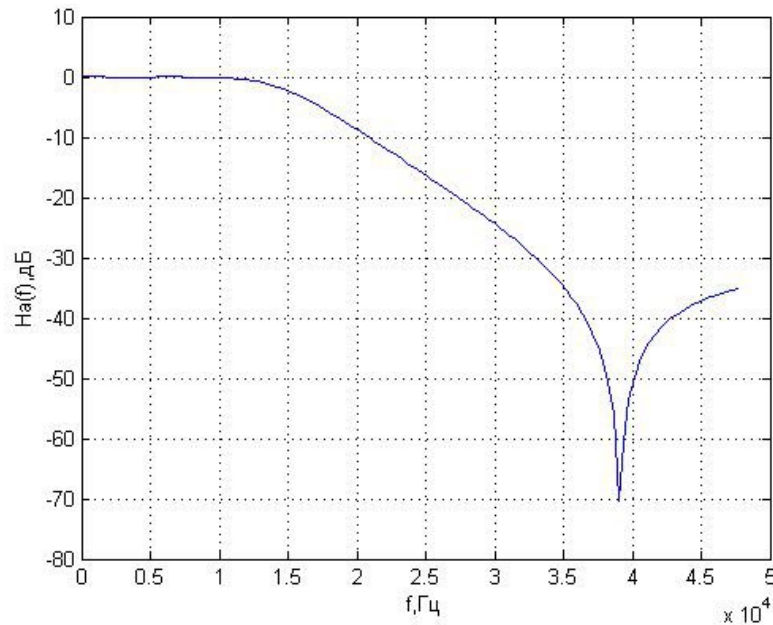


Рисунок 3.14 – АЧХ аналогового фільтра-прототипу з заданими специфікаціями частот

Амплітудно-частотну характеристику НІХ-фільтра $H_d(\omega)$ можна отримати, замінивши оператор z у виразі (12) на експоненту $e^{j\omega}$ та узявши модуль від отриманого виразу:

$$z = e^{j\omega};$$

$$H(z) = H_d(\phi);$$

$$H_d(\omega) = -20 \lg |H_d(j\omega)|.$$

Отримана АЧХ синтезованого НІХ-фільтра наведена на рис. 3.15.

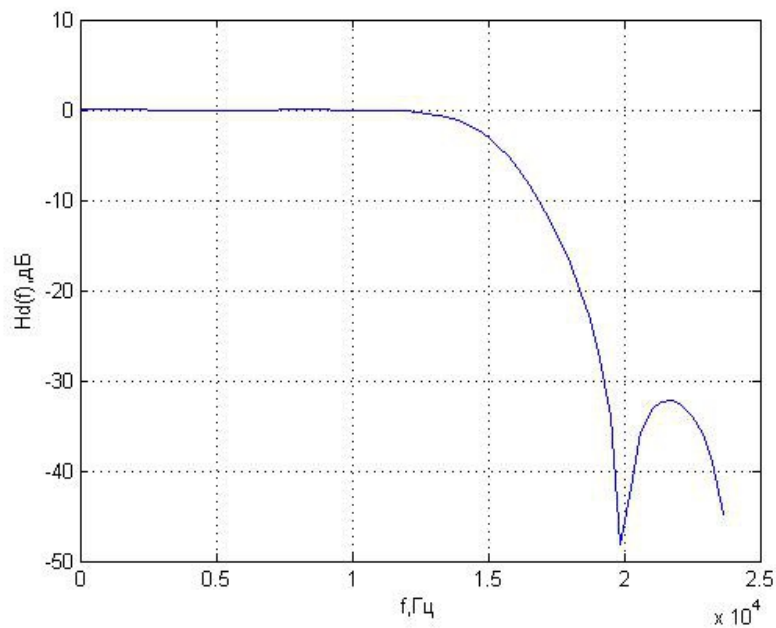


Рисунок 3.15– АЧХ НІХ-фільтра на інтервалі $(0, f_d/2)$

З виразів (13), які встановлюють нелінійний зв'язок між частотами f_d та f_a дискретного та аналогового фільтра можна зробити висновок, що при необмеженому зростанні значень аналогової частоти f_a значення дискретної частоти f_d обмежується значенням, яке дорівнює половині частоти дискретизації $f_d/2 = 24$ кГц (див. рис. 3.15). Ця нелінійність призводить до стиснення за частотою АЧХ аналогового фільтра-прототипу $H_a(f)$ (див. рису. 3.14) при перетворенні її в $H_d(f)$, при цьому найбільше стиснення (див. рис. 3.14 та 3.15) буде спостерігатись на високих частотах, а на низьких частотах деформація буде практично відсутня. Наслідком стиснення АЧХ за частотою є значне зменшення перехідної смуги синтезованого НІХ-фільтра порівняно з його аналоговим прототипом.

4 ВИСНОВКИ

Висновки мають містити інформацію щодо методів, які були використані при синтезі цифрових фільтрів. Відомості щодо доцільності вибору між СІХ- та НІХ-фільтрами для радіотехнічних застосувань. Переваги та недоліки СІХ- та НІХ-фільтрів для вищезазначених застосувань. Для формування висновків можуть бути використані посилання [1, 2, 4, 5] або будь-яка інша література, яку запропоновано викладачем.

5 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Під час виконання курсової роботи може бути використана будь-яка технічна література у напрямі цифрової обробки сигналів. Рекомендований перелік літератури надано нижче:

1. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов/ А. Оппенгейм, Р. Шафер– М.: Техносфера, 2006. – 856 с.

2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход/ Э. Айфичер, Б. Джервис; пер. с англ. под ред. А.В. Назаренко – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособ. для вузов/ Сергиенко А.Б – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 758 с.
4. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов/ Л. Рабинер, Б. Гоулд; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
5. Введение в цифровую фильтрацию; Под ред. Р. Богнера и А. Константиnidиса; пер. с англ. под ред. Л.И. Филиппова. – М: Мир, 1976. – 216 с.
6. Анохин В., MatLab для DSP. Расчет цифровых фильтров с учетом эффектов квантования/ В. Анохин, А. Ланнэ [Электронный ресурс]. – URL: <http://chipinfo.ru/literature/chipnews/200109/1.html> (дата звернення 11.03.2015).

ДОДАТОК А
ІНДИВІДУАЛЬНІ ВАРІАНТИ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Варіант визначається за номером прізвища студента у списку навчального журналу групи.

Таблиця А.1 – Індивідуальні варіанти для 1 групи (синтез СІХ-фільтра)

№ з/п	N	f_d , кГц	f_d кГц	$x(n)$
1	12	8	$3f_{\text{д}} / N$	0,8173 0,8687 0,0844 0,3998 0,2599 0,8001 0,4314 0,9106
2	16	12	$4f_{\text{д}} / N$	0,5383 0,9961 0,0782 0,4427 0,1067 0,9619 0,0046 0,7749
3	22	20	$6f_{\text{д}} / N$	0,7482 0,4505 0,0838 0,2290 0,9133 0,1524 0,8258
4	26	14	$5f_{\text{д}} / N$	0,5285 0,1656 0,6020 0,2630 0,6541 0,6892
5	18	44	$4f_{\text{д}} / N$	0,1299 0,5688 0,4694 0,0119 0,3371 0,1622 0,7943 0,3112
6	16	26	$4f_{\text{д}} / N$	0,7537 0,3804 0,5678 0,0759 0,0540 0,5308 0,7792 0,9340
7	28	18	$8f_{\text{д}} / N$	0,5853 0,5497 0,9172 0,2858 0,7572
8	14	22	$4f_{\text{д}} / N$	0,9293 0,3500 0,1966 0,2511 0,6160 0,4733 0,3517 0,8308
9	20	28	$6f_{\text{д}} / N$	0,1386 0,1493 0,2575 0,8407 0,2543 0,8143 0,2435
10	24	42	$7f_{\text{д}} / N$	0,2551 0,5060 0,6991 0,8909 0,9593 0,5472
11	30	32	$10f_{\text{д}} / N$	0,9597 0,3404 0,5853 0,2238 0,7513
12	10	16	$4f_{\text{д}} / N$	0,0975 0,2785 0,5469 0,9575 0,9649 0,1576 0,9706 0,9572
13	32	40	$9f_{\text{д}} / N$	0,4854 0,8003 0,1419 0,4218 0,9157
14	12	36	$4f_{\text{д}} / N$	0,7922 0,9595 0,6557 0,0357 0,8491 0,9340 0,6787
15	20	34	$6f_{\text{д}} / N$	0,7577 0,7431 0,3922 0,6555 0,1712 0,7060
16	30	38	$10f_{\text{д}} / N$	0,0318 0,2769 0,0462 0,0971 0,8235
17	26	10	$6f_{\text{д}} / N$	0,6948 0,3171 0,9502 0,0344 0,4387
18	16	44	$4f_{\text{д}} / N$	0,7655 0,7952 0,1869 0,4898 0,4456 0,6463 0,7094 0,7547
19	24	20	$7f_{\text{д}} / N$	0,2760 0,6797 0,6551 0,1626 0,1190 0,4984
20	26	8	$5f_{\text{д}} / N$	0,8909 0,9593 0,5472 0,1386 0,1493 0,2575 0,8407 0,2543
21	22	9	$3f_{\text{д}} / N$	0,8143 0,2435 0,9293 0,3500 0,1966 0,2511 0,6160 0,4733
22	18	30	$6f_{\text{д}} / N$	0,3517 0,8308 0,5853 0,5497 0,9172 0,2858 0,7572 0,7537
23	30	44	$12f_{\text{д}} / N$	0,3804 0,5678 0,0759 0,0540 0,5308 0,7792 0,9340 0,1299
24	16	20	$3f_{\text{д}} / N$	0,5688 0,4694 0,0119 0,3371 0,1622 0,7943 0,3112 0,5285
25	28	8	$12f_{\text{д}} / N$	0,1656 0,6020 0,2630 0,6541 0,6892 0,7482 0,4505 0,0838

Таблиця А.2 – Індивідуальні варіанти для 1 групи
(синтез НІХ-фільтра з $a_d = 0,0039$ дБ)

№ з/п	a_s , дБ	f_d , кГц	f_d , кГц
1	52,4	8	3,5
2	46,4	20	6,7
3	44,9	30	11,3
4	41,8	32	10,7
5	39,1	48	16,5
6	36,6	34	11,4
7	34,3	16	6,1
8	32,2	24	5,9
9	30,2	44	17,6
10	28,4	18	3,4
11	26,7	28	10,1
12	25,1	22	4,4
13	23,6	36	7,7
14	22,2	26	8,7
15	20,8	18	3,4
16	19,5	48	18
17	18,3	36	9,1
18	17,1	8	3
19	16	12	4,5
20	15	30	11,1
21	13,9	44	16,7
22	13	38	9,8
23	52,4	26	7
24	46,4	16	6,8
25	44,9	8	2,7

Таблиця А.3 – Індивідуальні варіанти коефіцієнтів передавальної характеристики $H(s)$ для 1 групи

№ з/п	$-\alpha_1$	$-\alpha_2$	$-\beta_2$	$\Omega_{\infty 2}$	Ω_s	C
1	1,92837316	0,92986980	1,8635028 ₈	11,0391874	9,5667722	14,5701354
2	1,93735146	0,92193586	1,8637764 ₆	9,4660694	8,2055090	10,6975072
3	1,94781238	0,91281153	1,8640216 ₂	8,2867604	7,1852965	8,1840214
4	1,95980094	0,90251046	1,8642086 ₆	7,3699920	6,3924532	6,4607825
5	1,97336916	0,89104862	1,8643042 ₃	6,6370034	5,7587704	5,2281587
6	1,98857662	0,87844447	1,8642715 ₄	6,0376741	5,2408430	4,3161552
7	2,00549072	0,8647191 ₅	1,8640704	5,5385907	4,809734 ₃	3,6225004
8	2,02418735	0,84969675	1,8636578 ₁	5,1168209	4,4454114	3,0826726
9	2,04475140	0,83400456	1,8629874 ₁	4,7552416	4,1335654	2,6543344
10	2,06727739	0,81707333	1,8620105 ₄	4,4423366	3,8637033	2,3087717
11	2,09187012	0,79913757	1,8606761 ₀	4,1688178	3,6279552	2,0259525
12	2,11864539	0,78023593	1,8589310 ₄	3,9277365	3,4203036	1,7915575
13	2,14773073	0,76041145	1,8567207 ₃	3,7138879	3,2360679	1,5951308
14	2,17926616	0,73971197	1,8539694 ₄	3,5724050	3,0715534	1,42889334
15	2,21340503	0,71619043	1,8506609 ₀	3,3504746	2,9238044	1,2869612
16	2,25031469	0,69590520	1,8467389 ₁	3,1951335	2,7904281	1,18481686
17	2,29017685	0,67292040	1,6421060 ₈	3,0541211	2,6694671	1,0589450
18	2,33316912	0,64930613	1,6387346 ₄	2,9256700	2,6593046	0,9886787
19	2,37956447	0,62513882	1,8305673 ₃	2,8079241	2,4585933	0,8855143
20	2,42953201	0,60050038	1,8235564 ₆	2,6998764	2,3862015	0,81396011
21	2,48333693 ₂	0,57548006	1,8156649 ₉	2,6003209	2,2811720	0,7505384
22	2,54124018	0,55017228	1,8068407 ₁	2,5083158	2,2028892	0,8940128
23	1,92837316	0,92986980	1,8635028 ₈	11,0391874	9,5667722	14,5701354
24	1,93735146	0,92193586	1,8637764 ₆	9,4660694	8,2055090	10,6975072
25	1,94781238	0,91281153	1,8640216	8,2867604	7,1852965	8,1840214

			2			
--	--	--	---	--	--	--

Таблиця А.4– Індивідуальні варіанти для 2 групи (синтез СІХ-фільтра)

№ з/п	N	f_d , кГц	f_d , кГц	$x(n)$
1	14	8	$4f_{\bar{a}} / N$	0,2290 0,9133 0,1524 0,8258 0,5383 0,9961 0,0782 0,4427
2	12	12	$3f_{\bar{a}} / N$	0,1067 0,9619 0,0046 0,7749 0,8173 0,8687 0,0844 0,3998
3	26	32	$9f_{\bar{a}} / N$	0,2599 0,8001 0,4314 0,9106 0,1818 0,2638 0,1455 0,1361
4	32	26	$12f_{\bar{a}} / N$	0,8693 0,5797 0,5499 0,1450 0,8530 0,6221 0,3510 0,5132
5	16	22	$4f_{\bar{a}} / N$	0,4018 0,0760 0,2399 0,1233 0,1839 0,2400 0,4173 0,0497
6	22	18	$7f_{\bar{a}} / N$	0,9027 0,9448 0,4909 0,4893 0,3377 0,9001 0,3692 0,1112
7	20	16	$8f_{\bar{a}} / N$	0,7803 0,3897 0,2417 0,4039 0,0965 0,1320 0,9421 0,9561
8	30	24	$12f_{\bar{a}} / N$	0,5752 0,0598 0,2348 0,3532 0,8212 0,0154 0,0430 0,1690
9	18	30	$6f_{\bar{a}} / N$	0,6491 0,7317 0,6477 0,4509 0,5470 0,2963 0,7447 0,1890
10	24	26	$9f_{\bar{a}} / N$	0,6868 0,1835 0,3685 0,6256 0,7802 0,0811 0,9294 0,7757
11	28	14	$11f_{\bar{a}} / N$	0,4868 0,4359 0,4468 0,3063 0,5085 0,5108 0,8176 0,7948
12	14	28	$4f_{\bar{a}} / N$	0,9730 0,6490 0,8003 0,4538 0,4324 0,8253
13	12	44	$3f_{\bar{a}} / N$	0,2259 0,1707 0,2277 0,4357 0,3111 0,9234 0,4302 0,1848
14	16	48	$4f_{\bar{a}} / N$	0,9049 0,9797 0,4389 0,1111 0,25810,4087 0,5949 0,2622
15	22	8	$9f_{\bar{a}} / N$	0,6028 0,7112 0,2217 0,1174 0,29670,3188 0,4242 0,5079
16	34	16	$13f_{\bar{a}} / N$	0,0855 0,2625 0,8010 0,0292 0,92890,7303 0,4886 0,5785
17	26	24	$11f_{\bar{a}} / N$	0,2373 0,4588 0,9631 0,5468 0,52110,2316 0,4889 0,6241
18	18	18	$6f_{\bar{a}} / N$	0,6791 0,3955 0,3674 0,9880 0,03770,8852 0,9133 0,7962
19	20	28	$6f_{\bar{a}} / N$	0,0987 0,2619 0,3354 0,6797 0,13660,7212 0,1068 0,6538
20	16	32	$4f_{\bar{a}} / N$	0,4942 0,7791 0,7150 0,9037 0,89090,3342 0,6987 0,1978
21	30	12	$10f_{\bar{a}} / N$	0,0305 0,7441 0,5000 0,4799 0,90470,6099 0,6177 0,8594
22	14	16	$4f_{\bar{a}} / N$	0,8055 0,5767 0,1829 0,2399 0,88650,0287 0,4899 0,1679
23	32	26	$12f_{\bar{a}} / N$	0,9787 0,7127 0,5005 0,4711 0,05960,6820 0,0424 0,0714
24	28	18	$10f_{\bar{a}} / N$	0,5216 0,0967 0,8181 0,8175 0,72240,1499 0,6596 0,5186
25	12	30	$4f_{\bar{a}} / N$	0,1734 0,3909 0,8314 0,8034 0,06050,3993 0,5269 0,4168

Таблиця А.5 – Індивідуальні варіанти для 2 групи
(синтез НІХ-фільтра з $a_d = 0,0039$ дБ)

№	a_s , дБ	f_d , кГц	f_a , кГц
1	56,8	44	10,5
2	52,8	32	9,1
3	49,3	8	3
4	46,3	12	4,4
5	43,5	16	5,9
6	41,0	20	8,8
7	38,7	24	10,2
8	36,6	28	9,8
9	34,7	30	6,5
10	32,6	26	3,4
11	31,1	8	2,7
12	29,5	14	3,4
13	28	20	6,7
14	26,6	36	13,4
15	25,2	44	16,9
16	23,9	12	4,3
17	22,7	22	5,5
18	21,5	32	10,9
19	20,4	30	8,9
20	19,3	16	5,1
21	18,3	8	2
22	17,3	24	6,7
23	16,3	20	4,4
24	15,4	18	4
25	14,5	14	2,5

Таблиця А.6 – Індивідуальні варіанти коефіцієнтів
передавальної характеристики $H(s)$ для 2 групи

№	$-\alpha_1$	$-\alpha_2$	$-\beta_2$	$\Omega_{\infty 2}$	Ω_s	C
1	1,57828723	0,76857004	1,6082218 6	11,0391674	9,5667722	24,3030267
2	1,58373554	0,76384632	1,6085399 5	9,4660694	8,2055090	17,8434720
3	1,59006751	0,75840832	1,6088768 3	8,2867604	7,1852965	13,6509706
4	1,59730317	0,75225478	1,6092196 8	7,3699920	6,3924532	10,7766034
5	1,60546560	0,74539718	1,6095540 5	6,6370634	5,7587704	8,7205834
6	1,61458103	0,73783989	1,6098638 7	6,0376741	5,2408430	7,1993590
7	1,62467909	0,72969016	1,6101315 0	5,6365907	4,8097343	6,0423409
8	1,63579289	0,72065625	1,6103377 6	5,1166209	4,4454114	5,1419066
9	1,64795931	0,71104751	1,6104620 1	4,7552418	4,1335854	4,4274373
10	1,66121916	0,70077445	1,6104821 3	4,4423386	3,8637033	3,8510377
11	1,67561746	0,68984887	1,6103746 7	4,1688178	3,6279552	3,3792945
12	1,69120377	0,67828396	1,6101148	3,9277365	3,4203036	2,9883230
13	1,70803229	0,66609445	1,6096767 4	3,7136879	3,2380679	2,6606827
14	1,72616239	0,65329671	1,6090332 2	3,5224050	3,0715534	2,3833983
15	1,74565882	0,63990889	1,6081562 3	3,3504746	2,9238044	2,1466549
16	1,76659209	0,62595110	1,6070168 4	3,1951335	2,7904281	1,9429175
17	1,78903882	0,61144553	1,6055854 2	3,0541211	2,6694671	1,7663233
18	1,81308217	0,59641665	1,6038318 4	2,9255700	2,5593046	1,6122560
19	1,83881216	0,58069130	1,6017256 3	2,8079241	2,4585933	1,4770403
20	1,86632609	0,56489890	1,5992362 9	2,6998764	2,3662015	1,3577211
21	1,89572891	0,54847160	1,5963335 2	2,6003209	2,2811720	1,2519002
22	1,92713355	0,53164436	1,5929675 2	2,5083158	2,2026892	1,1576153
23	1,96066130	0,51445512	1,5891694 1	2,4230537	2,1300544	1,0732480
24	1,99644201	0,49694486	1,5848515 5	2,3438388	2,0626653	0,9974542
25	2,03461432	0,47915764	1,5800080 1	2,2700680	2	0,9291096

ДОДАТОК Б
ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОЇ СТОРІНКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІМ. О.С. ПОПОВА
Кафедра телебачення та радіомовлення

КУРСОВА РОБОТА
з дисципліни “Цифрова обробка сигналів”
на тему:

ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ
ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

виконав: студ. 3 курсу, групи РТ-31
Зубенко О.В.

перевірив: Ошаровська О.В.

захищено з оцінкою «_____»

“_____” 20__ року

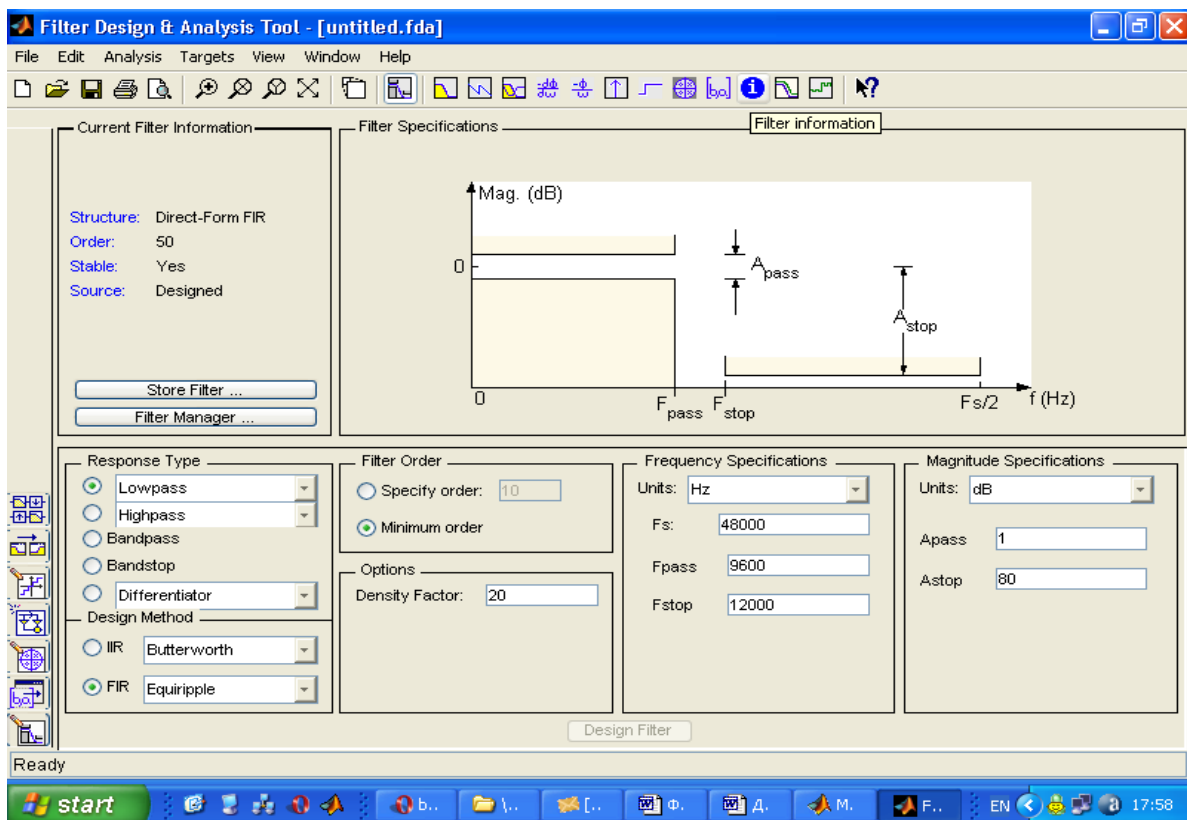
Одеса 201_
ДОДАТОК В
РОЗРОБКА ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ У MATLAB
ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА
"FILTER DESIGN AND ANALYSIS TOOL"

Графічне середовище Filter Design and Analysis Tool дозволяє розраховувати й аналізувати цифрові фільтри. Для запуску графічного середовища необхідно задати в командному рядку MATLAB команду **fdatool**.

Розрахунок фільтра починається із завдання необхідних параметрів на вкладці Design Filter. Тип АЧХ обирається за допомогою перемикача Response Type: Lowpass (ФНЧ), Highpass (ФВЧ), Bandpass (смуговий фільтр), Bandstop (режекторний фільтр), а також складніші види АЧХ (Differentiator – диференціатор, Hilbert Transformer – перетворювач Гільберта, Multiband Arbitrary Magnitude – довільна АЧХ, Arbitrary Group Delay – довільна групова затримка).

Після вибору категорії АЧХ, необхідно вибрати тип фільтра за допомогою перемикача Design Method: положення IIR (НІХ-фільтр), FIR (СІХ-фільтр). Кожному положенню перемикача відповідає список можливих методів синтезу. Склад цього списку змінюється залежно від обраного типу АЧХ.

Далі необхідно обрати порядок фільтра в розділі Filter Order (можливий автоматичний вибір шляхом установки перемикача в положення Minimum order).



Нарешті, необхідно задати числові параметри АЧХ у розділі Frequency Specifications і Magnitude Specifications. Вміст цих розділів змінюється залежно

від обраного типу АЧХ. Числові параметри, які необхідно задати, ілюструються графічним шаблоном, який знаходиться в розділі Frequency Specifications.

Вибравши метод синтезу і задавши характеристики фільтра, необхідно натиснути на кнопку Design Filter в нижній частині вікна.

Після виконання розрахунку фільтра в розділі Current Filter Information з'явиться інформація щодо завершення обчислень, щодо порядку фільтра і щодо його стійкості. Тепер можна проглядати характеристики фільтра і переконатися чи відповідає він заданим вимогам.

Вибір характеристик виконується за допомогою наступної панелі інструментів:



, де

Magnitude Response – АЧХ синтезованого фільтра;

Phase Response – ФЧХ синтезованого фільтра;

Magnitude Response and Phase Response – одночасний графік АЧХ і ФЧХ;

Group Delay – групова затримка;

Phase Delay – фазова затримка;

Impulse Response – імпульсна характеристика фільтра;

Step Response – перехідна характеристика фільтра;

Pole/Zero plot – розташування нулів і полюсів на z -площині;

Filter Coefficients – перегляд коефіцієнтів фільтра;

Filter Information – перегляд загальної інформації щодо фільтра;

Magnitude Response Estimate – оцінка АЧХ квантованого фільтра з урахуванням ефектів квантування, вироблювана шляхом пропускання через фільтр шумоподобного сигналу;

Round-off Noise Power Spectrum – оцінка спектральної густини потужності шуму округлення, що виникає в квантованому фільтрі.

Turn Quantization on – здійснюється перемикання між аналізом квантованого і неквантованого фільтрів.