

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності
обробки дискретних сигналів**

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРм-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Антонів В.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Хвостівська Л.В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Дедів Л.Є.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2021 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Антоніву Володимирі Богдановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності обробки дискретних сигналів

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н.,

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

Затверджені наказом ректора від «30» листопада 2021 року № 4/7-1019

2. Термін подання студентом завершеної роботи 6 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання. Фільтрація сигналів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Задача фільтрації сигналів. Специфіка фільтрів. Дизайн фільтрів. Розроблення цифрових фільтрів. Структури цифрових фільтрів. Огляд програмних засобів розрахунку цифрових фільтрів. Розрахунок цифрових фільтрів у середовищі Matlab. Моделювання цифрової фільтрації. Розрахунки цифрових фільтрів у matlab. Фільтрація акустичного сигналу в модулі sptool. Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу		
2	Написання розділу 1		
3	Написання розділу 2		
4	Написання розділу 3		
5	Написання розділу 4		
6	Попередній захист		
7	Захист		

Студент _____
(підпис)

Антонів Володимир Богданович _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Дунець Василь Любомирович _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності обробки дискретних сигналів // Кваліфікаційна робота магістра // Антонів Володимир Богданович // ТНТУ, ФПТ, група РРМ-61 // Тернопіль, 2021.

Ключові слова: ФІЛЬТР, АЧХ, ПРОЕКТУВАННЯ.

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто питання проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності обробки дискретних сигналів. Проаналізовано проблему фільтрації сигналу та проблеми проектування аналогових і цифрових фільтрів. Проаналізовано види цифрових фільтрів та методи їх розрахунку. Ми проаналізували програмні продукти для автоматизації проектування цифрових фільтрів і виявили, що програмний пакет Matlab має найкращі функціональні властивості. Проведено аналіз його можливостей і виконано проектування цифрового фільтра для фільтрації тестового сигналу при окремих значеннях порядку фільтра.

ANNOTATION

Design of digital filters to increase the efficiency of discrete signal processing // Master's qualification work // Antoniv V.B. TNTU, FPT, group RRm-61 // Ternopil, 2021.

Key words: FILTER, FREQUENCY RESPONSE, DESIGN.

In the qualification work of the master the question of designing digital filters for increase of efficiency of processing of discrete signals is considered. The problem of signal filtering and problems of designing analog and digital filters are analyzed. Types of digital filters and methods of their calculation are analyzed. We analyzed software products to automate the design of digital filters and found that the Matlab software package has the best functional properties. The analysis of its possibilities is carried out and the design of the digital filter for filtering of a test signal at separate values of the order of the filter is executed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1. Задача фільтрації сигналів.....	9
1.2. Специфіка фільтрів.....	10
1.3. Дизайн фільтрів.....	13
1.4. Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Розроблення цифрових фільтрів.....	21
2.2. Структури цифрових фільтрів в.....	27
2.3. Висновки до розділу 2.....	31
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	33
3.1. Огляд програмних засобів розрахунку цифрових фільтрів.....	33
3.2. Розрахунок цифрових фільтрів у середовищі Matlab.....	43
3.3. Моделювання цифрової фільтрації.....	45
3.4. Розрахунки цифрових фільтрів у Matlab.....	47
3.5. Фільтрація акустичного сигналу в модулі sptool.....	51
3.6. Висновки до розділу 3.....	54
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	56
4.1 Охорона праці.....	56
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	58
4.3 Висновки до розділу 3.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність роботи. В області створення технічних засобів обміну даними актуальною є задача проектування систем фільтрації, призначенням яких є реалізація складних фільтрів, які будуть пропускати складові вхідного сигналу в певній смузі (смугах) частот та не пропускати в інших смугах частот. Залежно від вигляду залежності амплітуди сигналу на виході фільтра від частоти сигналу розрізняють чотири основні типи фільтрів, а саме фільтри низьких частот, фільтри високих частот, смугові та ежекторні фільтри. При цьому всі фільтри за способом реалізації та принципу дії можна розділити на аналогові та цифрові. Перший тип фільтрів працює з аналоговими сигналами та використовується для їхньої перед обробки, зокрема в колах прийому чи реєстрації сигналів. Більш поширеним сьогодні стає цифрова фільтрація, яка використовує методи опрацювання сигналів у вигляді дискретних послідовностей квантова них за рівнем та часом аналогових сигналів. При цьому розрізняють два класи цифрових фільтрів, а саме нерекурсивні цифрові фільтри та рекурсивні цифрові фільтри.

Принцип роботи першого типу фільтрів ґрунтується на залежності дискретних відліків вихідного сигналу тільки від дискретних відліків вхідного сигналу в кожен момент часу. У випадку ж рекурсивних цифрових фільтрів, дискретні відліки вихідного сигналу залежать як від відліків вхідного сигналу, так і від відліків вихідного сигналу в попередні моменти часу.

За принципом функціонування проаналізовано фільтри з нескінченною та скінченною імпульсною характеристикою. При цьому реалізації таких фільтрів відрізняються складністю самих алгоритмів фільтрації та часом, що витрачається на фільтрацію.

В роботі розглядається задача проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності обробки дискретних сигналів.

Мета і завдання дослідження. Спосіб проектування цифрових фільтрів для підвищення ефективності обробки дискретних сигналів. Задачі:

- аналіз стану проблеми;
- аналіз типів цифрових фільтрів, їх переваги та недоліки;
- аналіз способів розрахунків цифрових фільтрів;
- аналіз можливостей комп'ютерних засобів для проектування цифрових фільтрів;
- моделювання процесу фільтрації тестового сигналу.

Об'єкт дослідження: процес проектування цифрових фільтрів.

Предмет дослідження: засоби проектування цифрових фільтрів.

Практичне значення отриманих результатів. Використання розробленні модулів та вузлів фільтрації складних сигналів.

Наукова новизна. Систематизовано можливості автоматизованих систем проектування цифрових фільтрів та показано переваги застосування до фільтрації акустичних сигналів FIR-фільтрів.

Апробація результатів дослідження. Участь в ІХ науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 2021 р.).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Задача фільтрації сигналів

У повсякденній мові «фільтр» - це пристрій, який видаляє якийсь компонент із того, що проходить через нього. В електроніці слово «фільтр» викликає думки про систему, яка видаляє компоненти вхідного сигналу певної частоти. Для видалення вузькосмугового тону з прийнятої передачі може використовуватися режекторний фільтр; шумовий фільтр може видаляти високочастотне шипіння або низькочастотний гул із записів; фільтри згладжування необхідні для видалення частот вище частоти Найквіста перед А/Ц перетворенням.

Менш поширеною в повсякденному використанні є концепція фільтра, який підкреслює розміри компонентів, а не видаляє їх. Радарні фільтри вловлюють потрібні ехо-сигнали; фільтри усунення розмиття використовуються для виділення невпізнаних деталей на зображеннях; вузькосмугові аудіофільтри піднімають сигнали азбуки Морзе над перешкодами.

При обробці сигналів фільтром є будь-яка система, вихідний спектр якої виводиться зі спектру вхідного сигналу шляхом множення на незмінну в часі вагову функцію. Ця функція може бути нульовою в деякому діапазоні частот і в результаті видалити ці частоти; або вона шикора у певних областях спектру, що, отже, підкреслює ці компоненти. Або фільтр може вдвічі зменшити енергію деяких компонентів, подвоюючи інші, або мати будь-яку іншу довільну характеристику.

Однак, фільтр обробки сигналу не може створити частотні компоненти, яких не було у вхідному сигналі.

1.2 Специфіка фільтрів

Враховуючи вхідний сигнал, різні фільтри вормуватимуть різні вихідні сигнали. Хоча існує нескінченна кількість різних фільтрів, не кожен вдається отримати з даного вхідного сигналу фільтром. Обмеження випливають із визначення фільтра як оператора, що не змінюється в часі. Фільтри ніколи не створюють частотні компоненти, яких не було у вхідному сигналі, вони лише послаблюють або підкреслюють частотні компоненти, які існують у вхідному сигналі.

Низькочастотні фільтри не пропускають постійний струм і низькі частоти, але блокують або сильно послаблюють високі частоти. Фільтри високих частот пропускають високі частоти, але блокують або сильно послаблюють низькі частоти та постійний струм. Смугові фільтри блокують як низькі, так і високі частоти, пропускаючи лише частоти в деякому діапазоні «смуги пропускання». Смугові фільтри діють навпаки, пропускаючи все не у визначеній «смугі зупинки». Нотч-фільтри є екстремальними прикладами смугових фільтрів, вони пропускають усі частоти, за винятком однієї чітко визначеної частоти (і її безпосередньої близькості). Повнопрохідні фільтри мають однакову величину посилення для всіх частот, але не обов'язково повинні бути системою ідентифікації, оскільки фази все ще можуть бути змінені.

Наведені вище визначення дійсні для аналогових фільтрів. Щоб адаптувати їх для DSP, потрібно вказати, що потрібно враховувати лише частоти в діапазоні $(0 \dots 1/2)$ частоти дискретизації. Таким чином, цифрова система, яка блокує низькі частоти і пропускає частоти від чверті до половини частоти дискретизації, є фільтром високих частот.

Ідеальним є фільтр, для якого кожна частота знаходиться в одній з двох смуг: або затримки або пропускання, і має одиничне посилення в смугі пропускання і нульове посилення в смугі затримання. На жаль, ідеальні фільтри неможливо реалізувати. Проблема викликана різкими розривами

стрибків на переходах у частотній області, які неможливо точно реалізувати. У лівій частині рис. 1.1 показано частотну характеристику ідеальних фільтрів, а в правій частині зображено більш реалістичні наближення до ідеальної характеристики. Реалістичні фільтри завжди будуть мати скінченну область переходу між смугами пропускання та смугами затримки, і часто демонструють пульсації в деяких або всіх цих областях. При розробці фільтра для конкретної програми необхідно вказати, яку кількість пульсацій і яку ширину переходу можна допустити. Існує багато методів створення аналогових і цифрових фільтрів відповідно до специфікації, але всі вони залежать від тих самих основних принципів.

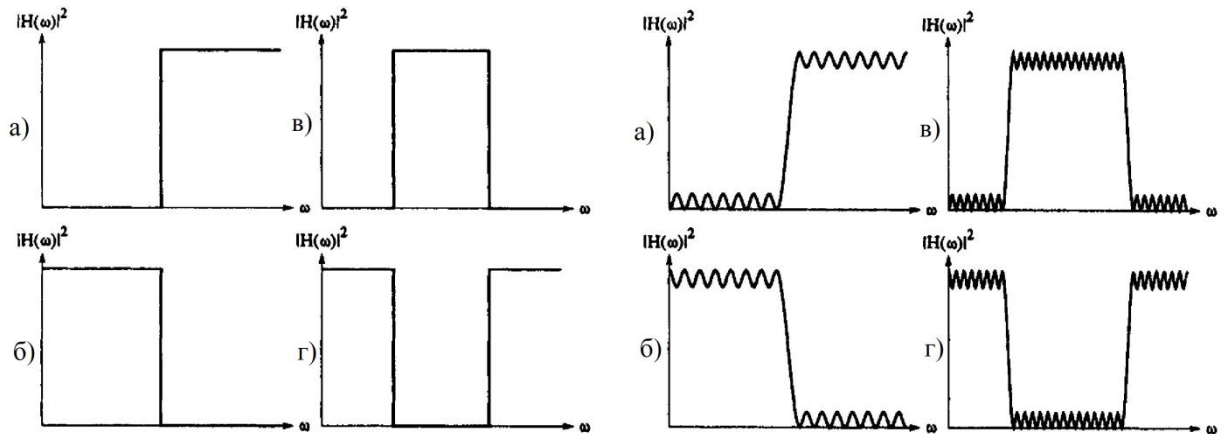


Рис. 1.1. АЧХ ідеального та неідеального фільтрів. а) – фільтри нижніх частот, б) – фільтри високих частот, в) – смугові фільтри і г) – смугові фільтри (режекторні).

Не всі фільтри є низькочастотними, високочастотними, смуговими або режекторними, будь-яке підсилення, залежне від частоти, є припустимим. Підсилення фільтра попереднього фокусування монотонно збільшується з частотою, тоді як коефіцієнт підсилення фільтра деексфазациї монотонно зменшується. Такі фільтри часто потрібні для компенсації або усунення впливу різних інших систем обробки сигналів.

Фільтрація в аналоговому світі залежить від наявності частото залежних компонентів, як правило, конденсаторів і котушок індуктивності. Конденсатор виглядає як обрив ланцюга для постійного струму, але його опір зменшується

зі збільшенням частоти. Таким чином, послідовно з'єднаний конденсатор ефективно блокує постійний струм, але пропускає високі частоти, і, таким чином, є фільтром високих частот. Паралельно підключений конденсатор замикає високі частоти, але не постійний струм або низькі частоти, і, таким чином, є фільтром низьких частот. Про послідовно та паралельно включені котушки індуктивності можна сказати навпаки.

Фільтрація в DSP залежить від математичних операцій, які видаляють або підкреслюють різні частоти. Усереднення суміжних значень сигналу пропускає постійний струм і низькі частоти, а подавляє високі частоти. Таким чином, усереднення веде себе як фільтр нижніх частот. Додавання різниць суміжних значень усуває постійний струм і низькі частоти, але пропускає сигнали зі швидко змінними знаками. Таким чином, такі операції по суті є фільтрами високих частот.

Одним з очевидних способів фільтрації цифрового сигналу є «вікно» його в частотній області. Це вимагає перетворення вхідного сигналу в частотну область, множення його там на бажану частотну характеристику (так звана «віконна функція»), а потім перетворення назад у часову область. На практиці перетворення можуть бути виконані за допомогою алгоритму ШПФ за $O(N \log N)$ часу (N – кількість точок сигналу), тоді як для множення потрібно лише $O(N)$ операцій; отже, цей метод має $O(N \log N)$ за складністю. Цей метод, як зазначено, підходить лише тоді, коли весь сигнал доступний в одному, досить короткому векторі. Коли для одного обчислення DFT занадто багато точок або коли нам потрібно почати обробку сигналу до того, як він повністю надійшов, ми можемо виконати цей процес для послідовних блоків сигналу.

Метод вікна частотної області дійсно є простим і ефективним методом цифрової фільтрації. Найважливішим недоліком є те, що він погано підходить для обробки в реальному часі, коли ми отримуємо один вхідний зразок сигналу, і очікується, що ми створимо вихідний зразок сигналу. Не те, що неможливо використовувати вікно частотної області для фільтрації в

реальному часі. Можливо, можна не відставати від обмежень у реальному часі, але необхідно ввести затримку обробки. Ця затримка складається з часу, необхідного для заповнення буфера (затримка буфера), плюс час, необхідний для виконання ШПФ, множення та iFFT (затримка обчислення). Коли ця затримка не допускається, альтернативи фільтрації в часовій області немає.

1.3 Дизайн фільтрів

Класичний дизайн фільтра означає дизайн аналогового фільтра.

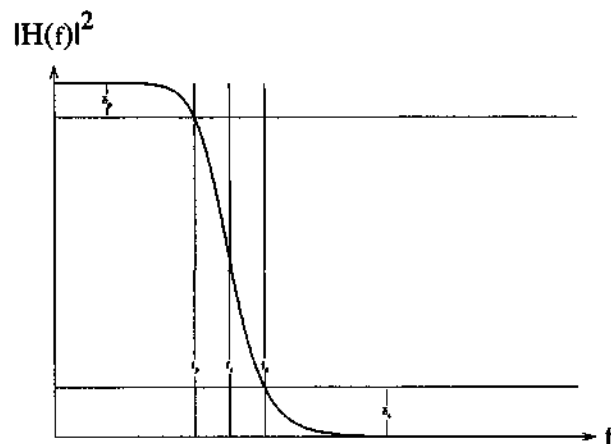


Рис. 1.2. Бажана частотна характеристика аналогового фільтра нижніх частот, який необхідно спроектувати.

Смуга пропускання знаходиться від $f = 0$ до краю смуги пропускання f_p , перехідний регіон від f_p до f_s , і смуга затримки від краю верхньої смуги f_s до нескінченності. Частотна характеристика знаходиться на середині між частотою смуги пропускання та частотною характеристикою смуги затримки на частоті зрізу f_c .

Розглянемо найпростіший випадок — аналоговий фільтр нижніх частот. Нехай візьмемо ідеальний фільтр низьких частот, але, оскільки він нереалізований, спробуємо зробити найкраще його наближення. Найважливіша специфікація - частота зрізу f_c , нижче якої потрібно, щоб сигнал проходив, вище якої потрібно, щоб сигнал був заблокований. Смуга пропускання і смуга

затримання розділені перехідною областю, де не ставиться жорстких вимог до частотної характеристики. Розглядається кінець смуги пропускання f_p і початок стоп-смуги f_s . Іншими специфікаціями для практичної реалізації є ширина переходу $A = f_s - f_p$, максимальне відхилення від одиниці підсилення в смузі пропускання і максимальна амплітуда в смузі затримки. На рис. 1.2. зображені ідеальні та наближені аналогові фільтри нижПР частот з цими параметрами.

Розробка аналогового фільтра по суті зводиться до визначення функції $H(f)$. З попереднього аналізу бачимо висновок, що:

$$\begin{aligned} |H(0)|^2 &= 1 \\ |H(f)|^2 &\approx 1 && \text{for } f < f_c \\ |H(f)|^2 &\approx 0 && \text{for } f > f_c \\ |H(f)|^2 &\rightarrow 0 && \text{for } f \rightarrow \infty \end{aligned}$$

це вимоги до аналогового фільтра нижПР частот. Класичний дизайн фільтра спирається на формулу:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + p(f)} \quad (1.1)$$

де $P(f)$ є поліномом, який має задовольняти вимогам:

$$\begin{aligned} p(0) &= 0 \\ p(f) &\xrightarrow{f \rightarrow \infty} \infty \end{aligned}$$

Тому класична задача проектування зводиться до знаходження цього полінома.

На рис. 1.2 відхилення амплітудної характеристики від ідеальної реакції повністю пов'язане з її плавним зменшенням від одиниці при $f = 0$, щоб

наблизитися до нуля на високих частотах. Одним поліномом, який задовільняє обмеженням і не має сторонніх екстремумів, є простий квадратний поліном

$$p(f) = \left(\frac{f}{f_c}\right)^2$$

який, якщо його підставити у рівняння (1.1), дає «найповільніший» фільтр, зображений на рис. 1.3. Інші фільтри є похідними і називаються фільтрами низьких частот Баттерворта порядку n .

$$p(f) = \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}$$

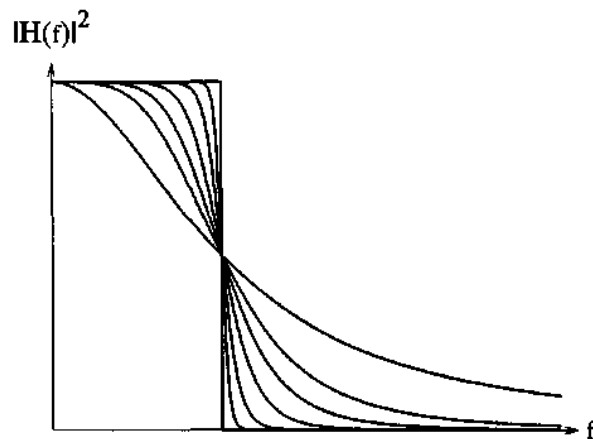


Рис. 1.3. Частотна характеристика аналогових фільтрів низьких частот Баттерворта при різному порядку фільтра.

У фільтрів Баттерворта є переваги і недоліки. Загасання монотонно зростає від постійного струму до нескінченної частоти; насправді перші $2N-1$ похідні від $|H(f)|^2$ однаково дорівнюють нулю в цих двох точках, властивість, відома як «максимальна площинність». Аналоговий фільтр Баттерворта має лише полюси і його легко спроектувати. Однак, повертаючись до проектних специфікацій, щоб перехідна область A була достатньо малою, порядок N зазвичай має бути досить високим; і немає можливості самостійно вказати решту параметрів.

Для того, щоб отримати швидший спад в основі фільтра, потрібно від чогось відмовитися, і це щось є монотонністю $|H(f)|^2$. Фільтр Баттерворта є складним, щоб бути максимально плоским. Фільтр, який має невеликі коливання вгору і вниз у діапазоні пропускання, смугі затримки або в обох, може мати значно меншу А. Потрібно забезпечити мінімальну квадратичну помилку між специфікацією та реалізованим фільтром

$$\epsilon^2 = \int |H_{spec}(\omega) - H_{impl}(\omega)|^2 d\omega$$

але це все одно призведе до значного відхилення від специфікації на деяких частотах за рахунок надмірної точності. Більш доцільно забезпечити мінімальну похибку, тобто, щоб максимальне відхилення було мінімальним.

$$\max_{\omega} |H_{spec}(\omega) - H_{impl}(\omega)|$$

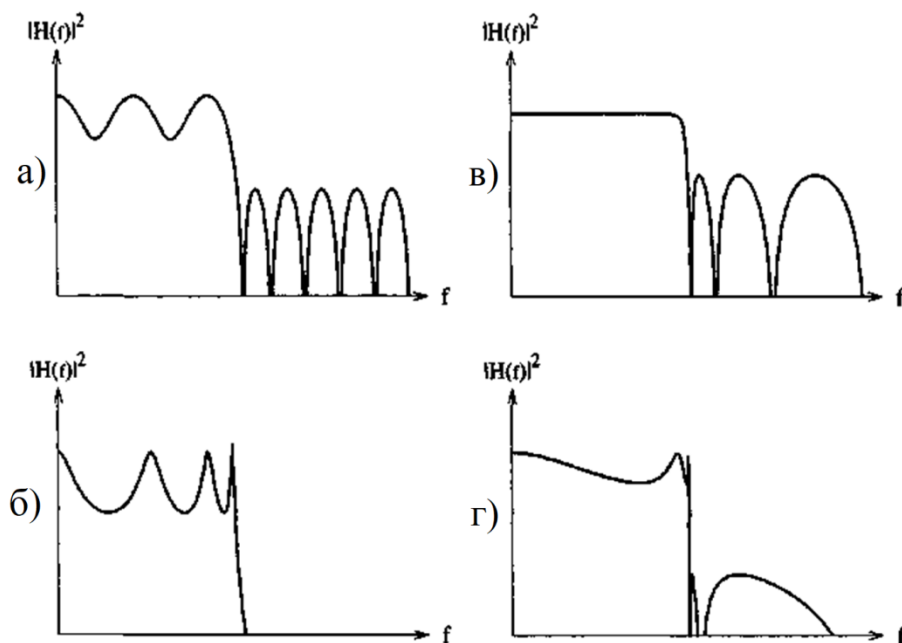


Рис. 1.4. Частотна характеристика низькочастотних фільтрів: а) – FIR-фільтр, розроблений з використанням алгоритму Remez для цілей порівняння; б) – ПР-фільтр Чебишева; в) – обернений фільтр Чебишева; г) – еліптичний дизайн.

Досягнення повної мінімаксної апроксимації загалом, є складним, але апроксимація з використанням поліномів Чебишева майже така ж і проста у реалізації. Така апроксимація, природно, призводить до рівномірної поведінки, коли похибка коливається навколо бажаного рівня з однаковою амплітудою помилки (рис. 1.4). Фільтр Чебишева є рівнопропускним у смузі пропускання, але максимально плоским у смузі затримки. Це відповідає вибору полінома

$$p(f) = \delta^2 T_N^2 \left(\frac{f}{f_p} \right)$$

і, як і наближення Баттерворта, аналоговий фільтр Чебишева є повнополосним. Обернений фільтр Чебишева рівнопромісний у смузі затримки, але максимально рівний у смузі пропускання. Його поліном має вигляд:

$$p(f) = \delta^2 \frac{T_N^2 \left(\frac{f_s}{f_p} \right)}{T_N^2 \left(\frac{f}{f} \right)}$$

Мінімакс фільтра Чебишева апроксимує бажану характеристику в смузі пропускання, але не в смузі затримки, тоді як інверсний фільтр Чебишева робить якраз навпаки.

Нарешті, еліптичний фільтр поводить себе однаково в смугах пропускання та подавлення, і таким чином наближає бажану характеристику в мінімаксному сенсі для всіх частот. Його «поліном» зовсім не є поліномом, а радше раціональною функцією $U_N \left(\frac{f}{f_p} \right)$. Ці функції визначаються за допомогою еліптичних функцій. Визначимо функцію

$$U_{r;k,q}(u) \equiv \operatorname{sn}_k \left(r \operatorname{sn}_q^{-1}(u) \right)$$

Ця функція стає раціональною функцією.

$$U_N(u) = a^2 \begin{cases} \frac{(u_1^2 - u^2)(u_3^2 - u^2) \dots (u_{2N-1}^2 - u^2)}{(1 - u_1^2 u^2)(1 - u_3^2 u^2) \dots (1 - u_{2N-1}^2 u^2)} & N \text{ even} \\ \frac{u(u_2^2 - u^2)(u_4^2 - u^2) \dots (u_{2N}^2 - u^2)}{(1 - u_2^2 u^2)(1 - u_4^2 u^2) \dots (1 - u_{2N}^2 u^2)} & N \text{ odd} \end{cases} \quad (1.3)$$

Ця раціональна функція має кілька пов'язаних цікавих характеристик. Для $u < 1$ функція знаходиться між -1 і $+1$. Далі,

$$U_N \left(\frac{1}{u} \right) = \frac{1}{U_N(u)}$$

Вибір усіх N нулів у діапазоні $0 < \zeta < 1$ змушує всі N полюсів потрапляти в діапазон $1 < \pi < \infty$. Хоча нулі і полюси розташовані не однаково, поведінка фільтра як в смузі пропускання, так і в діапазоні затримання:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + U_N\left(\frac{f}{f_p}\right)}$$

Корисно порівняти чотири типи аналогових фільтрів — Баттерворта, Чебишева, зворотного Чебишева та еліптичного. Можна припустити щодо еліптичного фільтра: враховуючи будь-які три з чотирьох параметрів, що нас цікавлять (пульсація смуги пропускання, пульсація смуги затримки, ширина переходу та порядок фільтра), еліптичний фільтр мінімізує параметр, що залишився. Зокрема, для заданого порядку N та допусків пульсацій еліптичний фільтр може забезпечити найкращий фронт ЧХ. Найслабший у цьому плані фільтр Баттерворта, а два типи Чебишева є проміжними. Однак фільтр Баттерворта є найкращим наближенням до розкладів Тейлора ідеальної характеристики як на постійній, так і на

нескінченній частоті. Конструкція Чебишева мінімізує максимальну пульсацію в смузі пропускання, тоді як зворотна схема Чебишева максимізує мінімальне відхилення смуги пропускання.

Критерії проектування, як ми їх сформулювали, не стосуються питання фазової характеристики, і жоден з цих фільтрів не є лінійно-фазовим. Еліптичний має найгіршу фазову характеристику, сильно коливаючись у смузі пропускання та в перехідній області (фазова характеристика в смузі затримки зазвичай неважлива). Найгладкішим у цьому плані є Butter-worth, за ним йдуть Чебишев і зворотний Чебишев.

Хоча описані типи фільтрів проаналізовано на основі аналогового фільтра нижПР частот, принципи є більш загальними. Усі аналогові фільтри з однією смугою пропускання та/або смугою затримання можуть бути отримані з розглянутих вище конструкцій нижПР частот. Наприклад, ми можемо перетворити аналогові конструкції фільтрів нижПР частот у фільтри високих частот за допомогою простого перетворення $f \pm j$. Цифрові фільтри є дещо складнішим питанням, яке буде розглянуто в наступному розділі. На даний момент достатньо сказати, що фільтри з нескінченною ІХ часто отримують від аналогових проектів Баттерворта, Чебишева, зворотного Чебишева або еліптичної конструкції. Міркування полягає не в тому, що такі конструкції є оптимальними; скоріше, що теорія аналогових фільтрів передувала розвитку DSP, і перші практики вважали за краще використовувати добре розроблену теорію, коли це можливо.

1.4 Висновки до розділу 1

Проаналізовано задачу фільтрації сигналів. При цьому фільтр можна розглядати як пристрій, який видаляє якийсь компонент із того, що проходить через нього.

При обробці сигналів фільтром є будь-яка система, вихідний спектр якої виводиться зі спектру вхідного сигналу шляхом множення на незмінну в часі вагову функцію.

Проаналізовано різні типи фільтрів та їхні характеристики і встановлено, що ідеальним є фільтр, для якого кожна частота знаходиться в одній з двох смуг: або затримки або пропускання, і який має одиничне підсилення в смузі пропускання і нульове підсилення в смузі затримання.

Розглянуто аналогові та цифрові фільтри і встановлено, що близьку до ідеальної частотної характеристики можна отримати і у випадку аналогового і у випадку цифрового фільтра. Однак, це вимагає реалізації фільтрів дуже високого порядку (до декількох сотень). Таким чином аналогові фільтри є практично нереалізованими. Натомість цифрові фільтри відносно просто можуть бути реалізовані.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розроблення цифрових фільтрів

Незважаючи на те, що теорія проектування цифрових фільтрів добре розвинена, вона, як правило, в основному складається з методів обмеженої мінімізації помилки апроксимації. Крім того, наявність чудового програмного забезпечення для проектування цифрових фільтрів, як повноцінних графічних додатків, так і пакетів, які можуть викликати користувачі, робить малоімовірним розробляти фільтри самостійно.

Основна складність в проектуванні фільтра полягає в тому, як обмежити частотну характеристику фільтра, щоб вона не відхилялася від заданої на будь-якій частоті.

Це стосується не лише фільтрації в часовій області. Фільтрація в частотній області використовує ФТ для передачі сигналу в частотну область, виконує там будь-яку необхідну операцію фільтрації, а потім використовує іФТ для повернення до часової області. Ми можемо лише чисельно виконати DFT для кінцевої кількості значень сигналу i , таким чином, отримати лише кінцеву частотну роздільну здатність. Помноження сигналу в частотній області забезпечує виконання бажаної форми ЧХ фільтра лише на цих частотах, але на проміжних частотах може статися що завгодно.

На самому початку теорія та практика проектування цифрових фільтрів розділяються на дві окремі області, одна присвячена загальним ІІР-фільтрам, а інша обмежується лінійно-фазовими FIR-фільтрами. Теоретично загальна проблема ІІР є складнішою, і практично завжди невідомо, як вибрати мінімальну кількість коефіцієнтів, які відповідають заданій специфікації, не кажучи вже про знаходження оптимальних коефіцієнтів. Проте на практиці проблема FIR вважається складнішою, оскільки дещо

неоптимальні рішення, можуть бути використані для задачі ІІР, але не для FIR.

Почнемо з дизайну фільтра ІІР. Не будемо намагатися безпосередньо оптимізувати розмір і коефіцієнти фільтра; скоріше ми починаємо з класичної конструкції аналогового фільтра і переносимо його в цифрову область. Щоб перетворити класичний аналоговий фільтр на цифровий, потрібно його якось оцифрувати. Проблема в тому, що z -площина не схожа на аналогову (Лапласа) s -площину.

Найпростіша властивість фільтра у часовій області - це його імпульсна характеристика, і ми можемо створити цифровий фільтр, рівномірно відбираючи імпульсну характеристику будь-якої з класичних конструкцій. Передатну функцію нового цифрового фільтра можна потім відновити шляхом z -перетворення цієї вибіркової імпульсної характеристики. Неважко показати, що знайдена таким чином передатна функція буде раціональною функцією, і, таким чином, цифровий фільтр буде ARMA. Крім того, кількість полюсів зберігається, а стабільні аналогові фільтри генерують стабільні цифрові фільтри. На жаль, ЧХ такого ЦФ не буде ідентичною оригінальному аналоговому фільтру через накладення. Зокрема, класичні конструкції не стають однаково нульовими на високих частотах, і тому не можна уникнути накладення. Тому оптимальні властивості частотної області аналогових конструкцій не зберігаються при вибірці імпульсної характеристики.

Альтернативним методом перетворення аналогових фільтрів в цифрові є метод білінійного відображення, при якому потрібно знайти переведення від s -площини до z -площини та перетворити аналогові полюси та нулі у відповідні цифрові. Щоб таке відображення було дійсним, воно повинно відобразити уявну вісь $s = i\omega$ на одиничне коло $z = e^{i\omega}$, а ліва півплощина – всередину одиничного кола. Відображення (зване «білінійним», оскільки чисельник і знаменник є лінійними s) робить саме це. На жаль, будучи нелінійним, він

не зберігає частоту, але неважко знайти, що аналогову частоту можна відобразити на цифрову частоту за допомогою:

$$z = \frac{1 + s}{1 - s} \quad (2.1)$$

$$\omega_{\text{analog}} = \tan\left(\frac{1}{2}\omega_{\text{digital}}\right) \quad (2.2)$$

таким чином стискаючи аналогову вісь частоти від $-\infty$ до ∞ на цифрову вісь частоти від $-\pi$ до $+\pi$ один до одного. Таким чином, метод білінійного відображення дизайну фільтра ПР виглядає приблизно так. Спочатку «попередньо деформувати» частоти, які нас цікавлять (наприклад f_p , f_c , f_s) використовуючи рівняння (2.2). Потім потрібно спроектувати аналоговий фільтр, використовуючи дизайн Баттерворта, Чебишева, зворотного Чебишева або еліптичний дизайн. Нарешті, треба перетворити аналогову передатну функцію в цифрову, використовуючи білінійне відображення рівняння (2.1) на всіх полюсах і нулях.

FIR-фільтри безпосередньо не відповідають жодній з класичних конструкцій. Відомо, що враховуючи необхідну частотну характеристику фільтра, можна отримати його імпульсну характеристику, взявши зворотне довготривале DFT (iLTDFТ):

$$h_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{i\omega}) e^{i\omega n} d\omega \quad (2.3)$$

і що ці h_n є коефіцієнтами згортки у часовій області. Отже, теоретичні частотні характеристики ідеальних фільтрів вже мають на увазі коефіцієнти ідеальної цифрової реалізації. Припускаючи неказуальний фільтр з непарною кількістю коефіцієнтів, легко знайти наступне:

$$\begin{aligned}
\text{low-pass:} \quad h_n &= \begin{cases} \frac{\omega_c}{\pi} & n = 0 \\ \frac{\omega_c}{\pi} \text{sinc}(n\omega_c) & n \neq 0 \end{cases} \\
\text{high-pass:} \quad h_n &= \begin{cases} 1 - \frac{\omega_c}{\pi} & n = 0 \\ -\frac{\omega_c}{\pi} \text{sinc}(n\omega_c) & n \neq 0 \end{cases} \\
\text{band-pass:} \quad h_n &= \begin{cases} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\pi} & n = 0 \\ \frac{\omega_2}{\pi} \text{sinc}(n\omega_2) - \frac{\omega_1}{\pi} \text{sinc}(n\omega_1) & n \neq 0 \end{cases} \\
\text{band-stop:} \quad h_n &= \begin{cases} 1 + \frac{\omega_1 - \omega_2}{\pi} & n = 0 \\ \frac{\omega_1}{\pi} \text{sinc}(n\omega_1) - \frac{\omega_2}{\pi} \text{sinc}(n\omega_2) & n \neq 0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

На жаль, ці h_n не зникають із збільшенням $|n|$, тому, щоб реалізувати кінцевий фільтр імпульсної характеристики, ми повинні обрізати їх після деякого $|n|$.

Зрізання коефіцієнтів FIR у часовій області означає множення часових вибірок на прямокутну функцію i , отже, еквівалентно згортки в частотній області за допомогою синуса. Така згортка частотної області викликає розмивання вихідної частотної характеристики, а також додавання бічних пелюсток. Згадуючи ефект Гіббса можна сказати, що множення вхідного сигналу на плавне вікно:

$$h'_n = w_n h_n \tag{2.5}$$

а не різко розривний прямокутник має зменшити (але не усунути) негативні наслідки.

Який тип вікна слід використовувати? Віконна функція повинна плавно збільшуватися від нуля до одиниці, а потім плавно зменшуватися назад до нуля. Виконання вікна гладким зменшує бічні пелюстки ФТ вікна, але за рахунок розширення його основної пелюстки, і таким чином розширює перехідну смугу фільтра. З точки зору складності обчислень потрібно, щоб вікно було відмінним від нуля лише протягом короткого часу; але навіть непрямокутні вікна спотворюють частотну характеристику, згортаючись із ФТ вікна, і тому потрібно, щоб це ФТ було якомога вузьким. Існують сімейства

вікон (наприклад, Kaiser і Dolph-Chebyshev) з безперервно змінними параметрами.

Отже, віконний метод проектування FIR-фільтрів виглядає приблизно так.

Потрібно визначити специфікацію частотної характеристики. Обчислити імпульсну характеристику нескінченної протяжності. Вибрати віконну функцію:

Вибрати компроміс між шириною смуги пропускання та не пропускання

Вибрати компроміс між складністю та спотворенням. Помножити імпульсну характеристику нескінченної тривалості на вікно

Техніка проектування вікон корисна, коли потрібно просте програмування або швидкі результати. Однак розроблені таким чином FIR-фільтри не є оптимальними. Загалом можна знайти інші фільтри з більшим відхиленням смуги затримки та/або нижчою пульсацією смуги пропускання для тієї ж кількості коефіцієнтів. Причину неоптимальності знайти неважко, як можна легко побачити на рис. 2.1. Характеристика загасання смуги непропускання, яка повинна бути виконана, обмежує лише перший бічний пелюсток, а більш сильне відхилення, яке забезпечується всіма іншими, в основному витрачається даремно. Можливо зменшити максимальну похибку, або, як альтернативу, зменшити необхідну кількість коефіцієнтів.

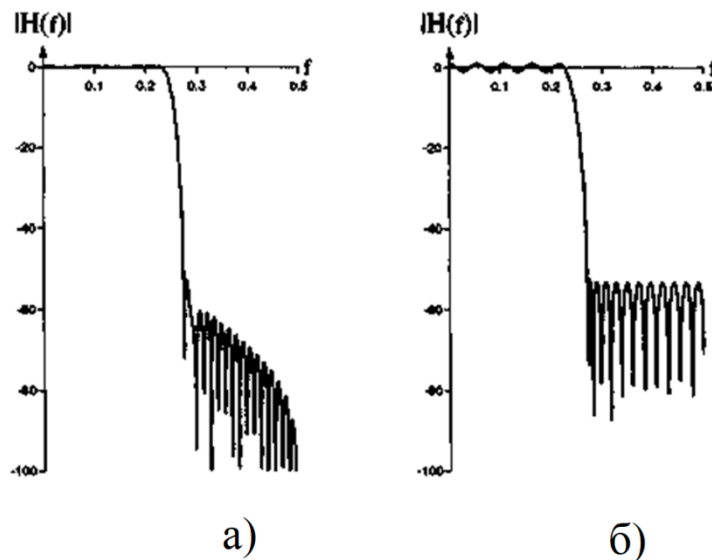


Рис. 2.1. Проектування FIR за методом вікна за алгоритмом Ремеза.

а) – частотна характеристика 71-коефіцієнтного фільтра нижніх частот, розробленого віконним методом. б) – 41-коефіцієнтний фільтр, розроблений алгоритмом Remez з використанням тієї ж специфікації.

Як і в класичному дизайні фільтра, властивість рівнозначності гарантує, що максимальне відхилення від нашої специфікації амплітуди буде мінімальним. На початку сімдесятих Макклеллан, Паркс і Рабінер опублікували паперову та комп'ютерну програму, яка використовувала алгоритм обміну Remez для проектування FIR.

Коли слід використовувати FIR-фільтри, а коли ІІР? Як правило, інтеграторами є ІІР, тоді як диференціаторами є FIR. Перетворення Гільберта, як правило, є FIR, хоча іноді використовуються проекти ІІР. Що стосується частотно-селективних фільтрів, то відповідь на це питання часто (але не завжди) дається легко. FIR-фільтри можуть бути лінійно-фазовими, у випадку ж ІІР-фільтрів вони можуть лише наближатися до них. Отже, якщо фазова характеристика є критичною, як у багатьох системах зв'язку, потрібно використовувати FIR-фільтри. Якщо фазова характеристика не має великого значення, можна використати фільтри FIR або ІІР. З точки зору складності обчислень, ІІР-фільтри майже завжди виявляються значно ефективнішими, а еліптичні фільтри мають найнижчі обчислювальні вимоги. Чим вузьчі

переходи, тим більш вираженим стає цей ефект. Однак ці еліптичні фільтри також мають найгіршу фазову характеристику, нестабільно змінюючись в околі переходів.

2.2 Структури цифрових фільтрів

Робота ЦФ відображається у їх ІІР структурних схемах та базових елементів, які показані на рис. 2.2. Зазвичай програмні реалізації фільтрів на ЕОМ ґрунтуються на структурних схемах, які, однак, не визначають спосіб технічної реалізації.

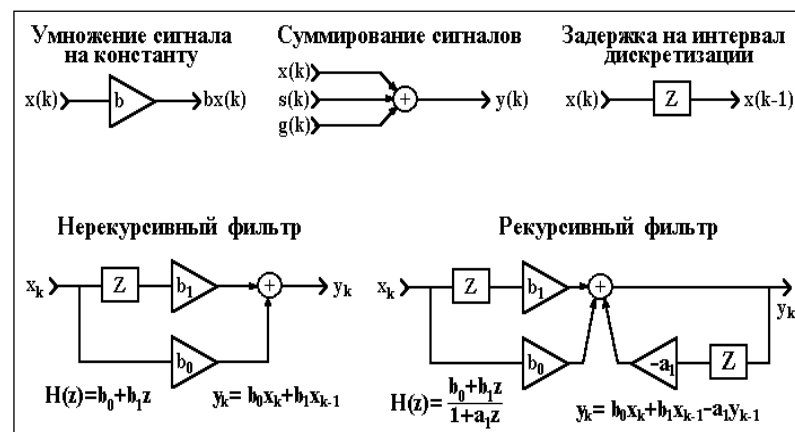


Рис. 2.2. Структури цифрових фільтрів

Наряду з структурною схемою фільтр може бути представлений таким узагальненим елементом, як граф, що спрощено показує проходження сигналів, і складається з направлених віток та вузлів.

Приклад структури фільтра з передаточною функцією $H(z) = (1 + b_1 z) / (1 + a_1 z)$ та відповідного графа наведено на рис. 2.3.

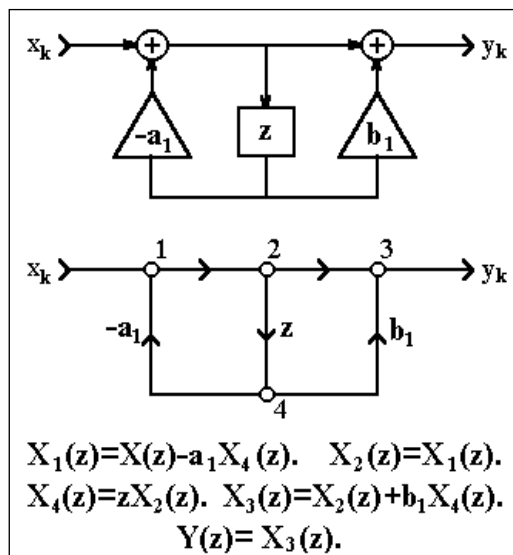


Рис. 2.3. Граф фільтра

Розрізняють такі сполучення фільтрів.

1. Послідовне спочення (рис. 2.4).

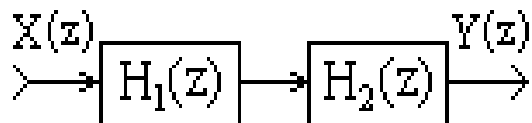


Рис. 2.4. Послідовне спочення

Загальна еквівалентна передавальна функція являє собою добуток передавальних функцій фільтрів, що до неї входять:

$$H(z) = H_1(z) \cdot H_2(z) \cdot \dots \cdot H_N(z).$$

2. Паралельне сполучення (рис. 2.5).

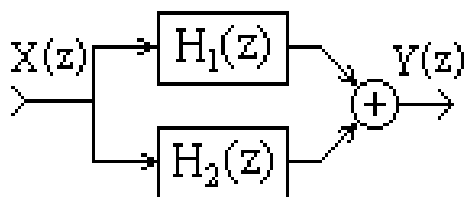


Рис. 2.5. Паралельне сполучення

Загальна еквівалентна передавальна функція рівна сумі окремих передавальних функцій:

$$H(z) = H_1(z) + H_2(z) + \dots + H_N(z).$$

3. З'єднання зі зворотним зв'язком (рис. 2.6).

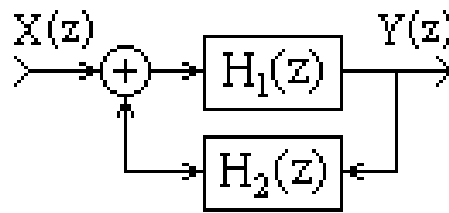


Рис. 2.6. З'єднання зі зворотним зв'язком

Загальна еквівалентна передаточна функція матиме вигляд:

$$H(z) = H_1(z) / (1 \pm H_1(z)H_2(z)).$$

За структурою розрізняють такі схеми:

1. Пряма форма (рис. 2.7) реалізується безпосередньо за різницеvim рівнянням:

$$y_k = \sum_{n=0}^N b_n x_{k-n} - \sum_{m=1}^M a_m y_{k-m},$$

або за передавальною функцією

$$H(z) = \sum_{n=0}^N b_n z^n / (1 + \sum_{m=1}^M a_m z^m).$$

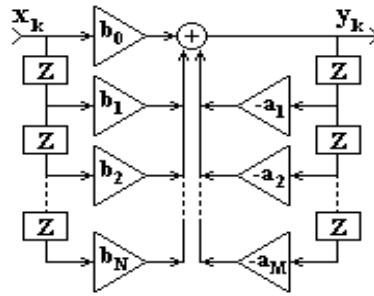


Рис. 2.7. Пряма форма фільтра

2. Пряма канонічна форма. Передаточну функцію РЦФ можна представити у такому вигляді:

$$H(z) = Y(z)/X(z) = H_1(z)H_2(z),$$

$$H_1(z) = V(z)/X(z) = 1/(1 + \sum_{m=1}^M a_m z^m),$$

$$H_2(z) = Y(z)/V(z) = \sum_{n=0}^N b_n z^n.$$

Звідси:

$$v(k) = x(k) - \sum_{m=1}^M a_m v(k-m), \quad (2.6)$$

$$y(k) = \sum_{n=0}^N b_n v(k-n). \quad (2.7)$$

У різницевих рівняннях (2.6-2.7) здійснюється лише затримка сигналів $v(k)$. Спосіб організації РЦФ у прямій канонічній формі з допомогою графів наведено на рис. 2.8.

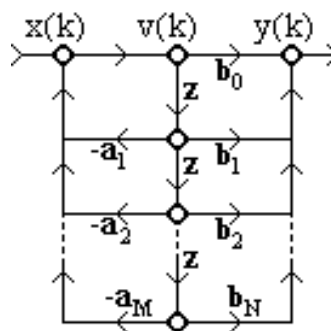


Рис. 2.8. Спосіб організації РЦФ у прямій канонічній формі з допомогою графів

3. Каскадна форма. Передаточна функція являє добуток:

$$H(z) = \prod_{i=1}^k H_i(z)$$

$H_i(z)$ - складові $(1-r_i z)/(1-p_i z)$ при поданні $H(z)$ в факторизованій формі, де r_i і p_i - нулі і полюси $H(z)$.

4. Паралельна форма використовується набагато рідше, і відповідає поданню передаточної функції як суми простіших функцій.

Транспозиція графів виконується шляхом зміни спрямування всіх гілок кола, при цьому вхід та вихід графа також змінюються місцями. Приклад транспозиції графа показано на рис. 2.9.

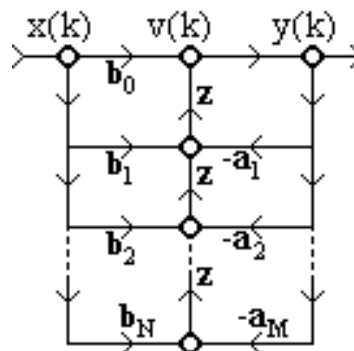


Рис. 2.9. Приклад транспозиції графа

2.3 Висновки до розділу 2

Незважаючи на те, що теорія проектування цифрових фільтрів добре розвинена, вона, як правило, в основному складається з методів обмеженої мінімізації помилки апроксимації. Основна складність в проектуванні фільтра полягає в тому, як обмежити частотну характеристику фільтра так, щоб вона не відхилялася від заданої на будь-якій частоті.

Проаналізовано принцип роботи та структуру FIR та IIR фільтрів.

Встановлено, що FIR-фільтри можуть бути лінійно-фазовими, тоді як фільтри ІІР можуть лише наближатися до них. Отже, якщо фазова характеристика є критичною, як у багатьох системах зв'язку, потрібно використовувати FIR-фільтри. Якщо фазова характеристика не має великого значення, можна використати будь який тип фільтра. З точки зору складності обчислень, ІІР-фільтри майже завжди виявляються значно ефективнішими, а еліптичні фільтри мають найнижчі обчислювальні вимоги. Чим вужчі переходи, тим більш вираженим стає цей ефект. Однак ці еліптичні фільтри також мають найгіршу фазову характеристику, нестабільно змінюючись в околі переходів.

Проаналізовано структури цифрових фільтрів та різні форми їхнього з'єднання і передаточні функції, що отримуються при цьому.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Огляд програмних засобів розрахунку цифрових фільтрів

Порівняємо можливості п'яти комп'ютерних програм для розрахунку цифрових фільтрів: NUMERI, Matlab, Filter Free 2.1, Digfltr, Digital Filters.

Ручний розрахунок цифрових фільтрів дуже трудомісткий навіть для FIR-фільтрів, оскільки якість розрахунків необхідно тестувати шляхом порівняння АЧХ синтезованого фільтра з бажаною АЧХ. Після тестування, можливо, доведеться перерахувати коефіцієнти фільтра, причому таких ітерацій може бути кілька. Ще більш трудомістка задача розрахунку IIR-фільтрів, що зводиться до аналогічної ітераційної схеми. У цьому очевидна актуальність автоматизації, з урахуванням ПК, розрахунків цифрових фільтрів.

Оскільки на сьогодні створено значну кількість комп'ютерних програм, виникає проблема вибору найкращої програми.

Порівняємо потенційні можливості п'яти комп'ютерних програм: NUMERI, Matlab, Filter Free 2.1, Digfltr, Digital Filters. Критерії порівняння: широкість переліку функціональних можливостей; обмеження; можливість моделювання процесу фільтрації тощо.

Загальні характеристики програми NUMERI:

- 1) ОС: MS DOS;
- 2) Розраховуються лише цифрові фільтри;
- 3) Розраховуються як FIR, так і IIR-фільтри;
- 4) Максимальна частота дискретизації – 10^6 - 10^7 Гц;
- 5) Типи фільтра – НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;
- 6) Порядок фільтра – призначається;

- 7) Розраховуються: коефіцієнти фільтра, відліки ІХ, відліки ЧХ (АЧХ та ФЧХ або дійсна та уявна частини ЧХ);
- 8) Нормування коефіцієнтів фільтра: не проводиться (таке нормування іноді проводять для досягнення значення 1 у середині смуги пропускання АЧХ);
- 9) Відображаються: аналітичний вираз функції передачі, таблиця коефіцієнтів фільтра, ІХ (графік та таблиця), ЧХ (графік та таблиця);
- 10) Полюси та нулі на z-площині – не відображаються;
- 11) Структурна схема фільтра – не відображається;
- 12) Фільтрування набору даних – можливе, але тільки для модельних сигналів;
- 13) Генерація модельних сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – можливі.

Синтез FIR-фільтрів:

- 1) Метод синтезу - прямий (зворотне ПФ з використанням вікон);
- 2) Вікна – набір «стандартних» вікон: прямокутне, трикутне, Ханна, Хеммінга, Блекмена, Ланчоса;
- 3) Максимальний порядок фільтра – 199;
- 4) Особливість розрахунків – симетрична нумерація коефіцієнтів фільтра (коефіцієнти з негативними номерами дорівнюють коефіцієнтам з позитивними номерами).

Синтез IIR-фільтрів:

- 1) Метод синтезу: білінійне z-перетворення, фільтри-прототипи - Баттерворта, Бесселя, Чебишева 1 роду, Кауера;
- 2) Подання функції передачі: як секцій другого порядку;
- 3) Максимальний порядок фільтру – 10.

Загальні характеристики програми Matlab

З точки зору користувача Matlab, є три способи проведення розрахунків:

- 1) у командному вікні;

- 2) у вбудованому пакеті sptool;
- 3) у вбудованому пакеті fdatool.

Крім того в пакеті DSP Blockset, (програма Filter Realisation Wizard) є три способи побудови структурних схем фільтрів:

- 1) з урахуванням бібліотеки блоків пакета Simulink;
- 2) з урахуванням бібліотеки блоків пакету DSP Blockset;
- 3) на базі бібліотеки блоків із фіксованою комою.

Розрахунки у командному вікні

- 1) Фільтри - аналогові та цифрові;
- 2) Цифрові фільтри - FIR та IIR;
- 3) Типи фільтра – НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний, багатосмуговий із пропусканням НЧ, багатосмуговий із затриманням НЧ;
- 4) Порядок фільтра – призначається чи обчислюється мінімально можливе;
- 5) Розраховуються: - коефіцієнти фільтра; відліки IX; перехідна функція; ЧХ; нулі, полюси та коефіцієнт підсилення; параметри фільтра у просторі станів; час групової затримки;
- 6) Є функції трансформації одних способів опису фільтра на інші;
- 7) Відображаються: результати розрахунків у табличній чи графічній формі;
- 8) Структурна схема фільтра – не відображається;
- 9) Фільтрування набору даних – можливе (кількість відліків не обмежена);
- 10) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – можливі.

Синтез FIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу - прямий (зворотне ПФ з використанням вікон); косінусоїдальне згладжування; мінімізація середньоквадратичної помилки; мінімаксна апроксимація; мінімізація норми помилки;

2) Вікна – будь-які, але є набір «стандартних» вікон: прямокутне, трикутне, Бартлетта, Ханна, Бартлетта-Ханна, Хеммінга, Блекмена, Блекмена-Херріса, Кайзера, Тьюкі, Чебишева, Гауса, Бохмана, Нутталла;

3) Максимальний порядок фільтра – 10^6 .

Синтез ІІR-фільтрів:

1) Методи синтезу: а) білінійне z-перетворення, фільтри-прототипи – Баттерворта, Чебишева, Кауера або довільний аналоговий прототип (особливість – не можна синтезувати цифровий фільтр Бесселя); б) прямі методи: авторегресійний метод (Юла-Уолкера); експонентна апроксимація Проні; в) інваріантне перетворення ІХ; г) розкладання за сингулярними числами матриці Ганкеля, заповненої відліками ІХ;

2) Подання передавальної функції: як секцій другого порядку;

3) Максимальний порядок фільтру – 100.

Додатково:

1) Особливості розрахунків FIR-фільтрів: а) нумерація коефіцієнтів фільтра починається з нуля; б) коефіцієнти фільтра автоматично нормуються для досягнення значення 1 у середині смуги пропускання АЧХ – це нормування може бути скасовано лише за розрахунків у командному вікні;

2) Операція диференціювання може бути реалізована диференціюючим фільтром, що відноситься до класу FIR-фільтрів;

3) Операція інтегрування може бути реалізована інтегруючими фільтрами, що належать до класу ІІR-фільтрів;

4) Перетворення Гільберта може бути приблизно реалізовано як за допомогою усічених FIR-фільтрів, так і за допомогою ІІR-фільтрів;

5) Є можливість розрахунку квантованих фільтрів (розрахунок з урахуванням похибки заокруглення коефіцієнтів фільтрів).

Розрахунки у пакеті sptool

1) Фільтри – лише цифрові фільтри - FIR та ІІR;

3) Максимальна частота дискретизації – 10^{201} ;

4) Типи фільтра - НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;

- 5) Порядок фільтра – призначається.
- 6) Розраховуються: - коефіцієнти фільтра; відліки ІХ; перехідна функція; ЧХ; нулі та полюси; час групової затримки;
- 7) Відображаються: результати розрахунків у графічній формі, з можливістю знімання значень за допомогою 2-х маркерів;
- 8) Структурна схема фільтра – не відображається;
- 9) Фільтрування набору даних - можливе (у відліках необмежено);
- 10) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлювання – неможливі (фільтрований сигнал імпортується з робочого простору Matlab);
- 11) Параметри синтезованого фільтра – можуть бути експортовані до робочого простору Matlab;
- 12) Є можливість графічного редагування (мишкою) положення нулів та полюсів на z-площині.

Синтез FIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу - прямий (зворотне ПФ з використанням вікна Кайзера); мінімізація середньоквадратичної помилки (least squares FIR); мінімаксна апроксимація (equiripple FIR);
- 2) Вікна: тільки Кайзер;
- 3) Максимальний порядок фільтра – 10^3 .

Синтез IIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу: а) білінійне z-перетворення, фільтри-прототипи – Баттерворта, Чебишева, Кауера або довільний аналоговий прототип (особливість – не можна синтезувати цифровий фільтр Бесселя);
- 2) Максимальний порядок фільтру – 10^3 .

Розрахунки у пакеті fdatool

- 1) Фільтри – лише цифрові фільтри - FIR та IIR;
- 3) Максимальна частота дискретизації – 10^{301} ;
- 4) Типи фільтра - НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;

- 5) Порядок фільтра – призначається чи обчислюється мінімально можливий;
- 6) Розраховуються: - коефіцієнти фільтра; ІХ; ПХ; ЧХ; нулі та полюси; час групової затримки;
- 7) Відображаються: результати розрахунків у графічній формі, коефіцієнти фільтра – у табличній формі;
- 8) Структурна схема фільтра – відображається лише для квантованих фільтрів;
- 9) Фільтрування набору даних – неможливе;
- 10) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – неможливі;
- 11) Є можливість розрахунку квантованих фільтрів (розрахунок з урахуванням похибки квантування).

Синтез FIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу - прямий (зворотне ПФ з використанням вікна Кайзера); мінімізація середньоквадратичної помилки; мінімаксна апроксимація;
- 2) Максимальний порядок фільтра – 100 для методу мінімаксної апроксимації (equiripple FIR) та 300 – для інших методів;
- 3) Додатково є спеціальні різновиди FIR-фільтрів: диференціатор; перетворювач Гільберта; багатосмуговий; з АЧХ довільної (кусково-лінійної) форми; з довільно заданою груповою затримкою; половинно-смуговий (загасання на частоті зрізу становить -6 дБ щодо смуги пропускання); фільтр Найквіста; фільтр з косинусним згладжуванням.

Синтез IIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу: а) білінійне z-перетворення, фільтри-прототипи – Баттерворта, Чебишева, Кауера або довільний аналоговий прототип (особливість – не можна синтезувати цифровий фільтр Бесселя);
- 2) Максимальний порядок фільтра – 100 для фільтрів-прототипів Баттерворта; 30 для фільтрів-прототипів Чебишева 1 і 2 роду та Кауера;

3) Додатково є спеціальні різновиди ІІR-фільтрів: з АЧХ довільної (кусково-лінійної) форми; із довільно заданою груповою затримкою.

Загальні характеристики програми Filter Free 2.1.

Дана програма є демо-версією програм Filter Solutions і Filter Light, що безкоштовно розповсюджується.

Загальні характеристики:

- 1) ОС: Windows;
- 2) Фільтри - як цифрові, так і аналогові (до класу аналогових фільтрів входять: пасивні, активні та фільтри для ліній електропередачі);
- 3) Цифрові фільтри: FIR та ІІR;
- 4) Максимальна частота дискретизації – немає обмежень;
- 5) Типи фільтра - НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;
- 6) Порядок фільтра – призначається (у програмі Filter Free – не більше 10 для цифрових фільтрів та не більше 3 – для аналогових);
- 7) Розраховуються: - коефіцієнти фільтра; ІХ; перехідна функція; відгук на пилкоподібну дію; ЧХ; нулі та полюси; час групової затримки;
- 8) Відображаються: результати розрахунків у табличній чи графічній формі;
- 9) Структурна схема фільтра – не відображається;
- 10) Фільтрування набору даних – неможливе;
- 11) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – неможливі.

Синтез FIR-фільтрів:

- 1) Методи синтезу FIR - прямий (зворотне ПФ з використанням вікон); косинусне згладжування; мінімаксна апроксимація;
- 2) Вікна – набір «стандартних» вікон: прямокутне, Бартлетта, Ханна, Хеммінга, Блекмена, Блекмена-Херріса, Кайзера, Дольфа-Чебишева;
- 3) Додатково є спеціальні різновиди FIR-фільтрів: із заданою груповою затримкою; фільтри з АЧХ у вигляді косинусоїди або синусоїди.

Додатково: Особливості розрахунків FIR-фільтрів: а) нумерація коефіцієнтів фільтра починається з нуля; б) нормування (за замовчуванням) коефіцієнтів фільтра (для досягнення значення 1 у середині смуги пропускання АЧХ)

Синтез ІІR-фільтрів:

1) Метод синтезу: білінійне z -перетворення (фільтри-прототипи – Баттерворта, Чебишева, Кауера; Бесселя; Гаусса);

2) Додатково є спеціальні різновиди ІІR-фільтрів: узгоджений фільтр з імпульсоподібною ІХ; із заданою груповою затримкою; фільтр «пісочний годинник».

Загальні характеристики програми Digfltr.

- 1) ОС: Windows;
- 2) Фільтри – лише цифрові;
- 3) Цифрові фільтри: лише ІІR;
- 4) Максимальна частота дискретизації – немає обмежень;
- 5) Типи фільтра - НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;
- 6) Порядок фільтра – автоматично обчислюється мінімальний порядок;
- 7) Розраховуються: передавальна функція; ЧХ; полюси у площинах s та z ;
- 8) Відображаються: значення полюсів – у табличній формі; АЧХ – у графічній формі; передавальна функція – в аналітичній формі;
- 9) Структурна схема фільтра – розраховується та відображається для послідовної та паралельної форм реалізації;
- 10) Фільтрування набору даних – неможливе;
- 11) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – неможливі;
- 12) Метод синтезу: білінійне z -перетворення (фільтри-прототипи - Баттерворта, Чебишева 1 роду).

Загальні характеристики програми Digital Filters.

- 1) ОС: MS DOS;

- 2) Фільтри – лише цифрові;
- 3) Цифрові фільтри: лише IIR;
- 4) Максимальна частота дискретизації – немає обмежень;
- 5) Типи фільтра - НЧ, ВЧ, смуговий, режекторний;
- 6) Порядок фільтра – автоматично обчислюється мінімальний порядок;
- 7) Розраховуються: - коефіцієнти фільтра; передавальна функція; ЧХ;
- 8) Відображаються: значення коефіцієнтів фільтра – у табличній формі; АЧХ – у графічній формі; передавальна функція – в аналітичній формі;
- 9) Структурна схема фільтра – не розраховується;
- 10) Фільтрування набору даних – неможливе;
- 11) Генерація сигналів (для подальшої фільтрації) та їх зашумлення – неможливі;
- 12) Метод синтезу: білінійне z-перетворення (фільтри-прототипи - Баттерворта, Чебишева 1 роду, Золотарьова).

Зіставляючи обсяги наведених вище переліків функціональних можливостей, неважко дійти висновку про найкращим є пакет програм Matlab. В наявності навіть відома надмірність пакету Matlab: той самий фільтр можна розрахувати кількома способами.

Найбільш гнучкими є розрахунки у командному вікні (або за допомогою .m-файлів). Перевагою такого способу є максимально повне використання функціональних можливостей пакета. Недолік – необхідно пам'ятати синтаксис численних команд-функцій. Часте звернення до довідників з метою уточнення синтаксису призводить до неминучого уповільнення темпу розрахунків.

Від зазначеного недоліку допомагають способи розрахунків, що базуються на використанні програм, що входять до складу Matlab, fdatool і sptool зі зручно організованими графічними інтерфейсами. Проте, як очевидно з розгляду переліків функцій цих програм, прискорення розрахунків досягається ціною відомого обмеження функціональних можливостей.

Програма Filter Free (і більш просунуті аналоги) істотно відрізняється від інших розглянутих тут програм можливістю розрахунку активних фільтрів і фільтрів для ліній електропередачі.

У програмі Matlab відсутня можливість розрахунку цифрових фільтрів за фільтрами-прототипами Бесселя.

Недоліком програми NUMERI є задання абсолютних, а не відносних, значень частот зрізу. Результатом такого технічного рішення є: 1) необхідність обмеження частоти дискретизації; 2) необхідність задання абсолютного значення частоти дискретизації; 3) можлива аварійна зупинка програми при моделюванні процесу фільтрації через нестикування значень періодів дискретизації модельного процесу та розрахованого фільтра.

Ще один помітний недолік NUMERI – неможливість оптимізації розрахунків у сенсі мінімізації порядку фільтра. Крім того, максимальний порядок ІІР-фільтрів не більше 10 може виявитися недостатньо високим при вирішенні деяких практичних завдань.

Нарешті, у програмі NUMERI відсутня можливість автоматичної побудови структурних схем фільтрів.

Програми Digfltr та Digital Filters мають ще більш виражений навчальний характер. Їхні можливості обмежуються розрахунком деяких типів рекурсивних фільтрів.

Моделювання процедури фільтрації. Таке моделювання винятково корисне як для навчальних цілей, так і для експериментальної перевірки правильності технічних рішень.

У пакеті Matlab можливість такого моделювання не передбачена лише у програмі fdatool – за інших способів розрахунку фільтрів (командне вікно, програма sptool) як тестові сигнали можливе використання не тільки модельних (“математичних”) сигналів, а й реальних сигналів від зовнішніх джерел (датчиків).

У програмі NUMERI також можливе застосування невеликої кількості модельних сигналів (синусоїда, прямокутник або трикутник, що періодично

повторюються), так і обробка реальних сигналів. У програмах Filter Free, Digfltr та Digital Filters такої можливості немає.

3.2 Розрахунок цифрових фільтрів у середовищі Matlab

Команда генерування коефіцієнтів a_k і b_k рекурсивного фільтра Баттерворта:

$$[a,b] = \text{butter}(n,Wn,'ftype')$$

Сенс позначень той самий, як і для нерекурсивного фільтра.

Якщо Wn є двоелементним вектором, тобто $Wn = [w1 \ w2]$, функція `butter` повертає коефіцієнти смугового фільтра порядку $2n$ зі смугою пропускання (або затримування – для режекторних фільтрів) $w1 < w < w2$.

Функції генерування коефіцієнтів a_k і b_k рекурсивних фільтрів Чебишева та еліптичних фільтрів мають вигляд:

$$[a,b] = \text{cheby1}(n,Rp,Wn,'ftype')$$

$$[a,b] = \text{cheby2}(n,Rs,Wn,'ftype')$$

$$[a,b] = \text{ellip}(n,Rp,Rs,Wn,'ftype')$$

Сенс параметрів Rp і R_s зрозумілий із схематичного малюнка специфікацій фільтра ($Rp=A_{\text{pass}}$, $R_s=A_{\text{stop}}$) – це гранично допустимі рівні нерівномірності АЧХ.

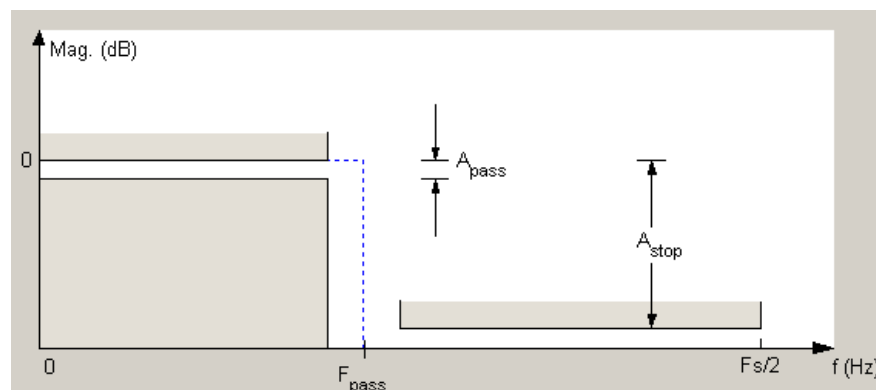


Рис. 3.1. Схематичне позначення специфікацій фільтра

Існує кілька способів побудови графіків АЧХ та ФЧХ. При використанні команд:

```
freqz(a,b)
```

або

```
freqz(a,b,N) % N – число відліків АЧХ та ФЧХ
```

При використанні наступних команд використовуються ненормовані частоти:

```
[H,f] = freqz(a,b,N,fs);
```

```
figure; plot(f,20*log10(abs(H))); grid on
```

будується АЧХ від нуля до $fs/2$.

З допомогою команд:

```
[phi,f] = phasez(a,b,N,fs);
```

```
figure; plot(f,phi/pi*180); grid on
```

будується ФЧХ від нуля до $fs/2$.

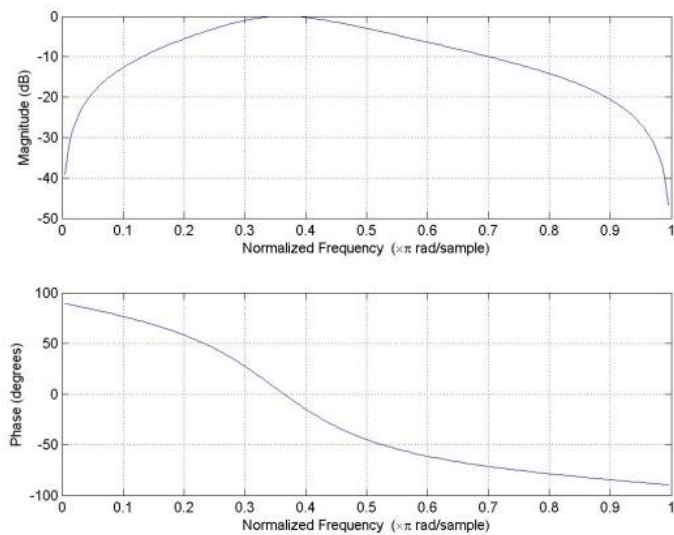


Рис. 3.2. АЧХ і ФЧХ смугового фільтра Баттерворта 2-го порядку

Побудова графіка ІПХ виконується командами (рис. 3.3):

```
[h,t] = impz(a,b);
```

```
stem(t,h)
```

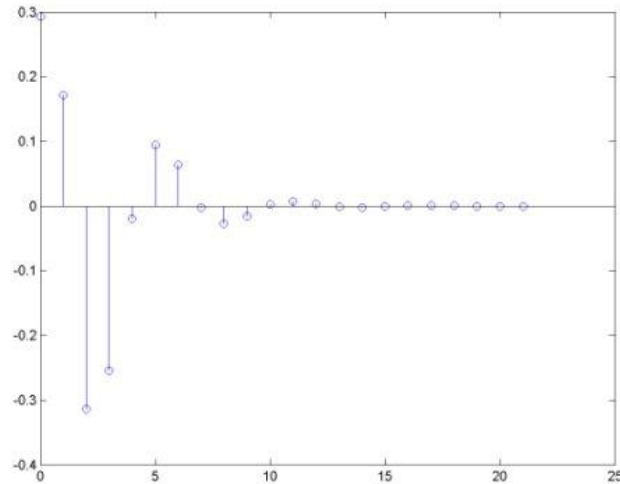


Рис. 3.3. ІПХ смугового фільтра Баттерворта 2-го порядку

Пара команд

```
[h,t] = impz(a,b,N);    % N – число відліків ІПХ
stem(t,h)
```

будує графік N відліків імпульсної ІПХ.

3.3 Моделювання цифрової фільтрації

Таке моделювання проводиться у 3 етапи:

- 1) моделювання вхідного процесу x_n та побудова його графіка;
- 2) цифрова фільтрація процесу x_n , в результаті якої отримуємо процес y_n
- 3) побудова графіка процесу y_n та зіставлення його з графіком процесу x_n

Моделювання відрізка вхідного процесу x_n у вигляді гармонічного сигналу частотою f_0 , дискретизованого з частотою F_d :

```
t=0:1/Fd:T;
```

```
x=sin(2*pi*f0*t);
```

Побудова графіка процесу x_n :

```
plot(t,x);
```

Моделювання відрізка послідовності прямокутних імпульсів s_n що йдуть з частотою f_0 , тривалістю $\tau < \frac{1}{f_0}$ с, дискретизованого із частотою F_d :

```
t=0:1/Fd:T;
```

```
s=(square(2*pi*f0*t, f0*tau*100)+1)/2; % f0*tau*100 – відношення
```

довжини імпульсу до періоду у відсотках

Моделювання відрізка шуму r_n в вигляді білого шуму тієї ж тривалості T с, дискретизованого з частотою F_d :

```
r=randn(1,length(t)); % вектор-рядок
```

Моделювання адитивної суміші синусоїдного сигналу та білого шуму:

```
xr=x+r;
```

Два способи фільтрації у командному вікні

Два способи:

1) за допомогою функції дискретної фільтрації:

```
y=filter(a,b,x);
```

2) за допомогою функції згортки:

```
y=conv(x,a);
```

Особливості фільтрації за допомогою функції дискретної фільтрації:

1) можна працювати як з FIR-, так і з IIR фільтрами;

2) довжина відгуку дорівнює довжині дії.

Особливості фільтрації за допомогою функції згортки:

1) можна працювати тільки з FIR-фільтрами;

2) довжина відгуку дорівнює сумі довжин впливу та ППХ мінус

одиниця

Функція $y=filter(a,b,x)$ реалізує обчислення результату фільтрації «безпосередньо», тобто, за допомогою рівняння цифрової фільтрації:

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M b_k y(n-k).$$

Оскільки FIR-фільтр можна розглядати як окремий випадок IIR-фільтра (усі коефіцієнти b_k , крім b_0 , рівні нулю), функція $y=\text{filter}(a,b,x)$ придатна як для FIR-, так і для IIR фільтрів. Що стосується протяжності відгуку, очевидно, для IIR-фільтрів вона нескінченна. Для функції $y=\text{filter}(a,b,x)$ протяжність відгуку усікається: залишається кількість елементів, що дорівнює протяжності впливу.

Функція $y=\text{conv}(x,a)$ реалізується з допомогою алгоритму ШПФ, тобто забезпечує обчислення так званої “періодичної згортки”. Для цього спочатку послідовності, що згортаються, доповнюють нулями і обчислюють ШПФ від кожної послідовності:

$$X = \text{fft}([x \text{ zeros}(1,\text{length}(a)-1)]);$$

$$A = \text{fft}([a \text{ zeros}(1,\text{length}(x)-1)]);$$

Потім обчислюють зворотнє ШПФ (ЗШПФ) від поелементного добутку отриманих спектрів:

$$y = \text{ifft}(X.*Y)$$

Такий спосіб фільтрації можливий тільки для FIR-фільтрів.

3.4 Розрахунки цифрових фільтрів у Matlab

3.4.1. Розрахунок FIR-фільтра

Розрахуємо НЧ FIR-фільтр з вікном Кайзера трьома способами: у командному вікні та за допомогою програм `sptool` та `fdatool`. Параметри фільтра: частота дискретизації $F_s = 100\text{Гц}$; межа смуги пропускання $f_p = 25\text{Гц}$; межа смуги затримування $f_a = 33\text{Гц}$; помилка синтезу у смузі пропускання 0.05, а смузі затримування – 0.01.

Скрипт для розрахунків з командного вікна або за допомогою `.m`-файлу наведено в Додатку А. Отримані внаслідок розрахунків графіки АЧХ та ФЧХ подані на рис. 3.4.

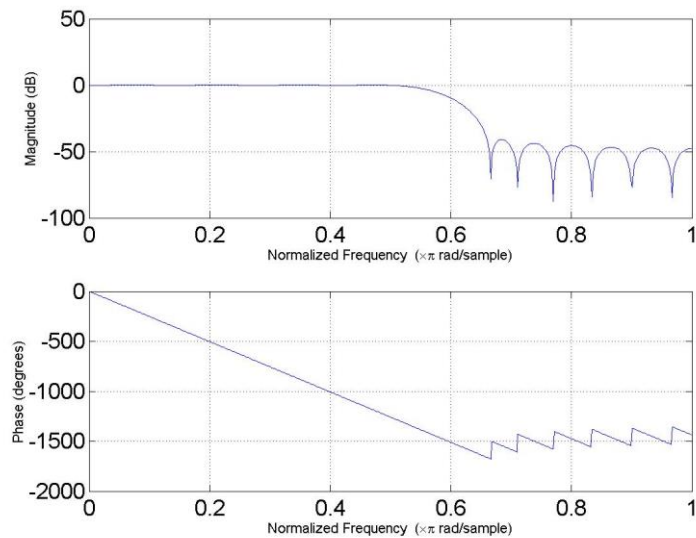


Рис. 3.4. Графіки АЧХ та ФЧХ

Ті самі розрахунки в пакеті `sptool` проводяться в такий спосіб. У вікні `Filter Designer` задаємо потрібні вихідні параметри.

Після натискання кнопки `Apply` отримуємо такий самий графік, як і на рис.3.2, зі значеннями параметрів $n=28$; $\alpha=3.395$, а також з отриманими значеннями $R_p=0.1746$ і $R_s=41.02$, що цілком відповідає заданим вимогам.

Сенс параметрів R_p і R_s – це нерівномірність АЧХ у смузі пропускання та ступінь придушення у смузі затримування, виражені у дБ.

Нарешті, проведемо ті самі розрахунки у пакеті `fdatoool`. У вікні `Filter Designe & Analysis Tool` задаємо також вихідні параметри.

Після натискання кнопки `Designe Filter` отримуємо такий самий графік, як і на рис.1, зі значенням параметра $n=28$. Інші параметри синтезованого фільтра не відображаються. Неважко бачити, що значення параметрів A_{pass} , A_{stop} аналогічне змісту параметрів R_p і R_s .

3.4.2. Розрахунок фільтра за допомогою пакета `sptool`

Для активізації пакета необхідно запустити на виконання команду `sptool`. Далі потрібно вибрати “New” в розділі “Filters” (рис. 3.5).

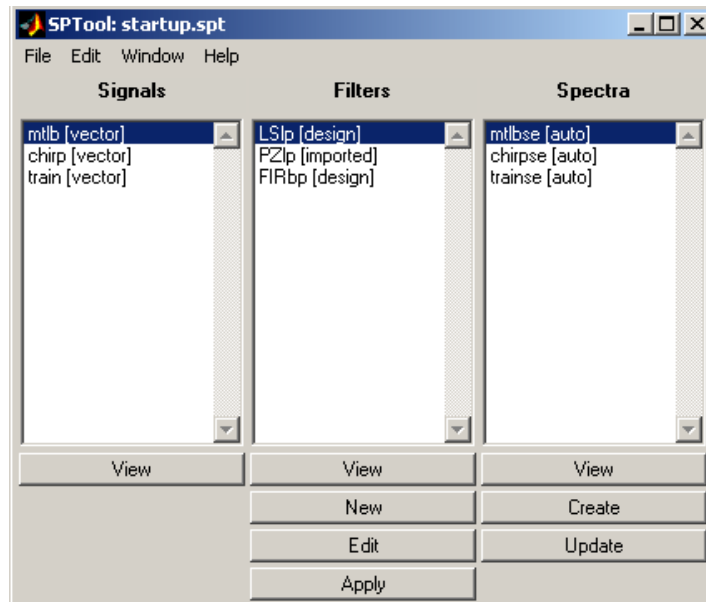


Рис. 3.5. Вікно sptool

В вікні, що відкрилось (рис. 3.6) потрібно вказати такі параметри, як: частота дискретизації, Kaiser Window FIR, вказати за необхідності порядок фільтра, його тип та частоту зрізу та натиснути Apply.

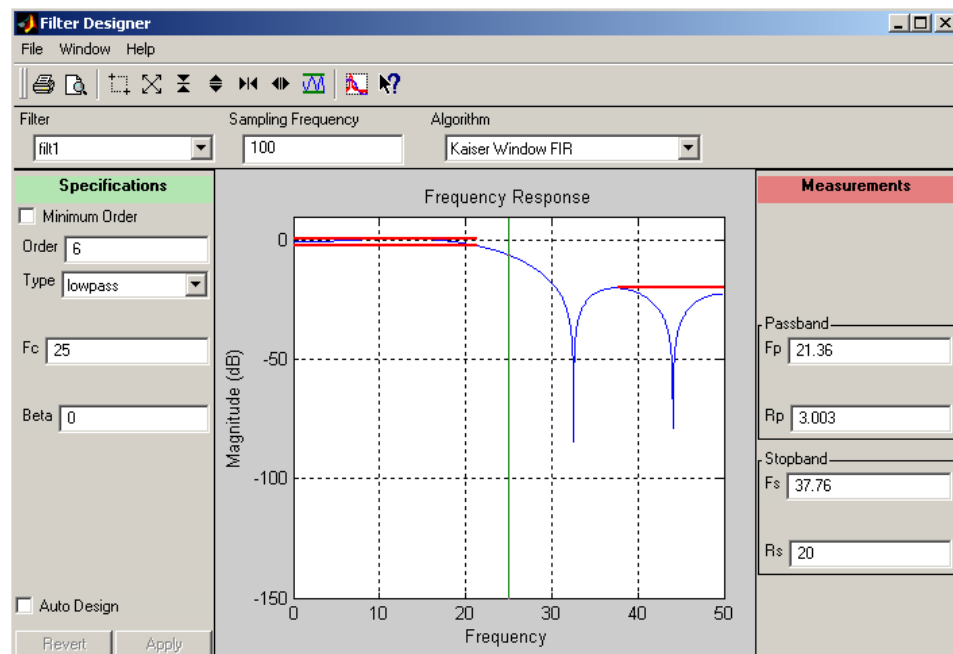


Рис.3.6. Вікно Filter Designer

Дальше вибираємо View в розділі Filters.

У вікні Filter Viewer відображаються усі характеристики фільтра.

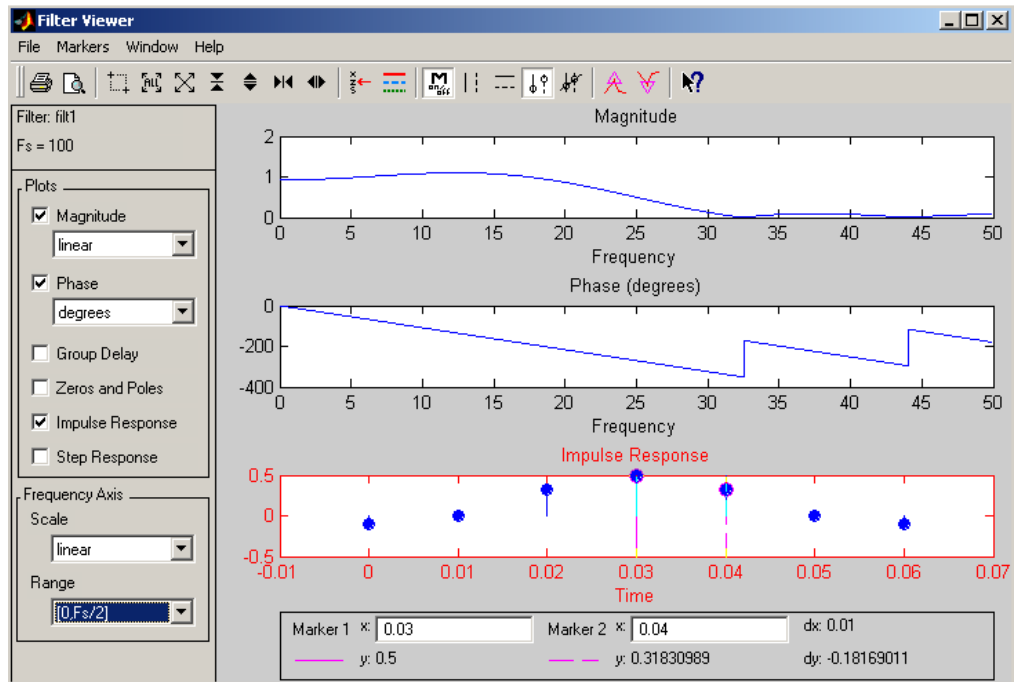


Рис.3.7. Вікно Filter Viewer

3.4.3. Розрахунок фільтра за допомогою пакета fdatool

Для активізації пакета необхідно ввести команду fdatool.

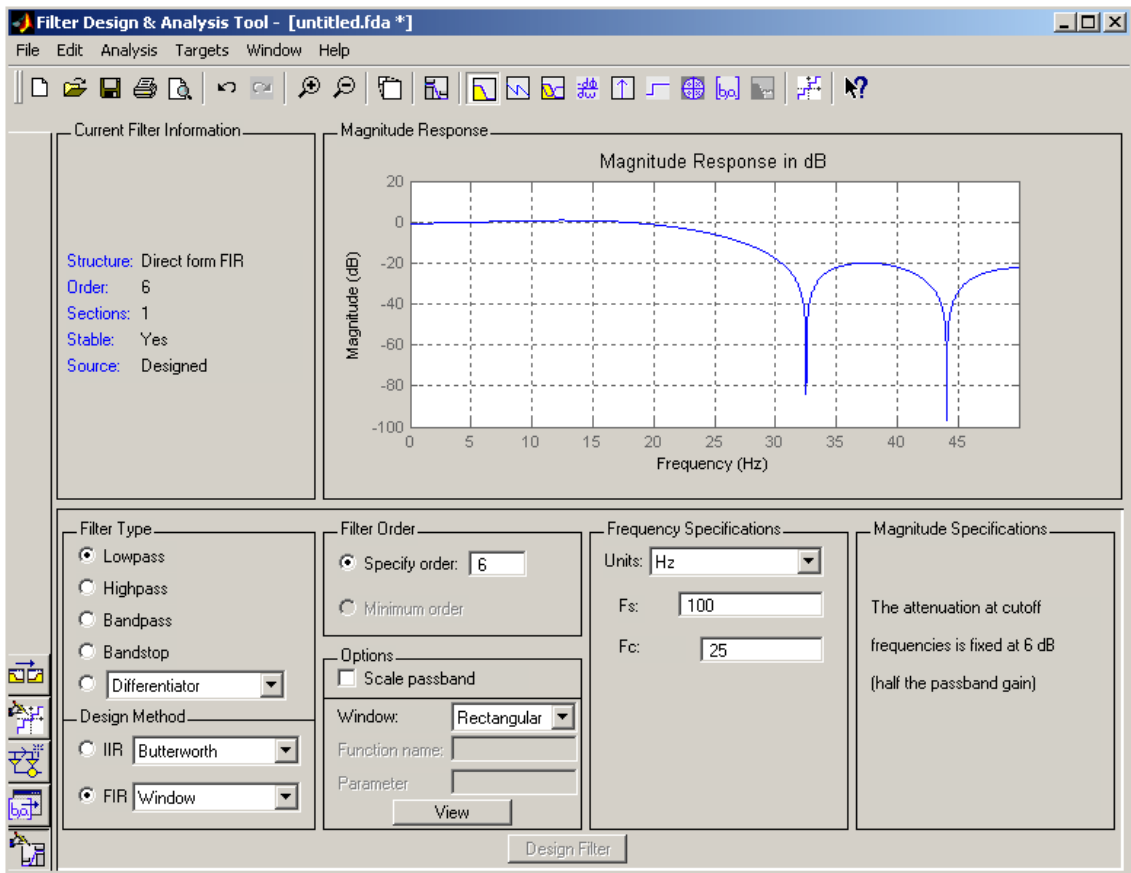


Рис.3.8. Вікно fdatool

Потім у вікні (рис.3.8) потрібно задати усі необхідні параметри.

Можна бачити, що тут за замовчуванням проводиться нормування ПХ.

3.4.4. Зіставлення способів розрахунку

Розрахунки у командному вікні: перевага – гнучкість управління розрахунками; недолік - складний синтаксис команд; особливість – коефіцієнти фільтра за умовчанням є нормованими, хоча заданням значення 'noscale' параметра 'normalization' можна відмовитися від нормування.

Розрахунки за допомогою пакета sptool: перевага – не потрібно пам'ятати синтаксис команд; Недолік - обмежений набір вікон для способу зворотного перетворення Фур'є (тільки вікно Кайзера); особливість – обчислюються лише ненормовані коефіцієнти фільтра.

Розрахунки за допомогою пакета fdatool: перевага – не потрібно пам'ятати синтаксис команд; особливість – обчислюються лише нормовані коефіцієнти фільтра.

3.5 Фільтрація акустичного сигналу в модулі sptool

Для експерименту було завантажено в Matlab сигнал, який наведений на рис. 3.9. Сигнал містить шум.

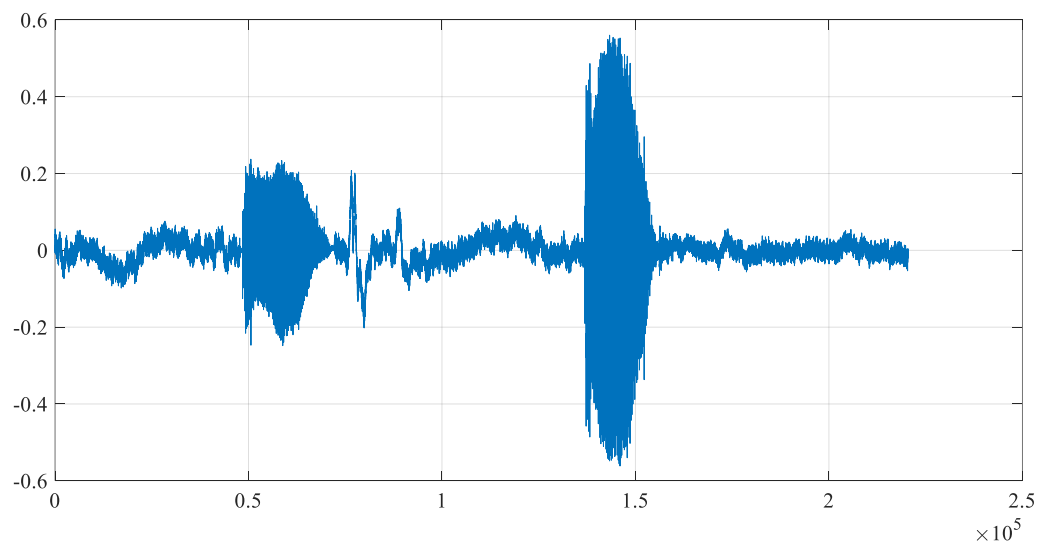
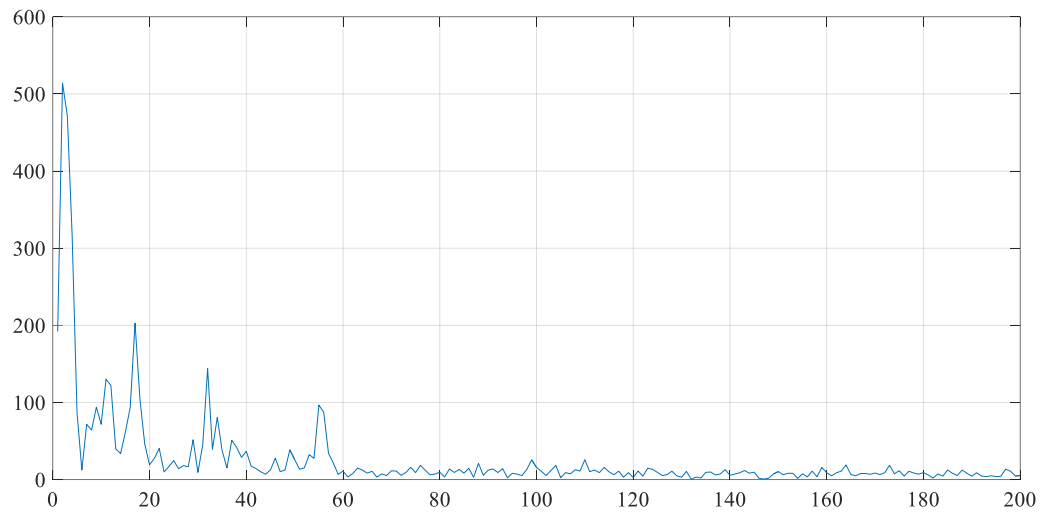
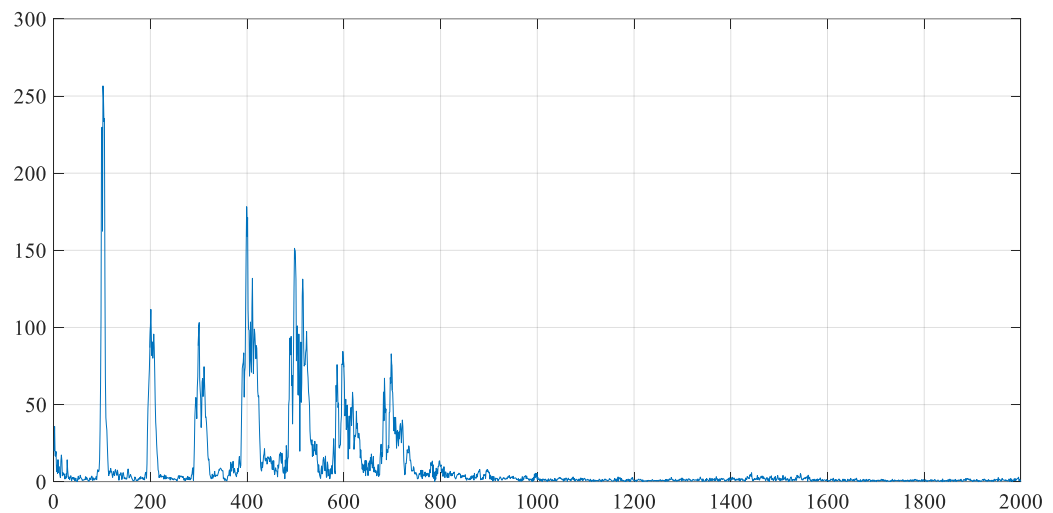


Рис.3.9. Вхідний сигнал

Попередньо проведено оцінювання спектру шуму, вигляд якого наведено на рис. 3.10.



а)



б)

Рис. 3.10. спектр шумової складової сигналу (а) та сигналу (б)

При цьому встановлено, що шум зосереджений в ділянці від 0 до 600 Гц, а корисний сигнал в діапазоні 80-800 Гц. На основі цих даних проведено моделювання цифрового фільтра в модулі `sptool`. Параметри встановлено такі, як на рис. 3.11.

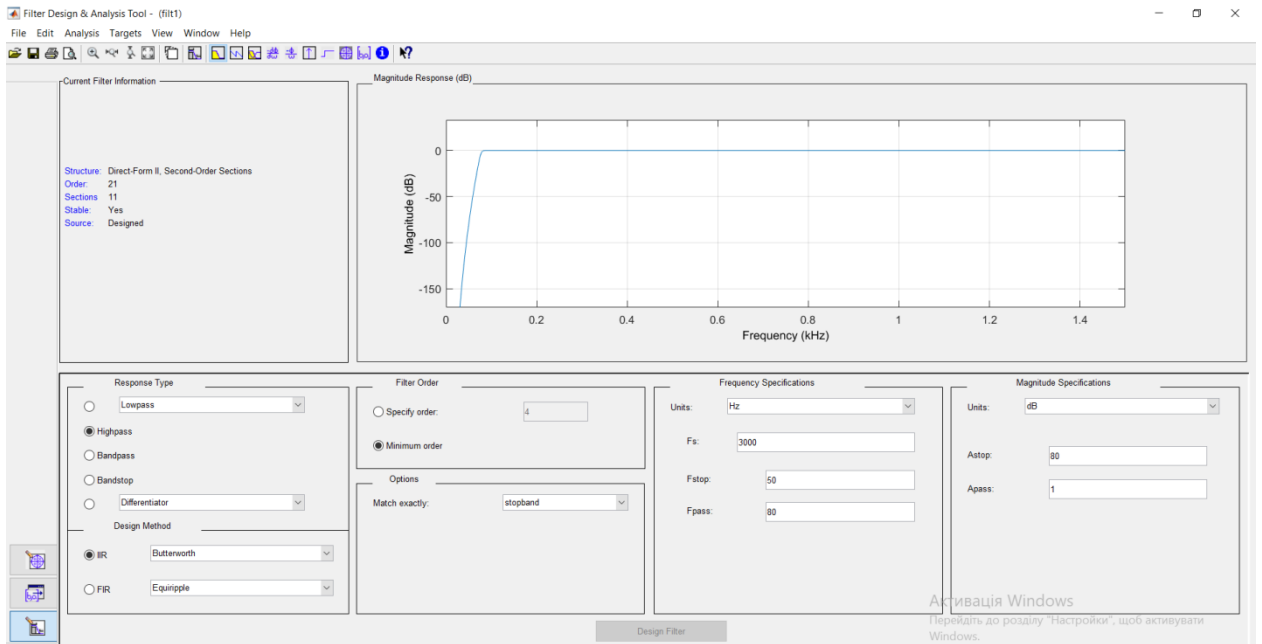


Рис.3.11. Параметри проектованого фільтра

На рис. 3.12 наведено результати фільтрації сигналу.

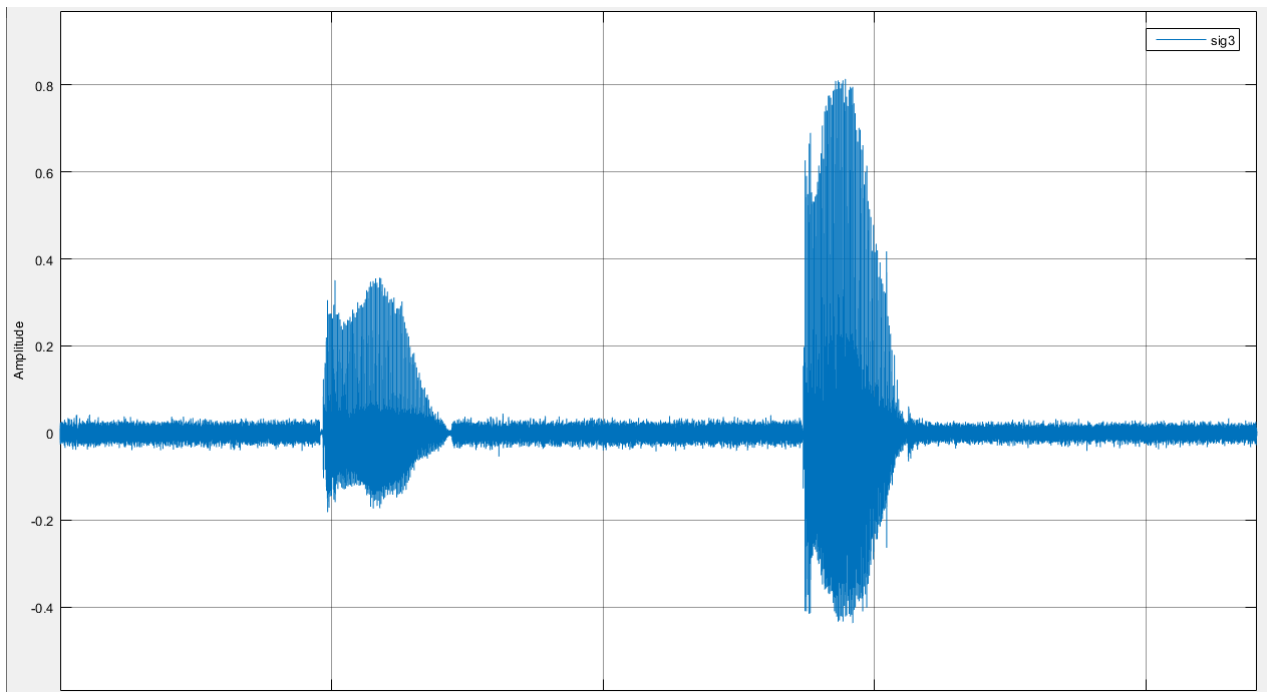


Рис.3.12. Результати фільтрації

Дальше було збільшено порядок фільтра та проведено фільтрацію. На рис. 3.13 наведено результати фільтрації сигналу.

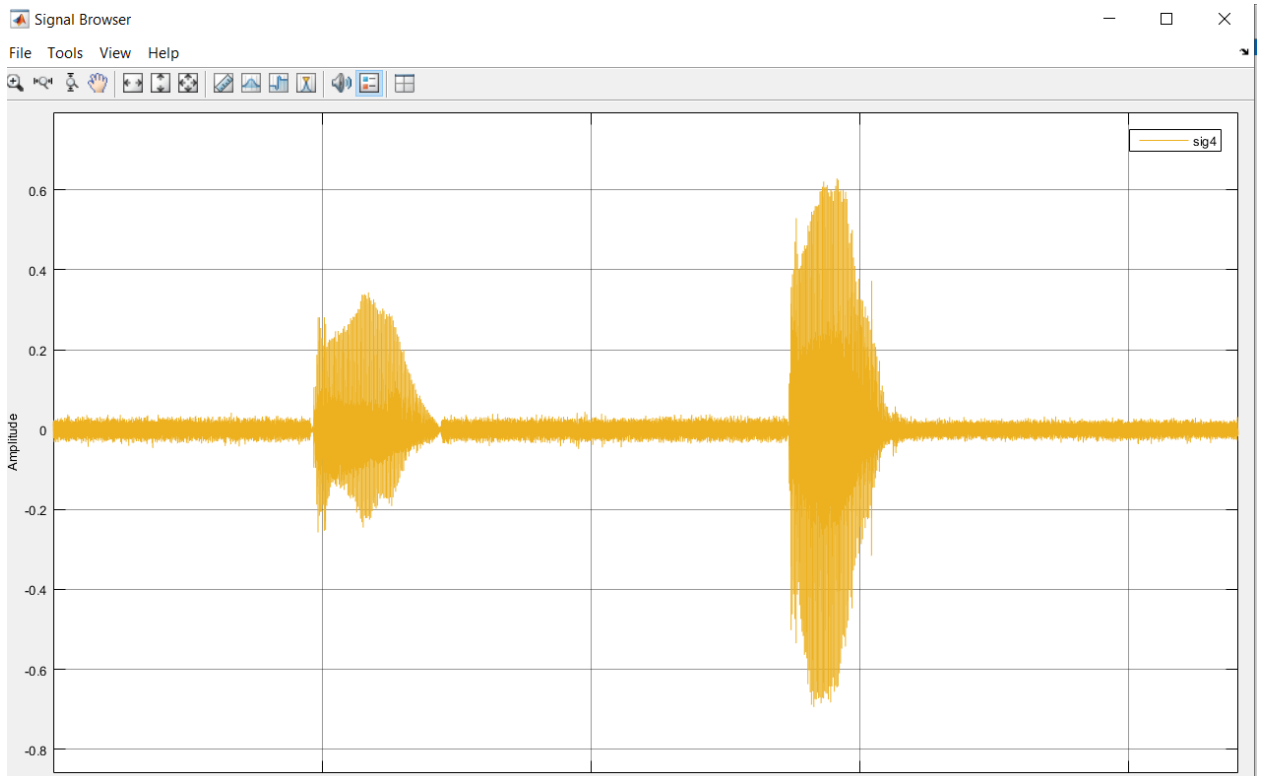


Рис.3.13. Результати фільтрації після збільшення порядку фільтра

З порівняння рис. 3.12 та рис. 3.13 зроблено висновок, що із зростанням порядку фільтра зростає якість фільтрації але збільшується і час фільтрації, який визначається обчислювальною складністю алгоритму фільтрації.

3.6 Висновки до розділу 3

Проведено порівняння можливостей окремих поширених комп'ютерних програм: для проектування цифрових фільтрів. Встановлено, що найкращим в плані функціональних можливостей є пакет програм Matlab. В цій програмі один і той самий фільтр можна розрахувати кількома способами.

Однак, у програмі Matlab відсутня можливість розрахунку цифрових фільтрів за фільтрами-прототипами Бесселя.

Проведено аналіз способів розрахунку FIR-фільтрів в командному вікні, розрахунок фільтра за допомогою пакета `sptool` та розрахунок фільтра за допомогою пакета `fdatool`.

Розрахунки у командному вікні відрізняються гнучкістю управління розрахунками, а недоліком є складний синтаксис команд. Під час розрахунків за допомогою пакета `sptool` не потрібно пам'ятати синтаксис команд, однак є обмежений набір вікон для способу ЗПФ. При розрахунках за допомогою пакета `fdatool` не потрібно пам'ятати синтаксис команд; особливістю є те, що обчислюються лише нормовані коефіцієнти фільтра.

Проведено моделювання процесу фільтрації акустичного сигналу в модулі `sptool`, як найбільш зручному та наочному. За оцінками параметрів шуму та корисного сигналу було проведено синтез фільтрів з різним порядком. Результати фільтрації показали виграш від фільтрації при збільшенні порядку фільтра, але і збільшення обчислювальної складності алгоритму фільтрації і, відповідно, часу, витраченого на фільтрацію.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

Відповідно до ст. 13 розд. III Закону України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Заходи щодо виконання вимог електробезпеки офісних працівників регламентують наступні нормативні документи:

- Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05), затверджене наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці України від 26 січня 2005 р. № 15;
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 р. № 258 (далі — ПТЕЕС);
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України, Комітету по нагляду за охороною праці від 9 січня 1998 р. № 4;
- Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30 грудня 2014 р. № 1417.

Відповідно до п. 2.2 розд. II Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій [від 25 січня 2012 р. № 67](#), роботодавець має забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників та їх уповноважених представників з питань охорони праці про можливі

небезпечні ситуації, про вжиті заходи для їх запобігання або їх ліквідації та про дії працівників у аварійних ситуаціях.

Електробезпека — система організаційних та технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

Тобто електробезпека — це відсутність будь-яких факторів з боку електроустановки, які можуть створити загрозу і небезпеку життю і здоров'ю людини. Не варто під терміном «електроустановка» розуміти щось таке, що може знаходитись поза межами офісу. Адже, наприклад, настільна лампа це також електроустановка. Тобто пристрій, в якому є перетворення електричної енергії в той чи інший вид енергії (світлову, механічну, теплову), і буде вважатись електроустановкою.

Заходи електробезпеки, на які необхідно звернути особливу увагу:

1. Облаштування електромережі, зокрема:

- правильний розподіл навантаження на всі приміщення офісу;
- правильний розподіл електромережі за призначенням (наприклад: освітлення — це одна група, робоча зона — інша);
- якість самих комплектуючих електромережі (розетки, вимикачі, лампи, світильники);
- чи є потенціал для збільшення навантаження (на випадок створення додаткових робочих місць чи розширення компанії);
- використання офісного обладнання, в якому електроенергія застосовується за призначенням згідно з технічними рекомендаціями виробника.

2. Виважений підхід до питання використання стаціонарних або мобільних електрогенераторів для зменшення енергозалежності:

- консультація зі спеціалістом електротехнічного фаху (якщо не призначений відповідальний за електрогосподарство) щодо вибору генератора відповідно до потреб енергоспоживання;

- якщо електрогенератор стаціонарний — необхідно виконати вимоги, зазначені в п. 9.1-9.20 розд. VIII ПТЕЕС;
- якщо електрогенератор мобільний (бажано з вмонтованою автоматикою введення резерву) — правильно виконати підключення з урахуванням можливих наслідків у випадку появи струму в зовнішній електромережі.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Долікарська допомога при шоку

Травматичний шок — складний патогенний процес, що виникає внаслідок важкої механічної травми, опіку і характеризується порушенням функцій життєво важливих органів та систем організму.

При комбінованих хімічно-радіаційних ушкодженнях, опіках тканин і органів травматичний шок спостерігається у 30% потерпілих.

В генезі травматичного шоку першочергову роль відіграють такі чинники: втрата крові і біль, розлад дихання, порушення процесів метаболізму, інтоксикація організму недоокисненими продуктами обміну речовин внаслідок руйнування тканин.

Чинники, які сприяють розвитку шоку запізниле і неповноцінне надання долікарської допомоги, вторинна травматизація в процесі транспортування в лікарню, повторна втрата крові, переохолодження або перегрівання, фізично-емоційне перенапруження, стреси, тривале недоїдання та зневоднення організму тощо.

При пораненнях зміни виникають у підкіркових утвореннях великого мозку та в системі периферійного кровообігу (перерозподіл крові, яка забезпечує життєдіяльність органів, передусім серця і мозку). Розвиваються циркулярна гіпотонія, спазм посткапілярних венул (випотіває плазма в позаклітинний простір), набряк і згущення крові. Знижується венозний тиск,

слабнуть нирки, печінка, легені, відбувається тромбоутворення, розвиток незворотних змін в органах.

Травма кишечника призводить до інтоксикації організму, ускладнюється стан пораненого, спостерігається розлад дихання і кровообігу. Порушується функція нервової системи. Шок має дві фази: еретильну і торпедну.

Еретильна фаза шоку супроводжується збудженням, надмірною рухливістю. Мова уривчаста, погляд неспокійний, шкірний покрив блідий, іноді виникає гіперемія (різке потовиділення), пульс відхилений від норми — сповільнений або прискорений (100 пульсацій за 1 хвилину). Дихання часте, поверхневе.

Торпідна фаза шоку — фаза пригнічення. Розрізняють 4 ступеня:

I ступінь (легка форма шоку). Це результат ізольованих уражень середньої важкості та втрати 500 — 1000 мл. крові, стан помірного психічного гальмування, блідий шкірний покрив, артеріальний тиск 100 — 95 мм. рт. ст. Прогноз сприятливий.

II ступінь — середня важкість шоку, численні ушкодження тіла, втрата крові до 1000 — 1500 мл, стан важкий, хоч орієнтація і свідомість не втрачені, шкіра бліда, губи ціанотичні, психічна загальмованість, пульс — 110 — 130 пульсацій за 1 хвилину, тиск — 90 — 75 мм рт. ст., нестійкий, прогноз сприятливий при проведенні протишокової терапії.

III ступінь — важкий шок, виникає при важких ушкодженнях грудної клітки, черевної порожнини. Крововтрата — 2000 мл., стан важкий, виражена психічна загальмованість, іноді ступор. Шкіра бліда, ціанотична, пітніє, слизові оболонки сухі, гіпотермія, гіподинамія, зниження сухожильних рефлексів, розлад у роботі нирок, сечовиділення, пульс — 120-160 пульсацій за 1 хвилину, тиск — 75 мм рт. ст., дихання поверхневе, без протишовкових заходів прогноз несприятливий.

VI ступінь — термітний стан (передагональний, агональний та клінічна смерть) вкрай важкий для потерпілого. Втрата свідомості, шкіра холодна,

трупна, ціанотична, вкрита липким холодним потом, зіниці розширені, не реагують на світло, пульс не промацується, крайній ступінь шоку веде до клінічної смерті.

Діагностика шоку ґрунтується на визначенні показників, які характеризують загальний стан потерпілого. Найважливіший показник - рівень артеріального тиску. Чим він нижчий, тим глибший розлад функцій організму, його життєдіяльності. Величина крововтрати - найоб'єктивніший показник ступеня важкості шоку.

Перебіг клінічного шоку залежно від локалізації поранення чи опіку має такі особливості: проникаючі поранення черевної порожнини до 80% спричиняють шок; проникаючі поранення грудної клітки зумовлюють гемоторакс, відкритий пневмоторакс. При пораненнях і ушкодженнях тазу — кровотеча до 2,5 л. При ушкодженнях кінцівок — крововтрата до 2 л., біль, інтоксикація.

Профілактична і долікарська допомога при шоку.

Під час шоку усувають дію травмуючих чинників і чинників розвитку шоку, зупиняють кровотечу, перев'язують рани, усувають загрозу асфіксії; вводять 5-подібну трубку (повітропровід); при порушенні зовнішнього дихання в долікарську допомогу входить очищення порожнини рота і носоглотки, усунення западання язика, відновлення прохідності дихальних шляхів; при пневмотораксі накладається пов'язка; проводиться інгаляція киснем, зупинення зовнішньої кровотечі; вводяться серцево-судинні й аналептичні засоби (виконує фельдшер); здійснюється фіксація кінцівок. Ввівши повторно знеболювальні засоби, дають гарячий чай та інші напої.

У разі стихійного лиха, аварій, коли має місце масове надходження потерпілих, їх медично сортують.

В першу чергу виділяють поранених з важким ступенем шоку: 1-га, 2-га група — поранені в стані шоку 1 — 2 год., їм надають протишокову допомогу, тоді оперують; до 3-ї групи належать поранені з ознаками шоку, яких можна прооперувати трохи пізніше. В першу чергу зупиняють

кровотечу, компенсують крововтрати, потім нормалізують об'єм циркулюючої крові. Гостра крововтрата (50%) веде до смерті.

Кожна велика втрата крові (зниження тиску до 80 — 70 мм рт. ст.) мусить бути негайно компенсована шляхом переливання крові у вени потерпілого (визначають групу крові, резус-фактор донора і реципієнта) можна робити інфузію плазми крові, поліглюкін тощо.

Розрідження крові при введенні кровозамінників сприяє поліпшенню капілярного кровотоку.

Крововтрата організмом до 700 мл. компенсується самостійно, за рахунок інфузії плазми крові, введення сольових багатоконпонентних розчинів. Рівень гемоглобіну має бути 65%.

При кисневому голодуванні організму проводять оксигенотерапію. При зупиненні дихання — штучне дихання «з рота до рота». При порушенні функцій печінки і нирок вводять 500 мл. глюкози 1 раз на добу з інсуліном (1 ОД. інсуліну на 5 г глюкози).

Температура повітря в протишоковій палаті — 20 — 24°C.

Потерпілому дають гарячий чай, каву, нагріте вино, закутують ковдрою.

Синдром тривалого стискання тканин буває внаслідок землетрусів, коли люди опиняються під уламками споруд і будинків. У потерпілих поряд з переломами, опіками, може спостерігатися синдром тривалого стискання тканин, зокрема тканин верхніх і нижніх кінцівок. При розтрощенні і розчавлюванні тканин різко погіршується кровообіг у м'язах, виникають анемія, гіпонія тканин, інтоксикація, нервово-рефлекторний розлад, спазми капілярів, артерій, гостра серцево-судинна недостатність, набряки. Плазма крові пропотіває в міжклітинний простір (об'єм циркулюючої плазми зменшується на 50%), знижується артеріальний тиск, може настати гостра ниркова недостатність і порушення сечовиділення.

Синдром тривалого стискання тканин характеризується трьома періодами:

1-й — ранній — набряки тканин і гострий розлад гемодинаміки, триває 1—3 доби.

2-й — проміжний період — гостра ниркова недостатність, від 5 діб до 1,5 місяців.

3-й — пізній період — гангрена, флегмони, абсцеси.

Кінцівка потерпілого набрякає, шкіра багряно-синя, іноді пухирі з бурштиново-жовтою рідиною, пульсація послаблена або відсутня, чутливість шкіри знижена або втрачена. Згущення крові. Погіршується загальний стан організму. Холодний піт на шкірі, різкий біль на місці травми, нудота і блювання. Пульс - 100—120 пульсацій за 1 хв., тиск — 60 мм рт. ст. Сеча червоного кольору. Тип клініки торпідної фази травматичного шоку. Наростає загальна інтоксикація організму, спостерігається гостра ниркова недостатність, іноді гангрена кінцівки, абсцеси і флегмони, може виникнути атрофія м'язів. Ускладнюється рухливість суглобів, пошкоджуються нервові стовбури.

Існують 4 ступені прояву синдрому стискання:

I ступінь — дуже важкий — стискання м'яких тканин або кінцівок протягом 6 — 8 год., потерпілі, як правило, гинуть через 2 — 3 доби;

II ступінь — важкий — стискання рук чи ніг протягом 4 — 7 год., потерпілі можуть загинути;

III ступінь — середньої важкості — стискання рук чи ніг до 6 год., лікування до 3 місяців;

IV ступінь — легкий — стискання рук чи ніг до 2 год. Порушення помірні. Прогноз сприятливий.

Перша медична і долікарняна допомога.

Звільнення від стискання є початком клінічного прояву синдрому стискання тканин. Коли дві кінцівки зазнали стискання (компресія) протягом 8 год., при наявності переломів обов'язкова ампутація. Накладається джгут (вище від місця стискання). Вводяться знеболюючі, антигістамічні та

серцево-судинні препарати, призначаються антибіотики, проводять правцеве щеплення.

4.3. Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано електробезпеку при роботі з апаратом для електросну, а також долікарську допомогу при шоку.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано задачу фільтрації сигналів та різні типи фільтрів та їхні характеристики і встановлено, що ідеальним є фільтр, для якого кожна частота знаходиться в одній з двох смуг: або затримки або пропускання, і який має одиничне підсилення в смузі пропускання і нульове підсилення в смузі затримання.

Розглянуто аналогові та цифрові фільтри і встановлено, що близьку до ідеальної частотної характеристику можна отримати і у випадку аналогового і у випадку цифрового фільтра. Однак, це вимагає реалізації фільтрів дуже високого порядку. Таким чином аналогові фільтри є практично нереалізованими. Натомість цифрові фільтри відносно просто можуть бути реалізовані.

Проаналізовано принцип роботи та структуру FIR та IIR фільтрів. Встановлено, що FIR-фільтри можуть бути лінійно-фазовими, тоді як фільтри IIR можуть лише наближатися до них. Отже, якщо фазова характеристика є критичною, як у багатьох системах зв'язку, потрібно використовувати FIR-фільтри. Якщо фазова характеристика не має великого значення, можна використати будь який тип фільтра. З точки зору складності обчислень, IIR-фільтри майже завжди виявляються значно ефективнішими, а еліптичні фільтри мають найнижчі обчислювальні вимоги. Чим вузьчі переходи, тим більш вираженим стає цей ефект. Однак ці еліптичні фільтри також мають найгіршу фазову характеристику, нестабільно змінюючись в околі переходів.

Проведено порівняння можливостей окремих поширених комп'ютерних програм: для проектування цифрових фільтрів. Встановлено, що найкращим в плані функціональних можливостей є пакет програм Matlab.

Проведено аналіз способів розрахунку FIR-фільтрів в командному вікні, розрахунок фільтра за допомогою пакета `sptool` та розрахунок фільтра за допомогою пакета `fdatool`.

Проведено моделювання процесу фільтрації акустичного сигналу в модулі `sptool`, як найбільш зручному та наочному. За оцінками параметрів шуму та корисного сигналу було проведено синтез фільтрів з різним порядком. Результати фільтрації показали вигреш від фільтрації при збільшенні порядку фільтра, але і збільшення обчислювальної складності алгоритму фільтрації і, відповідно, часу, витраченого на фільтрацію.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шрюфер Е. Обработка сигналов. Цифровая обработка дискретизованных сигналов. – К., Либідь, 1992. – 294с.
2. Kaiser, J.F., "Nonrecursive Digital Filter Design Using the IO-sinh Window Function," Proc. 1974 IEEE Symp. Circuits and Systems, (April 1974), pp. 20-23.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – М., ПИТЕР, 2002. – 603с.
4. Г.Дженкинс, Д.Ваттс. Спектральный анализ и его приложения. Т.2 – М., Мир, 1972. – 283с.
5. Рекурсивні цифрові фільтри. За ред. Гераніна В.О. – Київ, УкрІНТЕІ, 2001. – 176с.
6. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов Matlab 5.x, в 2-х томах. – М., ДИАЛОГМИФИ, 1999.
7. Дьяконов В., Абраменкова И. Matlab – обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – С-Пб, ПИТЕР, 2002. – 602с.
8. Гультяев А. Matlab 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows. – С-Пб, КОРОНА принт, 1999. – 286с.
9. Бачинський М.В. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач медичної діагностики систем дихання та голосотворення / М.В. Бачинський, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – №3. – С.192-195.
10. Дозорський, В. Синфазний метод статистичного опрацювання фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату / В. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 3. – С. 16–21.
11. Дозорський В. Обґрунтування математичної моделі фрикативного звуку у вигляді періодично корельованого випадкового процесу / Я. Драган,

Є. Яворська, В. Дозорський // Вісник тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2010. – Т15, № 10. – С. 159-164.

12. Дедів І. Обґрунтування математичної моделі дихальних шумів у вигляді періодично корельованого випадкового процесу / Я. Драган, І. Дедів // Науковий вісник Чернівецького університету. Вип. 426: Фізика. Електроніка. ЧНУ – Чернівці: Рута. – 2008. – Ч. II. – С. 93-97.

13. Джичка Н., Дедів І., Дозорський В., Драган Я. Модель акустичного сигналу для виявлення порушень стану дихальної системи та голосового апарату як частковий випадок стохастичної коливної системи. Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2011. № 710. С. 155-158.

14. Бачинський М.В. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач медичної діагностики систем дихання та голосотворення / М.В. Бачинський, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – №3. – С.192-195.

15. Дозорська О.Ф., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Яворська Є.Б. Застосування нейрохронаксічної теорії фонації для задачі відновлення комунікативної функції мови людини. Znanstvena misel. Slovenia. 2017. №12. С. 57-61.

16. Дозорський В.Г., Фалендиш В.В., Дедів Л.Є., Паляниця Ю.Б. Метод виявлення проявів ішемічної хвороби серця для медичних систем контролю стану пацієнта // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук КрНУ, 2015. Випуск 1, частина 1 (90). С. 63–68.

17. Никитюк В. В., Дозорський В. Г., Шадріна Г. М. Обґрунтування структури системи відбору фотоелектричних сигналів для визначення ступеня полімеризації стоматологічного матеріалу. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2014. № 2. С. 189 – 192.

18. Бачинський, М.В. Комп'ютерна імітаційна модель вокалізованих фрикативних звуків / М.В. Бачинський, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 1. – С. 149–156.

19. Дедів Л.Є., Дозорський В.Г., Бачинський М.В. Математична модель електроенцефалографічного сигналу для задач побудови комп'ютерних діагностичних систем. Вісник Хмельницького національного університету. 2012. №2. С. 186-189.

20. Драган, Я. Метод опрацювання фрикативних звуків для діагностики захворювань органів голосового апарату на ранніх стадіях / Я. Драган, В. Дозорський, М. Хвостівський, І. Дедів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : НУЛП, 2011. – № 694. – С. 376–382.

21. Dozorskyu V. Dediv L., Dozorska O. Mathematical model of vocal signals for the tasks of human vocal apparatus diagnostic. The National Journal of Biomedical Engineering, 2017. №1. 7 p.

22. Palaniza Y.B., Shadrina H.M., Khvostivskiy M.O., Dediv L.Ye., Dozorska O.F. Main theoretical basis of biosignals modeling. Znanstvena misel. Slovenia. 2018. №16. P. 39-44.

23. Vyacheslav Nykytyuk, Vasyl Dozorskyi, Oksana Dozorska. Detection of biomedical signals disruption using a sliding window. Scientific journal of the Ternopil National Technical University. 2018. Vol. 91. № 3. P. 125–133.

24. Oksana Dozorska, Evhenia Yavorska, Vasil Dozorskyi, Iryna Pankiv, Iryna Dediv, Leonid Dediv. The Method of Indirect Restoration of Human Communicative Function. 15th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems" (CADSM) (Polyana, Svalyava, 26.02.2019-02.03.2019). Zakarpattya, 2019. P.19-22.

25. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів І.Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-

діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (79). 2019. С. 78-84.

26. Дедів І. Комп'ютерне опрацювання дихального шуму синфазним методом для підвищення інформативності аускультативних систем Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Львів : НУЛП, 2011. №744. С. 77-81.

ДОДАТКИ

Скрипт програми розрахунку фільтра

```
>> Fs = 100;           % частота дискретизації
>> fcuts = [25 33];   % граничні частоти смуг пропускання та затримувannya
>> mags = [1 0];      % значення ідеальної АЧХ у смузі пропускання та
затримувannya
>> devs = [0.05 0.01]; % максимальне допустиме відхилення АЧХ у смугах
пропускання та затримувannya
>> [n,Wn,alfa,ftype] = kaiserord(fcuts,mags,devs,Fs); % обчислення порядку
фільтра
>> a = fir1(n,Wn,ftype,kaiser(n+1,alfa),'noscale'); % розрахунок
коефіцієнтів фільтра
    >> freqz(a)        % побудова графіків АЧХ та ФЧХ
```

УДК 621.372.54

Володимир Антонів, Євгеній Дейдей, Василь Дунець, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗАДАЧА ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ В РАДІОТЕХНІЦІ

Volodymyr Antoniv, Yevheniy Deidei, Vasyl Dunets, Ph.D.

THE PROBLEM OF DIGITAL FILTRATION OF SIGNALS IN RADIOTECHNICS

В області створення технічних засобів обміну даними актуальною є задача проектування систем фільтрації, призначенням яких є реалізація складних фільтрів, які будуть пропускати складові вхідного сигналу в певній смузі (смугах) частот та не пропускати в інших смугах частот. Залежно від вигляду залежності амплітуди сигналу на виході фільтра від частоти сигналу розрізняють чотири основні типи фільтрів, а саме фільтри низьких частот, фільтри високих частот, смугові та ежекторні фільтри. При цьому всі фільтри за способом реалізації та принципу дії можна розділити на аналогові та цифрові. Перший тип фільтрів працює з аналоговими сигналами та використовується для їхньої перед обробки, зокрема в колах прийому чи реєстрації сигналів. Більш поширеним сьогодні стає цифрова фільтрація, яка використовує методи опрацювання сигналів у вигляді дискретних послідовностей квантова них за рівнем та часом аналогових сигналів. При цьому розрізняють два класи цифрових фільтрів, а саме нерекурсивні цифрові фільтри та рекурсивні цифрові фільтри.

Принцип роботи не рекурсивних цифрових фільтрів ґрунтується на залежності дискретних відліків вихідного сигналу тільки від дискретних відліків вхідного сигналу в кожен момент часу. У випадку ж рекурсивних цифрових фільтрів, дискретні відліки вихідного сигналу у кожен момент часу залежать як від відліків вхідного сигналу, так і від відліків вихідного сигналу в попередні моменти часу.

До переваг нерекурсивних фільтрів слід віднести простоту теоретичного аналізу (відпрацьованими є алгоритми розрахунку та проектування таких фільтрів), зв'язок коефіцієнтів фільтра з відліками його імпульсної перехідної характеристики, простоту практичної реалізації, стійкість фільтра, лінійність фазової характеристики (за умови симетричності фільтра), що дозволяє зменшити спотворення фронтів імпульсних сигналів – тому такі фільтри широко використовуються в телекомунікаційних системах. До недоліків нерекурсивних фільтрів слід віднести необхідний високий (кілька сотень чи навіть тисяч) порядок фільтрів для забезпечення прийнятної форми амплітудно-частотної характеристики. Оскільки нерекурсивні фільтри описуються матрицею коефіцієнтів, а двовимірні фільтри є природним узагальненням одновимірних фільтрів, ці фільтри знайшли поширення в області обробки зображень.

Однак, для певних задач необхідним є проектування рекурсивних цифрових фільтрів, розрахунок яких є значно складнішим в порівнянні із нерекурсивними фільтрами. Саме цьому питанню і присвячені наступні дослідження

Література

1. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. – К.: Либідь, 1999. – 492с.
2. Е. Шрюфер, Обробка сигналів. Цифрова обробка дискретизованих сигналів. – К.: Либідь, 1992. –294с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – М., ПИТЕР, 2002. –603с.