



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **58778** (13) **U**  
(51) МПК (2011.01)  
G06F 17/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

# ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

**(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕКУРСІЇ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ З БЕЗКОНЕЧНОЮ ІМПУЛЬСНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ**

1

2

(21) u201011534

(22) 28.09.2010

(24) 26.04.2011

(46) 26.04.2011, Бюл.№ 8, 2011 р.

(72) ОЛЕКСІВ МАКСИМ ВАСИЛЬОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

(57) Спосіб визначення значень коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою БІХ, згідно з яким задають цільову амплітудно-частотну характеристику АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра, встановлюють значення лічильника ітерацій рівним 1 і переходять до першого кроку, на якому визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів прямого зв'язку, а саме значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константи малого приросту сумують шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом прямого зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта прямого зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють перший крок для кожного з коефіцієнтів прямого зв'язку, на другому кроці визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів зворотного зв'язку, а саме значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константи малого приросту сумують шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом зворотного зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифі-

кованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта зворотного зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють другий крок для кожного з коефіцієнтів зворотного зв'язку, на третьому кроці здійснюють модифікацію значень коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають змiну кроку ітерації, порівнюють поточне значення кількості ітерацій лічильника ітерацій зі значенням максимальної кількості ітерацій, при їх рівності - завершують процес визначення значень коефіцієнтів рекурсії цільового БІХ фільтра, при поточному значенні кількості ітерацій лічильника ітерацій меншому, ніж значення максимальної кількості ітерацій - збільшують значення лічильника ітерацій на 1 і переходять до першого кроку, який **відрізняється** тим, що модифікацію значень коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків на третьому кроці здійснюють:

у випадку низькочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} \geq mval, j \in [0; NP], mval > 0, \\ 0, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} < mval, j \in [0; NP], mval > 0 \end{cases}$$

де  $A_i[j]$  - значення j-го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на i-й ітерації,  $SA[j]$  - значення градієнта похибки j-го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на першому кроці,  $MU_i$  - значення змiни кроку ітерації визначене на i-й ітерації, NP - кількість полюсів БІХ фільтра, mval - мінімальне додатне значення, коректно представлене в розрядній сітці регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра,

(13) **U**

(11) **58778**

(19) **UA**

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}|, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [0; NP], mval > 0, \\ 0, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [0; NP], mval > 0 \end{cases}$$

де  $B_i[j]$  - значення  $j$ -го коефіцієнта зворотного зв'язку визначене на  $i$ -й ітерації,  $SB[j]$  - значення градієнта похибки  $j$ -го коефіцієнта зворотного зв'язку, визначене на другому кроці, а у випадку високочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}|, & |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1; NP], \\ 0, & |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1; NP], \\ A_{i-1}[j], & j = 0 \end{cases}$$

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}|, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1; NP], \\ 0, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1; NP], \\ B_{i-1}[j], & j = 0 \end{cases},$$

при

$$A_0[j] = \begin{cases} 0, & j \in [1; NP], \\ 0.125, & j = 0 \end{cases}, B_0[j] = 0, j \in [0; NP]$$

за якими і визначають значення коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою.

Корисна модель стосується області цифрового опрацювання сигналів та може бути застосована для зменшення накопичуваної похибки квантування, кількості апаратних вузлів та зв'язків між ними при проектуванні цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою.

Відомі способи проектування цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою (БІХ фільтрів) можна класифікувати наступним чином: ітеративні, в просторовій області, в частотній області, в  $z$  області з використанням  $S$  області, спеціальні способи проектування каскадних фільтрів [Dudgeon D.E., Russell M.M. Multidimensional Digital Signal Processing. Prentice Hall, 1990. – 448 p., Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников (+CD). - М.: Додэка-XXI, 2008. – 720 с: ил. - (Серия «Схемотехника»), Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов. - М.: Техносфера, 2010. – 328 с].

Всі ці способи проектування БІХ фільтрів вимагають використання великої кількості елементів і зв'язків між ними для розробки апаратних БІХ фільтрів. Це робить їх ненадійними, низькоточними і повільними.

Простими і потенційно здатними виправити недоліки існуючих способів проектування БІХ фільтрів є ітеративні способи підмножиною яких є градієнтні способи. Градієнтні способи також використовують у технологіях штучного інтелекту. Існує кілька видів алгоритмів навчання штучних нейронних мереж (ШНМ), що мають у своїй основі градієнтний підхід до обчислення величини зміни ваг нейронів ШНМ [Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. - М: Издательский дом «Вильямс», 2006. - 1104 с: ил. - Парал. тит. англ]. Об'єднання елементів апарату ШНМ і проектування БІХ фільтрів дозволяє розробляти нові способи проектування БІХ фільтрів.

Найближчим рішенням до пропонованого технічного рішення є спосіб визначення значень коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою БІХ, згідно якого задають цільову амплітудно-частотну характеристику АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра, встановлюють значення лічильника ітерацій рівним 1 і

переходять до першого кроку, на якому визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів прямого зв'язку, а саме, значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом прямого зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта прямого зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють перший крок для кожного з коефіцієнтів прямого зв'язку, на другому кроці визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів зворотного зв'язку, а саме, значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом зворотного зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта зворотного зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють другий крок для кожного з коефіцієнтів зворотного зв'язку, на третьому кроці здійснюють модифікацію значень

коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають зміну кроку ітерації, порівнюють поточне значення кількості ітерацій лічильника ітерацій з значенням максимальної кількості ітерацій, при їх рівності - завершують процес визначення значень коефіцієнтів рекурсії цільового БІХ фільтра, при поточному значенні кількості ітерацій лічильника ітерацій меншому, ніж значення максимальної кількості ітерацій - збільшують значення лічильника ітерацій на 1 і переходять до першого кроку [Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников (+CD). - М.: Додэка-XXI, 2008. - с. 528-533: ил. - (Серия «Схемотехника»)].

Проте даний спосіб є неефективним з точки зору використання визначених коефіцієнтів рекурсії при апаратній реалізації БІХ фільтрів. Неефективність пояснюється тим, що спосіб не гарантує що серед всіх визначених коефіцієнтів рекурсії фільтра є такі, що рівні 0 або кратні степеню числа 2, або не менші, ніж мінімальне значення коректно представлене в розрядній сітці регістрів коефіцієнтів проєктованого апаратного БІХ фільтра. Тому розроблені на базі нього апаратні БІХ фільтри володіють високою накопичуваною похибкою квантування, вимагають використання великої кількості елементів і зв'язків між ними. Це робить їх ненадійними, низькоточними і повільними. Таким чином визначені згідно даного способу коефіцієнти рекурсії є непридатними для ефективною реалізації апаратних БІХ фільтрів.

В основу корисної моделі поставлене завдання створити спосіб визначення значень коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою, у якому за рахунок нових дій та операцій забезпечувалося б визначення коефіцієнтів рекурсії, використання яких при проєктуванні БІХ фільтрів призведе до зменшення числа та апаратної складності складових вузлів апаратних БІХ фільтрів, зв'язків між ними і накопичуваної похибки квантування в процесі функціонування. За рахунок цього підвищиться надійність, швидкодія і точність апаратних БІХ фільтрів.

Поставлене завдання вирішується тим, що спосіб визначення значень коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою БІХ, згідно якого задають цільову амплітудно-частотну характеристику АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра, встановлюють значення лічильника ітерацій рівним 1 і переходять до першого кроку, на якому визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів прямого зв'язку, а саме, значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом

сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом прямого зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта прямого зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють перший крок для кожного з коефіцієнтів прямого зв'язку, на другому кроці визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів зворотного зв'язку, а саме, значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом зворотного зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта зворотного зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють другий крок для кожного з коефіцієнтів зворотного зв'язку, на третьому кроці здійснюють модифікацію значень коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають зміну кроку ітерації, порівнюють поточне значення кількості ітерацій лічильника ітерацій з значенням максимальної кількості ітерацій, при їх рівності - завершують процес визначення значень коефіцієнтів рекурсії цільового БІХ фільтра, при поточному значенні кількості ітерацій лічильника ітерацій меншому, ніж значення максимальної кількості ітерацій - збільшують значення лічильника ітерацій на 1 і переходять до першого кроку, згідно з корисною моделлю модифікацію значень коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків на третьому кроці здійснюють:

у випадку низькочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} \geq mval, j \in [0; NP], mval > 0 \\ 0, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} < mval, j \in [0; NP], mval > 0 \end{cases}$$

де  $A_i[j]$  - значення  $j$ -го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на  $i$ -й ітерації,  $SA[j]$  - значення градієнту похибки  $j$ -го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на першому кроці,  $MU_i$  - значення зміни кроку ітерації визначене на  $i$ -й ітерації,  $NP$  - кількість полюсів БІХ фільтра,  $mval$  - мінімальне додатне значення коректно представлене в розрядній сітці регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра,

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}|, |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [0; NP] \\ 0, |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [0; NP] \end{cases} \quad mval > 0$$

де  $B_i[j]$  - значення  $j$ -го коефіцієнта зворотного зв'язку визначене на  $i$ -й ітерації,  $SB[j]$  - значення градієнту похибки  $j$ -го коефіцієнта зворотного зв'язку визначене на другому кроці,

а у випадку високочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}|, |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1; NP] \\ 0, |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1; NP] \\ A_{i-1}[j], j = 0 \end{cases}$$

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}|, |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1; NP] \\ 0, |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1; NP] \\ B_{i-1}[j], j = 0 \end{cases}$$

при

$$A_0[j] = \begin{cases} 0, j \in [1; NP] \\ 0.125, j = 0 \end{cases}, B_0[j] = 0, j \in [0; NP]$$

за якими і визначають значення коефіцієнтів рекурсії цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою.

Отримані згідно запропонованої корисної моделі значення коефіцієнтів рекурсії низькочастотних цифрових фільтрів з безконечною імпульсною характеристикою є додатними числами не меншими, ніж мінімальне значення, яке може бути представлене розрядною сіткою регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра. Це дозволяє здійснювати обчислення у без знакової арифметиці. При цьому апаратна складність вузлів проєктованого апаратного БІХ фільтра зменшується в порівнянні з апаратною складністю вузлів БІХ фільтра, що оперує знаковими числами за рахунок відмови від вузлів, що оперують числами в доповняльному коді. Коефіцієнти рекурсії, значення яких виходять за границі розрядної сітки регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра є рівними нулю. Що разом зі зменшенням числа апаратних помножувачів, суматорів і зв'язків в апаратному БІХ фільтрі дозволяє зменшити накопичувану похибку квантування. А це все призводить до підвищення точності, надійності і швидкодії апаратних БІХ фільтрів.

Отримання згідно запропонованої корисної моделі значень коефіцієнтів рекурсії високочастотних цифрових фільтрів з безконечною

імпульсною характеристикою відбувається з врахуванням мінімального значення, яке може бути представлене розрядною сіткою регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра. Коефіцієнти рекурсії, значення яких виходять за границі розрядної сітки регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра є рівними нулю. Що разом зі зменшенням числа апаратних помножувачів, суматорів і зв'язків в апаратному БІХ фільтрі дозволяє зменшити накопичувану похибку квантування. А це все призводить до підвищення точності, надійності і швидкодії апаратних БІХ фільтрів. Використання пропонуваного початкових значень коефіцієнтів і подальша індексація коефіцієнтів прямого зв'язку з одиниці в процесі функціонування способу забезпечують нульовому коефіцієнту прямого зв'язку значення 0.125, що є степеню числа 2 ( $2^{-3}=0.125$ ). Отже, вузол множення множеного на 0.125 можна замінити вузлом арифметичного зсуву множеного на 3 розряди праворуч при використанні цілочисельної арифметики. Це дозволяє зменшити апаратну складність вузла множення апаратного БІХ фільтра, а отже зменшити кількість задіяних елементів для його реалізації.

Зменшення кількості задіяних елементів в процесі проєктування апаратних БІХ фільтрів, яке відбувається при використанні визначених згідно способу коефіцієнтів рекурсії, призводить до зменшення накопичуваної похибки квантування, збільшення надійності, швидкодії, а також збільшення максимальної кількості апаратних БІХ фільтрів на кристалі ПЛІС і на друкованій платі. Розроблений спосіб, в окремих випадках, дозволяє збільшити швидкість і точність БІХ фільтрів при їх програмній реалізації за рахунок використання беззнакової арифметики, зменшення числа необхідних для здійснення фільтрації операцій та зменшення накопичуваної похибки квантування.

Для здійснення способу перед початком його виконання необхідно:

- задати початкові значення констант малого приросту  $d$  в межах  $0 < d < 1$  і початкове значення змінного розміру кроку ітерації  $MU_0$  в діапазоні  $0 < MU_0 < 1$  таким чином, щоб при виконанні способу сходилися;

- задати ціле число кількості полюсів проєктованого фільтра  $NP$ ;

- задати кількість точок ДПФ;

- задати максимальну кількість ітерацій;

- встановити початкові значення коефіцієнтам прямого і зворотного зв'язків, зважаючи на вид обраного фільтра (високочастотного чи низькочастотного);

- задати мінімальне значення  $mval$ , яке рівне мінімальному значенню коректно представленому в розрядній сітці регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра;

- задати цільову АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра;

- встановити значення лічильника ітерацій рівним 1.

Виконання способу здійснюють за три кроки. На першому кроці визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень

коефіцієнтів прямого зв'язку. Для цього значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом прямого зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта прямого зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють перший крок для кожного з коефіцієнтів прямого зв'язку.

На другому кроці визначають градієнти похибок у частотній області для кожного зі значень коефіцієнтів зворотного зв'язку. Для цього значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта і константу малого приросту сумують, шляхом заміни значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта результатом сумування отримують БІХ фільтр з модифікованим коефіцієнтом зворотного зв'язку, визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають градієнт похибки, відновлюють початкове значення поточного опрацьовуваного коефіцієнта зворотного зв'язку як різницю значень модифікованого коефіцієнта і константи малого приросту та встановлюють результат різниці поточним значенням опрацьовуваного коефіцієнта, повторюють другий крок для кожного з коефіцієнтів зворотного зв'язку.

На третьому кроці здійснюють модифікацію значень коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків у випадку низькочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} \geq mval, j \in [0;NP] \quad mval > 0 \\ 0, & A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1} < mval, j \in [0;NP] \quad mval > 0 \end{cases}$$

де  $A_i[j]$  - значення j-го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на i-й ітерації,  $SA[j]$  - значення градієнту похибки j-го коефіцієнта прямого зв'язку визначене на першому кроці,  $MU_i$  - значення зміни кроку ітерації визначене на i-й ітерації, NP - кількість полюсів БІХ фільтра, mval - мінімальне додатне значення коректно представлене в розрядній сітці регістрів коефіцієнтів цільового БІХ фільтра,

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}, & B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1} \geq mval, j \in [0;NP] \quad mval > 0 \\ 0, & B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1} < mval, j \in [0;NP] \quad mval > 0 \end{cases}$$

де  $B_i[j]$  - значення j-го коефіцієнта зворотного зв'язку визначене на i-й ітерації,  $SB[j]$  - значення градієнту похибки j-го коефіцієнта зворотного зв'язку визначене на другому кроці,

а у випадку високочастотних фільтрів для коефіцієнтів прямого зв'язку за виразом

$$A_i[j] = \begin{cases} A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}, & |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1;NP] \\ 0, & |A_{i-1}[j] - SA[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1;NP] \\ A_{i-1}[j], & j = 0 \end{cases}$$

а для коефіцієнтів зворотного зв'язку за виразом

$$B_i[j] = \begin{cases} B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| \geq mval, j \in [1;NP] \\ 0, & |B_{i-1}[j] - SB[j]MU_{i-1}| < mval, j \in [1;NP] \\ B_{i-1}[j], & j = 0 \end{cases}$$

при початкових значеннях коефіцієнтів прямого і зворотного зв'язків, що для високочастотних фільтрів задають за виразами

$$A_0[j] = \begin{cases} 0, & j \in [1;NP] \\ 0.125, & j = 0 \end{cases}, B_0[j] = 0, j \in [0;NP]$$

визначають імпульсну характеристику модифікованого БІХ фільтра подачею на його вхід зміщеного в часі одиничного імпульсу, визначають АЧХ сигналу відгуку модифікованого БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають середньоквадратичну похибку між визначеною і наперед заданою цільовою АЧХ сигналу відгуку БІХ фільтра на одиничний імпульс, визначають зміну кроку ітерації, порівнюють поточне значення кількості ітерацій лічильника ітерацій з значенням максимальної кількості ітерацій, при їх рівності - завершують процес визначення значень коефіцієнтів рекурсії цільового БІХ фільтра, при поточному значенні кількості ітерацій лічильника ітерацій меншому, ніж значення максимальної кількості ітерацій - збільшують значення лічильника ітерацій на 1 і переходять до першого кроку.

Після завершення виконання способу отримують коефіцієнти прямого і зворотного зв'язків БІХ фільтра. Використовуючи ці коефіцієнти реалізують згідно математичної моделі апаратний чи програмний БІХ фільтр.

Проектування полосових і режекторних фільтрів з використанням заявленого способу здійснюють каскадуванням низькочастотних та високочастотних фільтрів, коефіцієнти рекурсії яких визначають згідно способу.

Реалізація способу можлива програмними і апаратно-програмними засобами універсальних комп'ютерів різного виконання. Можлива апаратна реалізація на інтегральних мікросхемах, або з використанням однієї з мов опису апаратних засобів з подальшим записом файлу конфігурації у ПЛІС.

