

УДК 621.391, 621.372

Н.П. Чорнобородова¹, М.П. Чорнобородов²¹ВАТ «Перетворювач», Запоріжжя²Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ МАЛОКРАПКОВИХ ДИСКРЕТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ФУР'Є

Практично усі відомі методи синтезу вагових функцій ґрунтуються на нелінійних методах багатовимірної оптимізації чи розв'язанні систем нелінійних рівнянь. Тому фазочастотні характеристики (ФЧХ) фільтрів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) з такими вікнами відрізняються від ФЧХ фільтра з прямокутним вікном та не є оптимальними за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування. Запропоновано лінійний метод розрахунку вагових коефіцієнтів для оптимальних вікон з рівнем бічних пелюсток – 90 дБ й вузькою головною пелюсткою. Показано, що вікна з аномальною формою головної пелюстки мають гірші параметри, ніж оптимальні.

Ключові слова: ДПФ, АЧХ, ФЧХ, вагове вікно, фільтр, рівень бічних пелюсток, втрати перетворення.

Вступ

Постановка проблеми. В [1] було показано, що висновок про оптимальність вагової функції за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування можна одержати шляхом аналізу фазочастотних характеристик (ФЧХ) фільтрів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) щодо ступеню схожості ФЧХ фільтрів з прямокутним вікном й досліджуваною ваговою функцією. Чим більша розбіжність, тим гіршими є показники вікна. На прикладі проведеного аналізу вагових функцій Блекмана-Херіса було зроблено висновок про неоптимальність таких "напрочуд хороших" [2] вікон за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування. Отриманий висновок обумовлює актуальність проведення досліджень методів розрахунку відомих [2 – 5] вагових функцій з метою пошуку причин неоптимальності отриманих розв'язків.

Окрім одержання загального уявлення про оптимальність досліджуваних вагових функцій за вищезазначеним критерієм, ФЧХ може дати відповідь на питання чи має це вікно аномальну форму головної пелюстки (ГП) [1]. Прикладом таких вікон є 3-й 4-членні (не мінімальні) функції Блекмана-Херіса [2], Кравченка [4], тощо. Такі функції дозволяють одержати певне звуження головної пелюстки, нато-

мість спричиняють істотне збільшення рівня бічних пелюсток (РБП) фільтра. Проте аналіз оптимальності таких вікон й доцільність їх застосування в [1] виконано не було.

Мета статті. Висновки попередніх досліджень обумовлюють необхідність проведення аналізу:

а) методів розрахунку відомих [2 – 6] вагових функцій з метою усунення методичних недоліків, які спричиняють неоптимальність характеристик вікон, та пошуку шляхів одержання оптимальних вагових функцій з мінімальним міжфільтровим просочуванням для малокрапкових ДПФ;

б) оптимальності та доцільності застосування вікон з аномальною формою головної пелюстки.

Аналіз методів розрахунку відомих вагових функцій

На початкових етапах розробки вагових функцій їх авторами переслідувалася мета побудови вікон, які б описувалися простими математичними функціями. Так, отримання вікон у вигляді добутків, сум чи згорток простих функцій чи вікон (або їх окремих ділянок) обумовлювалося можливостями тогочасної цифрової елементної бази та електронних обчислювальних машин: додавання, відніман-

ня, зсув на m двійкових розрядів (як еквівалент операцій ділення чи множення на 2^m).

Найяскравішим прикладом є вікно Ханна (або Хенінга), перетворення якого становить суму трьох масштабованих й зсунутих (одне відносно одного) ядер Дирихле з метою взаємного пригнічення бічних пелюсток: операція згортки для вагової функції Ханна $F_X(k)=2^{-1} \cdot [F_{\Pi}(k)-2^{-1} \cdot [F_{\Pi}(k-1)+F_{\Pi}(k+1)]]$, де $F_{\Pi}(k)$ – відліки спектра, отримані за використання прямокутного вікна. Це дало можливість одержати пригнічення бічних пелюсток до рівня -31,5 дБ, але розширило головну пелюстку вдвічі (за рівнем першого нуля АЧХ відносно прямокутного вікна – докладніше про необхідність такого способу визначення ширини головної пелюстки фільтра див. в [1]). Надалі, позначатимемо такі вікна "2x" – як множник кратності (коефіцієнт розширення).

Швидко стало зрозумілим, що за таких умов синтезу, отримувані вагові функції не можуть мати високих характеристик. Тому подальші роботи велися у двох напрямках: оптимізації наявних функцій шляхом відходу від елементарних математичних операцій та синтезу нових вікон, які б задовольняли певним критеріям оптимальності.

Вагові коефіцієнти функції Ханна для ДПФ описуються наступним виразом:

$$a_k = b + (1 - b) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot [k + c]/N), \quad (1)$$

де $k = 0 \dots N-1$, N – кількість фільтрів ДПФ; $b = 0,5$; $c = 0$ для непарних N й $c = 0,5$ для парних N .

Хемінг, шляхом оптимізації величини b у (1), досяг збільшення рівня пригнічення бічних пелюсток (РБП) до -35...-41 дБ для $N = 8 \dots 16$ (тобто для різних N – різні значення РБП з розкидом цієї величини на 6 дБ в діапазоні застосовуваної кількості імпульсів зондування N у наявних РЛС виявлення цілей – див. [1]).

Херіс, оптимізуючи значення b у (1), за $b = 0,53856$ досяг збільшення рівня пригнічення бічних пелюсток до -43 дБ (-41...-42 дБ для $N = 8 \dots 16$) у 2-членному вікні Блекмана-Херіса [2].

Блекман, провівши оптимізацію величин масштабних коефіцієнтів п'яти ядер Дирихле, досяг збільшення рівня пригнічення бічних пелюсток до -58 дБ ціною розширення головної пелюстки втричі (відносно прямокутного вікна).

Слеп'ян, Полак й Ландау розв'язували задачу пошуку функції обмеженої тривалості, що має максимальну енергію у смузі частот. Вони одержали розв'язок у вигляді сімейства хвильових функцій, параметром якого є добуток тривалості на ширину смуги частот. Кайзер відшукав просту апроксимацію цього розв'язку за допомоги модифікованої функції Беселя. Отримане вікно Кайзера-Беселя є компромісом між шириною головної пелюстки й рівнем бічних пелюсток.

Взявши за прототип вікно Кайзера-Беселя, Херіс методом градієнтного пошуку виконав оптимізацію вагової функції Блекмана. Отримані мінімальні 3-членні й 4-членні вікна Блекмана-Херіса мають ширину головної пелюстки у тричі й четверо ширшу за прямокутне вікно, відповідно (надалі, позначатимемо такі вікна як "3x" й "4x"). Процедура оптимізації практично не вплинула на характеристики головної пелюстки відносно прототипу, але дозволила зменшити РБП до -67 дБ й -92 дБ [2], відповідно, за $N > 30$ (для $N = 8 \dots 16$ цей параметр дещо менший: -62...-70 дБ й -94...-84 дБ, відповідно). Через те, що вікно-прототип є функцією з максимальною енергією у смузі частот, вагові функції Блекмана-Херіса, як показано в [1], не є оптимальними за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування.

Вікно Дольфа-Чебишова є розв'язком задачі мінімізації ширини смуги частот за заданої кінцевої тривалості функції. Застосування цього вікна забезпечує мінімальну ширину головної пелюстки за заданого рівня бічних пелюсток. Але нулі АЧХ фільтра такої функції не збігаються з центральними частотами решти фільтрів ДПФ. Більше того, бічні пелюстки розширюються в міру віддаленості від центральної частоти фільтра. Тому це вікно теж не є оптимальним.

У [3] синтез вагової функції розглядається як "задача нелінійного програмування, що дозволяє врахувати усі необхідні протирічні параметри віконних функцій в обмеженнях й цільовій функції". Але в отриманих вікнах досягаються гірші характеристики, ніж у функціях Блекмана-Херіса: нулі АЧХ не збігаються з центральними частотами фільтрів ДПФ, РБП – недостатньо низький, а головна пелюстка – заширока.

У [4] запропоновано два методи синтезу вагових вікон. Перший варіант передбачає мінімізацію рівня бічних пелюсток шляхом оптимізації масштабних коефіцієнтів, величин зсуву (одного відносно іншого) ядер Дирихле та їх кількості з метою взаємного пригнічення бічних пелюсток. Другий варіант ґрунтується на розрахунку фахових фінітних функцій $u(x)$, форма яких близька з заданою точністю до форми їх же спектрів $F(y)$, й розв'язанні системи нелінійних рівнянь, укладеної із застосуванням похідних $u'(x)$ й $F'(y)$. Отримані розв'язки для вікон 2x, 3x й 4x збігаються з функціями Хана, Хемінга та Блекмана-Херіса. Отже, такий метод розрахунку теж не дозволяє отримувати оптимальні вагові функції.

Таким чином, практично усі відомі методи синтезу вагових функцій ґрунтуються на нелінійних методах багатовимірної оптимізації чи розв'язанні систем нелінійних рівнянь. Тому ФЧХ фільтра ДПФ з таким вікном відрізнятиметься від ФЧХ фільтра з прямокутним вікном та може мати нелінійний характер. А через це, ці вагові функції не можуть бути оптимальними за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування [1].

Метод одержання оптимальних вікон

У [5] було запропоновано метод розрахунку вагових коефіцієнтів a_k шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь (2) (для отримання початкової крапки наближення a'_k) й подальшого уточнення значень за допомоги нетривалої одновимірної лінійної мінімізації (що еквівалентно підбиранню підставки для вагової функції a'_k).

Рівняннями нижньої частини системи (2) задається умова симетричності вагової функції, а рівняннями верхньої частини – умова збігу нулів АЧХ з центральними частотами фільтрів ДПФ.

Як показано у [5], для отримання оптимального вікна $2x$ з РБП -42...-43 дБ, на значення A_{\min} накладається єдина умова: $A_{\min} \neq 0$. Якщо ж покласти $A_{\min} = 0$, то розв'язання системи (2) дає вагові коефіцієнти прямокутного вікна: $a_k = 1$:

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k\right) = A_{\min}; \\ \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot 2\right) = 0; \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot \frac{(N+j)}{2}\right) = 0; \\ a_0 - a_{N-1} = 0; \\ a_1 - a_{N-2} = 0; \\ \dots \\ \frac{a_{N-j-1}}{2} - \frac{a_{N-j+j}}{2} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де $j = 0$ для парних N й $j = 1$ для непарних N .

Виходячи з фізичного змісту рівнянь системи (2), її можна застосувати для розрахунку коефіцієнтів вагових функцій $3x$, що забезпечують істотніше пригнічення бічних пелюсток. Для цього у другому рівнянні праву частину теж треба зробити ненульовою. Тоді розв'язання системи (2) й виконання наступної мінімізації надасть можливість одержати $3x$ -вікно з РБП -90 дБ.

Як було показано в [1], мінімального розширення головної пелюстки можна досягнути лише у випадку забезпечення лінійності фазочастотної характеристики розраховуваної функції. Оскільки:

а) як права, так й ліва частини системи (2) складаються винятково з дійсних чисел та не містять комплексних;

б) усі рівняння – лінійні;

в) забезпечено виконання умови збігу нулів АЧХ з центральними частотами фільтрів ДПФ (верхня половина рівнянь системи),

то розрахована вагова функція буде оптимальною за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування.

На рис. 1 наведено АЧХ фільтрів ДПФ для $N = 8$. Вертикальними пунктирними лініями позначено центральні частоти фільтрів ДПФ, що відповідають значенням фази $\varphi = 2 \cdot \pi \cdot n / N$, де n – номер фільтра. У цих крапках АЧХ фільтра з прямокутним вікном (позначено на рис. 1 літерою "а") має провалля (в логарифмічному масштабі, що в лінійному масштабі відповідає нульовим значенням). Одержане шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь (2) й наступної лінійної мінімізації вікно $2x$ позначено на рис. 1 літерою "з" (детальніше – на рис. 2), $3x$ – літерою "к". Початкову ділянку АЧХ ($\varphi = 0^\circ \dots 45^\circ$ – головна пелюстка прямокутного вікна) на рис. 1 не показано.

Можна побачити, що серед вікон Блекмана-Херіса $3x$ (позначені на рис. 1 літерами "б" й "в") та $4x$ (літери "г" й "д") запропоноване вікно $3x$ (літера "к") має найвужчу головну пелюстку й найнижчий РБП (основні характеристики деяких вікон $3x$ й $4x$ наведено у табл. 1). А, як наслідок, – й найменші втрати перетворення та кращі параметри.

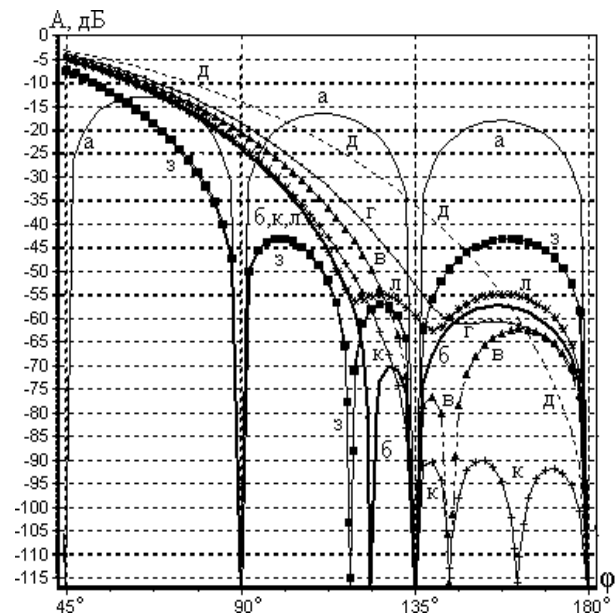


Рис. 1. Вікна ДПФ для $N = 8$:

— прямокутне (-13 дБ) (а); Блекмана-Херіса: — 3-членне (-61 дБ^1) (б), ▲ мінімальне 3-членне (-67 дБ) (в), — 4-членне (-74 дБ) (г), - - - мінімальне 4-членне (-92 дБ) (д); Чорнобородових: ■ 2x (-43 дБ) (з) й 3x (-90 дБ) (к); Кравченка (-55 дБ) (л)

На рис. 1 не наведені вікна Хемінга й мінімальне 2-членне Блекмана-Херіса, оскільки у такому масштабі $2x$ -вікна просто зливаються. Тому на рис. 2 АЧХ фільтрів з вікнами $2x$ подано не повністю: лише другу половину головної пелюстки та область бічних пелюсток ($\varphi = 45^\circ \dots 180^\circ$). Початкову

¹ Заявлені у [2] РБП справедливі лише для багатокрапкових ДПФ ($N > 30$). В решті випадків дійсний РБП – дещо менший й тим більше відрізняється від заявленого, чим менше N [1].

ділянку АЧХ вікон 2х ($\varphi = 0^\circ \dots 45^\circ$ - першу половину головної пелюстки) на рис. 2 не показано. Параметри вікон 2х наведено у табл. 2.

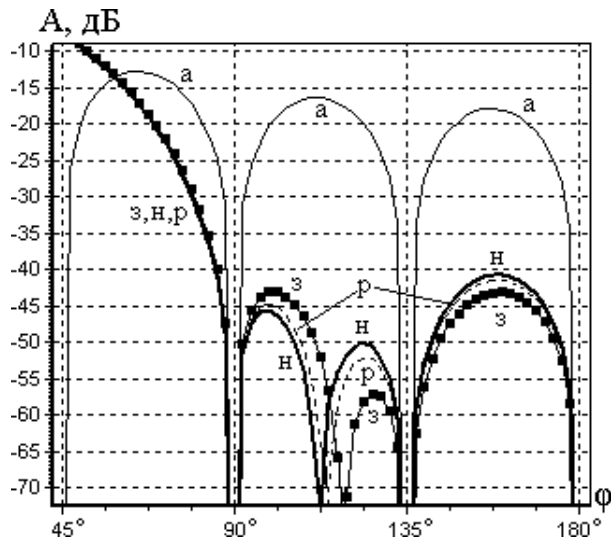


Рис. 2. АЧХ (бічні пелюстки) фільтрів ДПФ ($N = 8$): з прямокутним вікном (а); Хемінга (н); мінімальне 2-членне Блекмана-Херіса (р); Чорнобородових 2х (з)

Таблиця 1

Параметри вікон 3х й 4х для $N = 8..16$

Нормований ¹ параметр	Вікно		
	3х- Б-Х ²	4х- Б-Х ³	3х- Ч ⁴
Коефіцієнт розширення ($K_{р\text{ГП}}$) головної пелюстки за рівнем першого нуля АЧХ відносно прямокутного вікна, раз	3	4	3
Максимальний РБП, дБ	-62... -70	-94... -84	-90... -91
Ширина ГП за рівнем: -3 дБ, раз (ШГП)	1,62	1,89	1,52
	2,27	2,66	2,12
Еквівалентна шумова смуга ($\text{ЕШС} = [\sum a_k^2] / [\sum a_k]^2$), раз	1,71	2	1,6
Коефіцієнт когерентного накопичення ($K_{к\text{Н}} = [\sum a_k]$), раз	0,42	0,36	0,48
Підсилення перетворення, раз: (ПП=1/ЕШС), дБВт:	0,58 -2,36	0,5 -3	0,62 -2,07
Паразитна амплітудна модуляція (ПАМ), дБ	1,13	0,83	1,26
Максимальні втрати перетворення (МВП=ПАМ[дБ]+ ПП[дБВт]), дБ	3,49	3,83	3,33

¹ Ширина головної пелюстки нормована до значення $2 \cdot \pi / N$. Решта параметрів – до значення N .

² Мінімальне 3-членне вікно Блекмана-Херіса.

³ Мінімальне 4-членне вікно Блекмана-Херіса.

⁴ 3х вікно Чорнобородових.

Як було зазначено вище, вагові коефіцієнти синтезованих нами функцій одержуються шляхом

розв'язання системи лінійних рівнянь (2) й виконання наступної лінійної мінімізації. Ця оптимізація проводиться доти, доки не зрівняється рівень I ($\varphi = 90^\circ \dots 118^\circ$) й III ($\varphi = 135^\circ \dots 180^\circ$) бічних пелюсток. А вікна Хемінга й мінімальне 2-членне Блекмана-Херіса є функціями, одержаними на одній з ітерацій процедури оптимізації. Цим ілюструється зроблений раніше висновок про неоптимальність цих вікон та пояснюється така близькість параметрів (див. табл. 2) й АЧХ (див. рис. 2) вагових функцій 2х.

В [1] було показано, що висновок про оптимальність вагової функції за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування можна одержати шляхом аналізу фазо-частотних характеристик (ФЧХ) фільтрів дискретного перетворення Фур'є (ДФФ) щодо ступеню схожості ФЧХ фільтрів з прямокутним вікном й досліджуваною ваговою функцією. Чим більша розбіжність, тим гіршими є показники вікна.

Таблиця 2

Параметри 2х-вікон

Нормований параметр ¹	Вікно		
	Хем. ²	Б-Х ³	Ч ⁴
$K_{р\text{ГП}}$, раз	2	2	2
Максимальний РБП, дБ	-41	-42	-43
ШГП за рівнем -3 дБ, раз	1,3	1,3	1,31
	1,81	1,82	1,83
ЕШС= $[\sum a_k^2] / [\sum a_k]^2$, раз	1,36	1,37	1,38
$K_{к\text{Н}} = [\sum a_k]$, раз	0,54	0,54	0,54
ПП=1/ЕШС, раз:	0,73	0,73	0,73
	-1,36	-1,36	-1,36
ПАМ, дБ	1,74	1,75	1,71
ПАМ[дБ]+ ПП[дБВт] , дБ	3,1	3,11	3,07

¹ Усі позначення – як у табл. 1.

² Хемінга.

³ Мінімальне 2-членне вікно Блекмана-Херіса.

⁴ 2х вікно Чорнобородових.

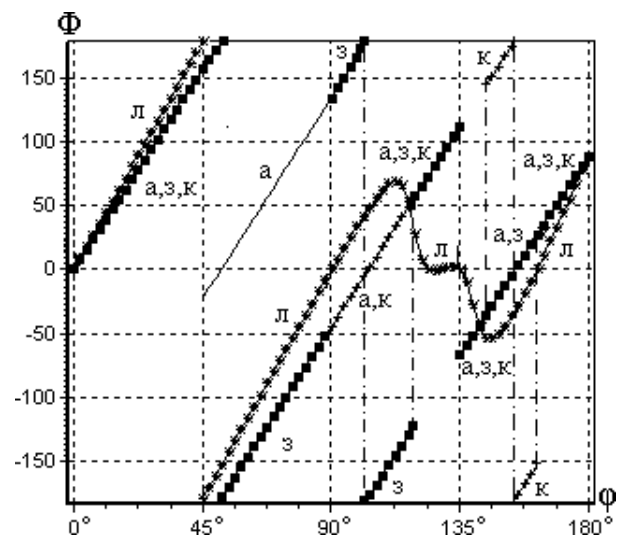


Рис. 3. ФЧХ фільтрів ДПФ ($N = 8$): з прямокутним вікном (а); Чорнобородових 2х (-43 дБ) (з) й 3х (-90 дБ) (к); Кравченка (-55 дБ) (л)

Фазочастотні характеристики (ФЧХ) одержаних нами вікон 2х й 3х, а також функції Кравченка наведені на рис. 3. Можна побачити, що ФЧХ фільтра ДПФ з ваговим вікном Кравченка має істотно нелінійний характер. ФЧХ фільтрів з нашими функціями:

а) строго лінійні;

б) або збігаються з ФЧХ прямокутного вікна, або зсунуті на 180°. Зміна знаку фази трапляється у тих місцях, де АЧХ фільтрів набувають додаткових нульових значень (у лінійному масштабі) або терплять розриви (у логарифмічному масштабі – див. рис. 1: 118° – для функції 2х, 144° й 162° – для 3х). Такі крапки на рис. 3 позначено вертикальними штрих-пунктирними лініями).

Таким чином, запропонований метод розрахунку вагових коефіцієнтів шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь й наступної одновимірної лінійної мінімізації дозволяє одержати вагові вікна 2х й 3х, оптимальні за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування.

Дослідження вікон з аномальною формою головної пелюстки

У намаганні одержати покращення характеристик вікна за тим чи іншим критерієм, розробники вагових функцій вдаються до різних заходів, що дозволяють до певного рівня зменшити ширину головної пелюстки АЧХ фільтра. Натомість це призводить до збільшення РБП. Прикладом таких вікон є 3- й 4-членні (не мінімальні) функції Блекмана-Херіса [2], Кравченка [4], тощо.

Як наведено на рис. 1, головна пелюстка АЧХ 3-членної функції ("б") вужча від мінімальної 3-членної функції ("в"), а 4-членна функція ("г") – від мінімальної 4-членної ("д") до рівня -61 дБ. Це супроводжується погіршенням РБП (наприклад, для 4-членних вікон – з -92 дБ до -61 дБ).

Тож чи варто застосовувати такі функції?

Як можна побачити на рис. 1, головні пелюстки АЧХ фільтрів одержаного нами 3х-вікна ("к"), 3-членною ваговою функцією Блекмана-Херіса (3х, позначену як "б") й функцією Кравченка ("л") мають однакову форму до рівня -35 дБ, а вікна "б" й "л" – до рівня -57 дБ, після чого АЧХ головних пелюсток цих вікон починають розбігатися.

З метою проведення аналізу параметрів вікон з аномальною формою головної пелюстки й дослідження доцільності їх застосування, нами було розраховано фахові вагові коефіцієнти a_k , які дозволили дослідити властивості таких вікон.

Як було зазначено вище, вагові коефіцієнти синтезованих нами функцій одержуються шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь (2) й виконання наступної лінійної мінімізації. Виконавши неповну оптимізацію коефіцієнтів 3х-вікна, на одній з ітерацій

процедури мінімізації ми одержали АЧХ фільтра (на рис. 4 позначено літерою "м") з дуже близькими значеннями ширини головної пелюстки й РБП відносно вікна Кравченка (див. рис. 4, "л").

Характеристики цих вікон наведені у порівняльній табл. 3.

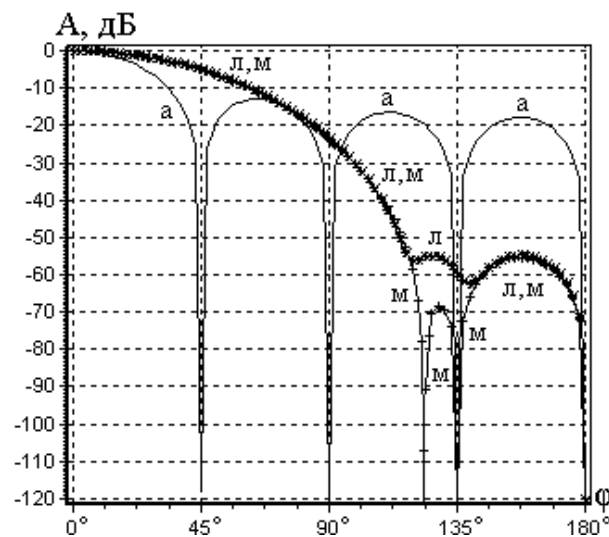


Рис. 4. АЧХ фільтрів із штучно зменшеними ширинами головних пелюсток: 4х-вікно Кравченка (л) й неоптимізоване 3х-вікно Чернобородових (м)

Таблиця 3

Параметри вікон Кравченка (4х) й неоптимізованого Чернобородових (3х)

Нормований параметр ¹	Вікно	
	Кравченка, 4х	Чернобородових, 3х
$K_{рпг}$, раз	4	3
Максимальний РБП, дБ	-55	-55
ШГП за рівнем -3 дБ, раз	1,56	1,54
-6 дБ, раз	2,18	2,15
$EШС = [\sum a_k^2] / [\sum a_k]^2$, раз	1,64	1,62
$K_{кн} = [\sum a_k]$, раз	0,44	0,47
$\Pi\Pi = 1/EШС$, раз:	0,609	0,617
дБВт:	-2,15	-2,09
ПАМ, дБ	1,15	1,15
ПАМ[дБ]+ ПП[дБВт] , дБ	3,3	3,24

¹ Усі позначення – як у табл. 1.

З наведених у табл. 3 параметрів можна зробити висновок про те, що розраховане нами неоптимізоване вікно 3х має дещо кращі параметри за 4х-вікно Кравченка практично за усіма параметрами. Але, за цього, наше вікно має додатковий нуль АЧХ за $\phi = 120^\circ$ (див. рис. 4). Тобто за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування (докладніше – див. [1]) наше навіть неоптимізоване вікно 3х має перевагу й програє вікно "б" лише 2 дБ у РБП. Таким чином, сам собою напрашується висновок про

те, що не варто вдаватися до штучних заходів з метою звуження головної пелюстки: вагову функцію необхідно розраховувати одразу на потрібну ширину головної пелюстки. Лише такий шлях гарантує отримання вікна з мінімальним рівнем міжфільтрового просочування.

Порівнюючи параметри наших 3х-вікон оптимального (див. табл. 1) й неоптимізованого (див. табл. 2) можна зробити висновок про невеликі розбіжності усіх значень, окрім РБП. Тобто навіть незначне звуження головної пелюстки призводить до відчутного збільшення РБП.

Таким чином, проведений аналіз АЧХ таких вікон (див. рис. 3) свідчить про недоцільність вжиття штучних заходів щодо звуження ширини головної пелюстки: завдяки високому рівню бічних пелюсток (-55 дБ на рис. 1, "л" проти -90 дБ на рис. 1 "к") оптимальне 3х-вікно Чорнобородових має перевагу перед 4х-вікном Кравченка. Вона полягає у наявності додаткового нуля АЧХ, що зменшує рівень міжфільтрового просочування.

Висновки

1. Практично усі відомі методи синтезу вагових функцій передбачають необхідність проведення багатомірної оптимізації чи розв'язання систем нелінійних рівнянь. Тому ФЧХ фільтрів ДПФ з такими вікнами відрізнятиметься від ФЧХ фільтра з прямокутним вікном та можуть мати нелінійний характер. А через це, ці вагові функції не можуть бути оптимальними за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування.

2. Запропоновано лінійний метод розрахунку вагових коефіцієнтів для 2х й 3х вікон, оптимальних за критерієм мінімуму міжфільтрового просочування.

3. Показано, що вікна з аномальною формою (із штучно звуженою шириною) головної пелюстки мають гірші параметри, ніж оптимальні (за згаданим критерієм), що обумовлюється, перш за все, істотним збільшенням рівня бічних пелюсток.

Список літератури

1. Чорнобородова Н.П. Аналіз оптимальності відомих вагових функцій у малокрапкових ДПФ / Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 4 (94). – С. 91-95.
2. Хэррис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье / Ф.Дж. Хэррис // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 1. – С. 60-96.
3. Годлевский В.С. Численный синтез оконных функций для дискретного преобразования Фурье / В.С. Годлевский, А.М. Денисенко // Электронное моделирование. – 2006. – Т. 28, № 4. – С. 75-87.
4. Дворкович А.В. Синтез эффективных оконных функций для оценки параметров сигналов с помощью ДПФ / А.В. Дворкович // Радиотехника. – 2005. – № 5. – С. 25-34.
5. Чорнобородова Н.П. Синтез вагових функцій з малим рівнем міжфільтрового просочування для дискретного перетворення Фур'є / Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 2. – С. 159-162.

Надійшла до редколегії 13.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ МАЛОТОЧЕЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ФУРЬЕ

Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов

Практически все известные методы синтеза весовых функций основаны на нелинейных методах многомерной оптимизации или решении систем нелинейных уравнений. Поэтому фазо-частотные характеристики (ФЧХ) фильтров дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с такими окнами отличаются от ФЧХ фильтра с прямоугольным окном и не являются оптимальными по критерию минимума межфильтрового просачивания. Предложен линейный метод расчёта весовых коэффициентов для оптимальных окон с уровнем боковых лепестков – 90 дБ и узким главным лепестком. Показано, что окна с аномальной формой главного лепестка имеют худшие параметры, чем оптимальные.

Ключевые слова: ДПФ, АЧХ, ФЧХ, весовое окно, фильтр, уровень боковых лепестков, потери преобразования.

SYNTHESIS OF OPTIMUM GRAVIMETRIC FUNCTIONS FOR LITTLEPOINTS DISCRETE TRANSFORMATIONS OF FUR'E

N.P. Chornoborodova, M.P. Chornoborodov

Practically all known methods of synthesis of gravimetric functions are based on the nonlinear methods of multidimensional optimization or decision of the systems of nonlinear equalizations. Therefore phase-frequency descriptions (FCHKH) of filters of discrete transformation of Fur'e (DTF) with such windows differ from FCHKH of filter of ζ a rectangular window and are not optimum on the criterion of a minimum of interfilter seepage. The linear method of calculation of gravimetric coefficients is offered for optimum windows with the level of lateral petals –90 dB and narrow main petal. It is shown that windows with the anomalous form of main petal have worst parameters, what optimum.

Keywords: DTF, ACHKH, FCHKH, gravimetric window, filter, level of lateral petals, losses of transformation.