

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ університет
"Харківський політехнічний інститут"

Харченко Олександра Леонідівна

УДК 621.3.088.8

**ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ФІЛЬТРОВИХ АНАЛІЗАТОРІВ
СПЕКТРА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ДИНАМІЧНИХ
ФІЛЬТРІВ ДРУГОГО ПОРЯДКУ**

Спеціальність 05.11.05 - прилади та методи вимірювання електричних
та магнітних величин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті
"Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

заслужений діяч науки і техніки України, заслужений
винахідник України, доктор технічних наук, професор
Чинков Віктор Миколайович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри "Вимірювально-інформаційна техніка".

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Павленко Юрій Федорович,

Харківський державний науково-дослідний інститут метрології, керівник науково - дослідного відділу;

кандидат технічних наук, доцент
Сидоренко Микола Федорович,
науково-технічне спеціальне конструкторське бюро "Полісвіт",
м. Харків, Національне космічне агентство України,
заступник головного конструктора.

Провідна установа:

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут",
кафедра "Автоматизація експериментальних досліджень",
Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться "31" жовтня 2002р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.09 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий "16" вересня 2002р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження різноманітних фізичних об'єктів (технічні об'єкти, навколишнє середовище, космічний простір, людина і т.д. і т.п.) усе в більшому ступені засновуються на моделях і закономірностях випадкових процесів. Значне місце при цьому займають інструментальні методи і засоби вимірювання числових характеристик таких процесів і їхніх функціональних залежностей. Серед них найбільше розповсюдження знаходять спектральний аналіз і відповідно аналізатори спектра електричних випадкових сигналів, у тому числі класичні фільтрові аналізатори спектра (АС). Подальшим розвитком фільтрових методів спектрального аналізу є кореляційно-фільтровий метод і використання вузькосмугових динамічних фільтрів (ВДФ), що працюють у перехідному режимі. Але в обох цих напрямках проведені перші дослідження і тільки для аналогових ВДФ.

Цифрові фільтри забезпечують більш високі технічні характеристики, у тому числі оцінки спектральної щільності потужності (СЩП), у порівнянні з аналоговими фільтрами і мають просту програмно-апаратну реалізацію, зокрема з використанням універсальних мікропроцесорів або цифрових сигнальних процесорів. Тому досить перспективним є подальший розвиток фільтрових методів спектрального аналізу, особливо кореляційно-фільтрового методу вимірювання оцінки СЩП із застосуванням вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів (ВЦДФ), у тому числі другого порядку (ВЦДФДП).

Таким чином, розробка теоретичних і прикладних основ побудови цифрових

кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра з використанням вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів другого порядку, є актуальною й перспективною для теорії та практики спектрального аналізу електричних випадкових сигналів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконувалися здобувачем у рамках таких тем: теми НДР М5202 "Основи теорії інтелектуальних багаторівневих систем", наказ Міністерства освіти України № 37 від 13.02.1997р., № держреєстрації 0197U001932; теми НДР М6104 "Дослідження проблем прикладної метрології при вирішенні задач управління якістю промислової продукції та самоконтролю технічних систем", що виконується відповідно до координаційного плану держбюджетних НДР НТУ "ХП" на 2000-2005 рр., наказ по НТУ "ХП" № 6-П від 04.01.2000 р., № держреєстрації 0100U001647; постанови КМУ №53 від 05.02.94 "Про створення двигуна ТВ3-117ВМА СБ-2 для літака АН-140"; рішення РК.045.268.97.УГК "Про забезпечення доводильних робіт і конструкторського супроводу дослідної партії двигунів ТВ3-117ВМА СБМ1", затвердженого Міністерством промислової політики України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка наукових, методичних і прикладних основ побудови цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра електричних випадкових ергодичних сигналів із застосуванням вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів другого порядку, що забезпечить підвищення точності вимірювання СЦП (спектрального аналізу) у порівнянні з класичними (стаціонарними) фільтрами того самого порядку.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі досліджень:

1. Провести аналіз сучасного стану методів і засобів вимірювання оцінок СЦП електричних випадкових сигналів, на основі якого обґрунтувати напрямки, часткові задачі і методи досліджень дисертаційної роботи.
2. Одержати узагальнені аналітичні співвідношення для статистичних характеристик (математичне сподівання, дисперсія і відносна дисперсія) оцінки СЦП електричних випадкових ергодичних сигналів та для функції спектрального вікна (ФСВ) ВДФ кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра.
3. Одержати аналітичні співвідношення для статистичних характеристик оцінки СЦП електричних випадкових ергодичних сигналів та ФСВ ВДФДП кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра, розробити методичні основи оптимального синтезу ВДФДП, які містять методіку загального розв'язання задачі оптимального синтезу і методи оптимізації характеристик ВДФДП.
4. Розробити теоретичні основи застосування ВЦДФ при вимірюванні оцінок СЦП випадкових сигналів кореляційно-фільтровим методом і методичні основи оптимального синтезу ВЦДФДП для кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра.
5. Розробити прикладні методіки синтезу параметрів рекурсивних ВЦДФДП для двох найпростіших варіантів перебудови (змінювання) їх характеристик: кусково-східчасте (з двома рівнями) змінювання коефіцієнта згасання і підтримання постійного значення коефіцієнта згасання при лінійно-східчастому змінюванні центральної частоти фільтра і постійному значенні коефіцієнта передачі у смузі пропускання фільтра.
6. Провести обґрунтування і вибір структурно-алгоритмічних схем ВЦДФДП і на їхній основі розробити технічні пропозиції щодо побудови (структур) цифрового (обчислювального) кореляційно-фільтрового аналізатора спектра (ЦАС) на основі ПЕОМ і сучасної мікропроцесорної техніки. Розробити відповідне програмне забезпечення.
7. Виконати комп'ютерне моделювання і натурні експериментальні дослідження макета цифрового кореляційно-фільтрового аналізатора спектра із застосуванням

запропонованих ВЦДФДП.

Об'єкт дослідження: процес вимірювання СЦП електричних випадкових сигналів із використанням фільтрових методів і засобів спектрального аналізу.

Предмет дослідження: цифровий кореляційно-фільтровий аналізатор спектра електричних випадкових ергодичних сигналів, виконаний на основі вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів другого порядку.

Методи дослідження базуються на використанні теорії ймовірностей і випадкових сигналів (при отриманні узагальнених аналітичних співвідношень для статистичних характеристик оцінки СЦП); теорії електричних кіл із змінними параметрами (при розробці узагальненої математичної моделі ВДФ); методів оптимізації (метод невизначених множників Лагранжа і метод оптимізації по мінімуму середньоквадратичної похибки оцінки СЦП при розробці методик оптимізації вузькосмугових динамічних фільтрів другого порядку; метод Ньютона-Рафсона при розв'язанні системи нелінійних рівнянь другого порядку); теорії дискретних систем і цифрових фільтрів (при розробці теорії та методик синтезу ВЦДФ); основ теорії похибок та вимірювальної техніки (при оцінюванні похибок вимірювання натурних випробувань макету та обробці результатів вимірювань); теорії функцій комплексної змінної і теорії диференціального та інтегрального числення (при одержанні всіх наукових результатів роботи).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що :

- одержали подальший розвиток теоретичні основи аналогових ВДФ для кореляційно-фільтрових АС електричних випадкових сигналів, що включають: узагальнені аналітичні співвідношення для статистичних характеристик (математичне сподівання, дисперсія і відносна дисперсія) оцінки СЦП випадкових ергодичних сигналів, вимірюваної кореляційно-фільтровим методом, і ФСВ кореляційно-фільтрових АС електричних випадкових ергодичних сигналів, новизна яких полягає в тому, що вони виражені через імпульсну перехідну характеристику ВДФ, зокрема ВДФДП;

- одержали подальший розвиток методичні основи оптимального синтезу ВДФДП для кореляційно-фільтрових АС, що містять узагальнену задачу оптимізації характеристик фільтра, методу загального розв'язання цієї задачі, яка включає обґрунтування чотирьох функціоналів цілі та методи розв'язання наступних задач оптимізації: оптимізації функції згасання при оптимальному законі змінювання центральної частоти ВДФДП; оптимізації функції згасання при лінійному законі змінювання центральної частоти ВДФДП, оптимізації параметрів кусково-східчастого закону змінювання функції згасання і постійного значення коефіцієнта згасання при оптимальному і лінійному законах змінювання центральної частоти ВДФДП;

- розроблено теоретичні основи ВЦДФ, зокрема ВЦДФДП, для спектрального аналізу електричних випадкових ергодичних сигналів, що містять аналітичні співвідношення для статистичних характеристик оцінок СЦП цих сигналів, вимірюваних фільтровими методами, що ґрунтуються на застосуванні ВЦДФ, і для ФСВ таких ЦАС (одержано вперше);

- розроблено методичні основи оптимального синтезу рекурсивних ВЦДФДП для кореляційно-фільтрового ЦАС, що містить узагальнені аналітичні співвідношення для передатної функції, її коефіцієнтів і ФСВ, умови мінімізації похибки зсуву і передатну функцію оптимального фільтра, умови еквівалентності рекурсивних ВЦДФДП для фільтрового і кореляційно-фільтрового ЦАС (одержано вперше);

- розроблено прикладні методики синтезу параметрів рекурсивних ВЦДФДП для кореляційно-фільтрових АС для двох найпростіших варіантів (способів) перебудови їх

характеристик у смузі аналізу: кусково-східчасте (із двома рівнями) змінювання коефіцієнта згасання (один варіант) і підтримання постійного значення коефіцієнта згасання (інший варіант) при лінійно-східчастому змінюванні центральної частоти і постійному значенні коефіцієнта передачі фільтра (для обох варіантів); розроблено технічні пропозиції і програмне забезпечення для ЦАС на основі ПЕОМ і сучасної мікропроцесорної техніки (одержано вперше). Проведено комп'ютерне моделювання при заданні теоретичної числової послідовності тестового електричного сигналу і натурні експериментальні дослідження макета такого АС при реальному вхідному електричному синусоїдному сигналі, які підтверджують вірогідність отриманих результатів. Показано, що відносна похибка вимірювання оцінки СЦП кореляційно-фільтровими ЦАС може бути доведена до 2-3%, а це значно менше, ніж у відомих АС з класичними фільтрами навіть більш високого порядку.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що вони представляють наукові, методичні та прикладні основи для побудови якісно нового виду вимірювачів оцінки СЦП електричних випадкових сигналів - цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра з більш високими технічними, в тому числі метрологічними характеристиками. Перехід у таких аналізаторах до цифрових динамічних фільтрів є подальшим розвитком нового напрямку в спектральному аналізі, що ґрунтується на використанні у фільтрових аналізаторах спектра динамічної фільтрації. Основні результати досліджень були впроваджені на ВАТ "Мотор-Січ", м. Запоріжжя, у системі АССОД-436 для стендових випробувань двигунів Д-436ТП/Т1 (акт від 25.05.2002р.); НТ СКБ "Полісвіт" ВО "Комунар", м. Харків, у програмно-технічному комплексі систем контролю, регулювання та захисту парових турбін (акт від 25.05.2002р.); в навчальному процесі на кафедрі "Вимірювально-інформаційна техніка" НТУ "ХПІ" (довідка від 30.05.2002р.).

Одержані в роботі результати мають високий ступінь готовності до використання в промисловості, тому що вони доведені до прикладних методик проектування, формалізованих для використання на ПЕОМ, технічних рішень і програмного забезпечення.

Особистий внесок здобувача. Нові наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто. В наукових працях, написаних здобувачем у співавторстві, їй належать:

- узагальнені аналітичні співвідношення для математичного сподівання, дисперсії, відносної дисперсії оцінки СЦП випадкових ергодичних сигналів і для ФСВ кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра [1];
- аналітичні співвідношення для ФСВ ВДФДП кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра і відносної дисперсії оцінки СЦП [2];
- формулювання задачі оптимізації ВДФДП і методика її розв'язання із застосуванням методу Лагранжа, а також співвідношення для функціонала, мінімізація якого дозволяє знайти оптимальні закони змінювання характеристик ВДФДП кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра [5];
- методичні основи оптимального синтезу ВДФДП для кореляційно-фільтрових АС [6];
- методи оптимізації законів змінювання коефіцієнта згасання ВДФДП і методи оптимізації параметрів ВДФДП для постійного значення коефіцієнта згасання і кусково-східчастої функції згасання [7];
- основи теорії ВЦДФ, зокрема ВЦДФДП, для цифрових фільтрових АС, що включають аналітичні співвідношення для математичного сподівання, дисперсії і відносної дисперсії оцінок СЦП, виражені через імпульсну перехідну характеристику фільтра, і умова еквівалентності статистичних і точнісних характеристик оцінок СЦП, вимірюваних класичним фільтровим і кореляційно-фільтровим ЦАС [9];

- передатна функція оптимального рекурсивного ВЦДФДП, методика синтезу його параметрів для цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра та окремі результати комп'ютерного моделювання [10].

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися і схвалені на 9 науково-технічних конференціях міжнародного і державного рівня (усього 11 доповідей): шостій Міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" - "MicroCAD-98-Харків", 27-29 травня 1998р., НТУ "ХПІ", м. Харків; першій (12-13 листопада 1998р.), другій (23-24 листопада 1999р.) і третій (4-5 жовтня 2001р.) науково-технічних конференціях "Удосконалення системи і засобів метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки", Міністерство оборони України та Науково-метрологічний центр (військових еталонів), м. Харків; шостій Українській конференції з автоматичного управління "АВТОМАТИКА-99" (2 доповіді), 10-13 травня 1999р., НТУ "ХПІ", м. Харків; другій Міжнародній науково-технічній конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" (МЕТРОЛОГІЯ-99), 5-7 жовтня 1999р., ХДНДІМ, м. Харків; науково-технічній конференції Міністерства оборони України, Військ протиповітряної оборони та Харківського військового університету, 10-11 листопада 1999р., м. Харків; третій Міжнародній науково-технічній конференції "Метрологічне забезпечення в галузі електричних, магнітних та радіовимірювань" - "Метрологія в електроніці-2000", 10-12 жовтня 2000р., ХДНДІМ, м. Харків; десятій Міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" - "MicroCAD-2002-Харків" (2 доповіді), 16-17 травня 2002р., НТУ "ХПІ", м. Харків.

Публікації результатів дисертації. Основні наукові результати дисертації опубліковані у 10 статтях [1-10] у виданнях, що рекомендовані ВАК України, з них 3 статті - без співавторів. Крім того, по матеріалах дисертації опубліковано 6 тез доповідей на конференціях, вони увійшли в два звіти з НДР.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 217 сторінок, з них 17 ілюстрацій по тексту, 27 ілюстрацій на 24 сторінках; 3 таблиці по тексту, 6 таблиць на 6 сторінках; список використаних літературних джерел з 177 найменувань на 15 сторінках; 5 додатків на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані об'єкт і предмет досліджень, мета і наукова задача дисертації, показані зв'язок роботи з науковими темами і програмами, наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок автора в друкованих працях із співавторами, наведені дані про апробацію, публікації і впровадження основних результатів роботи, її структуру та обсяг.

У першому розділі проведений аналіз методів вимірювання оцінки СЩП електричних випадкових сигналів і принципів побудови відомих АС, розкриті актуальність і переваги кореляційно-фільтрового методу вимірювання оцінки СЩП і вузькосмугових динамічних фільтрів. У зв'язку з цим обґрунтовані два напрямки досліджень в роботі: подальший розвиток теоретичних і прикладних основ побудови кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра та розробка теоретичних основ ВЦДФ для спектрального аналізу. Обґрунтовані часткові задачі і методи досліджень.

Другий розділ присвячено подальшому розвитку основ теорії ВДФ для кореляційно-фільтрових АС, які містять узагальнені співвідношення для статистичних характеристик оцінок СЩП, методику загального розв'язання задачі оптимального

синтезу ВДФДП для кореляційно-фільтрових АС, методику оптимізації параметрів ВДФДП при Кусково-східчистій функції коефіцієнта згасання (з двома рівнями) і постійному значенні коефіцієнта згасання.

Для статистичних характеристик (математичне сподівання $M[\hat{G}]$, дисперсія $D[\hat{G}]$ і відносна дисперсія $\delta\hat{G}$) оцінок СЩП $\hat{G}(\omega) \equiv \hat{G}$, що вимірюються кореляційно-фільтровими АС із використанням ВДФ, одержані співвідношення:

$$M[\hat{G}] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \hat{G}(\omega) d\omega = L(0) \hat{G}(\omega_0), \quad (1)$$

де

$$\Phi(\omega) = \int_0^T L(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (2)$$

- функція спектрального вікна;

$$L(\tau) = \int_{\tau}^T h(t, t - \tau) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (3)$$

- перетворна функція;

$h(t, t - \tau)$ - імпульсна перехідна характеристика фільтра; ω_0 - центральна частота фільтра; T - час аналізу;

$$D[\hat{G}] = G^2(\omega_0) \int_0^T dt \int_{\tau}^T du h^2(t, u); \quad (4)$$

$$\delta\hat{G} = D[\hat{G}] / (M[\hat{G}])^2 = \frac{\int_0^T dt \int_{\tau}^T du h^2(t, u)}{L^2(0)}, \quad \text{де } u = t - \tau. \quad (5)$$

Формули (1-5) мають узагальнений характер і дозволяють оптимізувати закони змінювання характеристик ВДФ будь-яких порядків.

Для ВДФДП співвідношення (2), (5) приймають вид:

$$\Phi(\omega) = \operatorname{Re} \int_0^T \frac{A(t) - j\omega B(t)}{\omega_0^2(t) - \omega^2 - 2j\omega\alpha(t)} dt = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\alpha(t)C(t)}{[\Omega - \Delta\tilde{\omega}(t)]^2 + \alpha^2(t)} \left(\frac{d\tilde{\omega}}{dt} \right) dt; \quad (6)$$

$$\delta\hat{G} = \frac{1}{4} \left[\int_0^T B(t) dt \right]^{-2} \int_0^T \frac{A^2(t) + \omega_0^2(t)B^2(t)}{\alpha(t)\omega_0^2(t)} dt, \quad (7)$$

де $\alpha(t)$ - коефіцієнт згасання фільтра; $A(t), B(t)$ - параметри фільтра, що визначають його передатну функцію;

$$B(t) = C(t) \frac{d\tilde{\omega}(t)}{dt}; \quad \tilde{\omega}(t) = \tilde{\omega}_0 + \Delta\tilde{\omega}(t); \quad \Omega = \omega - \tilde{\omega}_0;$$

$\tilde{\omega}_0$ - центральна частота елементарного ВДФДП; $\Delta\tilde{\omega}(0) = -\Delta\omega_m$; $\Delta\tilde{\omega}(T) = \Delta\omega_m$;

$2\Delta\omega_m$ - ширина смуги пропускання фільтра (її прийнято $2\Delta\omega_m$ для спрощення записів, потім здійснено перехід до $\Delta\omega_m$).

Формули (6), (7) є вихідними для синтезу оптимального ВДФДП

кореляційно-фільтрових АС. Узагальнена задача оптимізації формулюється так: знайти функції $\alpha(t)$, $\tilde{\omega}(t)$, $A(t)$ і $B(t)$, які забезпечують мінімум функціоналу

$\chi[\Phi(\omega), \Phi_0(\omega)]$ при заданих обмеженнях, де $\Phi_0(\omega)$ - ідеальна, прямокутна, ФСВ ВДФ.

Запропонована методика загального розв'язання вказаної задачі оптимізації, що ґрунтується на методі невизначених множників Лагранжа.

У роботі показано, що обидві задачі оптимізації мають тільки асимптотичні рішення, а отримані оптимальні закони змінювання коефіцієнта згасання $\beta(\xi)$ потребують досить складної програмно-апаратурної реалізації АС. Тому досліджені два найбільш простих варіанти (способи) задання коефіцієнта згасання фільтра: кусково-східчастою функцією (із двома рівнями - значення β_0 і β_1) або підтримується його постійне значення.

Відзначимо також, що для кусково-східчастої функції $\beta(\xi)$ відносні похибки апроксимації $\delta'_1(\theta), \delta''_1(\theta) \in$ досить близькими для двох задач оптимізації. Враховуючи, що для другої задачі оптимізації перестроювання центральної частоти ВДФДП здійснюється за найбільш простим, лінійним законом, то такому варіанту оптимізації слід віддати перевагу у фільтрових аналізаторах спектра.

Третій розділ присвячений розробці основ теорії вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів для кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра.

В ньому одержані співвідношення для статистичних характеристик оцінки СЦП випадкових сигналів для дискретної форми фільтрового та кореляційно-фільтрового методів спектрального аналізу з використанням ВЦДФ:

а) класичний фільтровий метод:

$$M[\hat{G}_1] = \frac{1}{\tau_\delta} \tilde{G}(\omega_0) \int_{-\pi}^{\pi} \langle |H_i(j\eta)|^2 \rangle_t d\eta; \quad (18)$$

$$D[\hat{G}_1] = \frac{4\pi}{N\tau_\delta^2} \tilde{G}^2(\omega_0) \int_{-\pi}^{\pi} \langle |H_i(j\eta)|^4 \rangle_t d\eta; \quad (19)$$

$$\delta\hat{G}_1 = \frac{4\pi}{N} \cdot \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \langle |H_i(j\eta)|^4 \rangle_t d\eta}{\left[\int_{-\pi}^{\pi} \langle |H_i(j\eta)|^2 \rangle_t d\eta \right]^2}, \quad (20)$$

де

$$\tilde{G}(\omega_0) = \sum_{n=0}^{\infty} G\left(\omega_0 + \frac{2\pi n}{\tau_\delta}\right); \quad (21)$$

$$H_i(j\omega) = \sum_{l=1}^i h_i(l) e^{-j\omega l \tau_\delta} \quad (22)$$

- комплексна частотна характеристика ВЦДФ; $h_i(l)$ - імпульсна перехідна характеристика ВЦДФ; i, l - номери відліків вхідного та вихідного сигналів, $i, l = \overline{1, N}$; N - кількість відліків сигналів; τ_δ - інтервал дискретизації досліджуваного сигналу $x(t)$; $\eta = \omega\tau_\delta$; $\langle \rangle_t$ - знак усереднення за часом;

б) кореляційно-фільтровий метод:

$$M[\hat{G}_2] = \frac{1}{\tau_\delta} \tilde{G}(\omega_0) \int_{-\pi}^{\pi} \langle \text{Re } H_i(j\eta) \rangle_t d\eta; \quad (23)$$

$$D[\hat{G}_2] = \frac{4\pi}{N\tau_\delta^2} \tilde{G}^2(\omega_0) \int_{-\pi}^{\pi} \langle \text{Re}^2 H_i(j\eta) \rangle_t d\eta; \quad (24)$$

$$\hat{\delta G}_2 = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \left[\sum_{l=0}^i h_i^2(l) + h_i^2(0) \right]}{\left[\sum_{i=0}^{N-1} h_i(0) \right]^2}. \quad (25)$$

Розроблені методичні основи оптимального синтезу характеристик (параметрів) рекурсивних ВЦДФДП для кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз методів спектрального аналізу електричних випадкових сигналів показав, що один з напрямків їх подальшого розвитку й удосконалення пов'язаний з розробкою теоретичних, методичних і прикладних основ побудови кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра із застосуванням вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів.

Найбільш важливими науковими і практичними результатами, отриманими в роботі, є:

- теоретичні основи аналогових вузькосмугових динамічних фільтрів для кореляційно-фільтрових АС електричних випадкових ергодичних сигналів, що містять узагальнені аналітичні співвідношення для статистичних характеристик (математичне сподівання, дисперсія і відносна дисперсія) оцінки СЦП таких сигналів і для функції спектрального вікна кореляційно-фільтрових АС;
- методичні основи оптимального синтезу ВДФДП для кореляційно-фільтрових АС, що містять узагальнену задачу оптимізації характеристик фільтра, методику загального розв'язання цієї задачі, яка включає обґрунтування чотирьох функціоналів цілі і методи розв'язання задач оптимізації законів змінювання характеристик ВДФДП (центральної частоти і коефіцієнта згасання) у смузі аналізу;
- теоретичні основи ВЦДФ, зокрема ВЦДФДП, для спектрального аналізу електричних випадкових ергодичних сигналів, що містять аналітичні співвідношення для статистичних характеристик (математичне сподівання, дисперсія і відносна дисперсія) оцінок СЦП, вимірюваних фільтровими методами, які ґрунтуються на застосуванні ВЦДФ, і для ФСВ таких ЦАС;
- методичні основи оптимального синтезу рекурсивних ВЦДФДП для кореляційно-фільтрових ЦАС: узагальнені аналітичні співвідношення для передатної функції, її коефіцієнтів і ФСВ, умови мінімізації похибки зсуву і передатну функцію оптимального фільтра, умови еквівалентності рекурсивних ВЦДФДП для фільтрових і кореляційно-фільтрових ЦАС;
- прикладні методики синтезу параметрів рекурсивних ВЦДФВП, до яких віднесено: методики синтезу параметрів фільтрів для двох найпростіших варіантів задання їхніх характеристик у смузі аналізу: кусково-східчасте (із двома рівнями) змінювання коефіцієнта згасання (один варіант) і підтримка постійного значення коефіцієнта згасання (другий варіант) при лінійно-східчастому змінюванні центральної частоти і постійному значенні коефіцієнта передачі фільтра (для обох варіантів); технічні пропозиції і програмне забезпечення для реалізації кореляційно-фільтрового ЦАС на основі ПЕОМ і сучасної мікропроцесорної техніки; результати комп'ютерного моделювання і натурних експериментальних досліджень макета ЦАС для обох варіантів перебудови характеристик рекурсивного ВЦДФДП, які показали, що відносна похибка вимірювання оцінки СЦП такими аналізаторами може бути забезпечена порядку 2-3%, тобто значно менше, ніж у відомих фільтрових аналізаторів спектра навіть з фільтрами більш високого порядку.

У цілому, в дисертації отримані науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують конкретну наукову задачу розробки теоретичних, методичних і прикладних основ побудови цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра електричних випадкових ергодичних сигналів із застосуванням вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів з метою підвищення точності вимірювання при більш простій програмно-апаратній реалізації.

Значення вирішеної в дисертаційній роботі наукової задачі для науки і практики складається в подальшому розвитку спектрального аналізу, що включає розробку загальних теоретичних основ застосування ВЦДФ для спектрального аналізу електричних випадкових сигналів, методичних основ оптимального синтезу рекурсивних ВЦДФДП для кореляційно-фільтрових ЦАС, а також технічних пропозицій щодо побудови таких аналізаторів на базі ПЕОМ і сучасної мікропроцесорної техніки, доведених до програмного забезпечення і макетного зразка на цифровому сигнальному процесорі.

Наукове використання отриманих у дисертації результатів може складатися у подальшому розвитку теорії і практики вузькосмугової цифрової динамічної фільтрації для спектрального аналізу електричних випадкових сигналів, а **практичне використання** - при обґрунтуванні метрологічних і технічних характеристик цифрових фільтрових ЦАС, особливо кореляційно-фільтрових, із застосуванням вузькосмугових динамічних фільтрів, як більш досконалих, і їхніх принципів побудови на сучасній обчислювальній і мікропроцесорній техніці.

Достовірність отриманих у роботі результатів підтверджується наступним: результатами натурних експериментальних досліджень макета запропонованого кореляційно-фільтрового ЦАС; результатами комп'ютерного моделювання на ПЕОМ і цифровому сигнальному процесорі алгоритмів ЦАС із застосуванням рекурсивних ВЦДФДП, синтезованих по запропонованих методиках; збігом деяких часткових результатів дисертації з відомими; впровадженням окремих результатів роботи підприємствами промисловості; коректним використанням адекватного математичного апарата для розв'язання часткових наукових задач, що поставлені в роботі.

Наукові і прикладні результати, отримані в дисертації, доцільно використовувати: у науково-дослідних організаціях при виборі й обґрунтуванні методів апаратного спектрального аналізу і шляхів удосконалення метрологічних і технічних характеристик цифрових фільтрових аналізаторів спектра, а також при оптимальному синтезі вузькосмугових цифрових динамічних фільтрів для цих аналізаторів; на підприємствах приладобудівної промисловості при створенні цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра і при вдосконаленні класичних цифрових аналізаторів спектра на основі ВЦДФ, спрямованих на підвищення їх метрологічних і технічних характеристик; у вищих навчальних закладах для метрологічних і приладобудівних спеціальностей.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Исходные соотношения для оптимального синтеза узкополосных нестационарных фильтров при спектральном анализе стационарных сигналов методом перемножения. //Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. –1998. – Вып. 24. - С. 52-57.
2. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Статистические характеристики оценки спектральной плотности мощности случайных сигналов при определении её методом перемножения с применением динамических узкополосных фильтров второго порядка. //АСУ та прилади автоматики: Всеукр.міжвід.наук.-техн.зб. – Харків: ХДТУРЕ. - 2000. - Вип. 111. - С. 31-35.
3. Харченко А.Л. Математическая модель и формулировка задачи оптимального синтеза

- динамического узкополосного фильтра второго порядка для спектрального анализа случайных сигналов. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 88. – С. 64-67.
4. Харченко А.Л. Обобщенный функционал для решения задач оптимизации узкополосных динамических фильтров второго порядка, используемых при спектральном анализе. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 127. – С. 142-145.
5. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Методические основы оптимального синтеза динамических фильтров для корреляционно-фильтрового метода спектрального анализа. // Праці 2 Міжнародн. конф. "Метрологія та вимірювальна техніка" (МЕТРОЛОГІЯ - 99). – Том 1. – Харків: ДНВО "Метрологія". – 1999. – С. 60-62.
6. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Формулировка и методы решения задачи оптимального синтеза динамического узкополосного фильтра второго порядка для спектрального анализа эргодических случайных сигналов. // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 1. – С. 11-14.
7. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Методы оптимизации законов изменения коэффициента затухания узкополосного динамического фильтра второго порядка для спектрального анализа эргодических случайных сигналов корреляционно-фильтровым методом. // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 2. – С. 15-18.
8. Харченко А.Л. Исследование метода оптимизации закона изменения коэффициента затухания динамического фильтра второго порядка для корреляционно-фильтровых анализаторов спектра. // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вип. 6 (16). – С. 174-177.
9. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Теоретические основы применения цифровых динамических фильтров в анализаторах спектра. // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 4. – С. 22-24.
10. Чинков В.Н., Харченко А.Л. Методика синтеза параметров рекурсивного цифрового динамического фильтра второго порядка для анализаторов спектра случайных сигналов. // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 1 (17). – С. 34-37.

АНОТАЦІЇ

Харченко О. Л. Основи побудови цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра електричних випадкових сигналів із використанням вузькосмугових динамічних фільтрів другого порядку. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2002.

У дисертації розроблені науково-методичні та прикладні основи побудови цифрових кореляційно-фільтрових аналізаторів спектра (АС). Одержали подальший розвиток основи теорії використання аналогових вузькосмугових динамічних фільтрів (ВДФ) у таких АС та методи оптимізації характеристик ВДФ. Розроблені загальні основи теорії цифрових ВДФ, методичні та прикладні основи оптимального синтезу характеристик рекурсивних цифрових ВДФ другого порядку, запропонована оптимальна схема фільтра. Проведені комп'ютерне моделювання і натурні дослідження макету цифрового кореляційно-фільтрового АС, результати яких підтвердили достовірність основних наукових результатів роботи.

Ключові слова: аналізатор спектра, вимірювання, вузькосмуговий динамічний фільтр,

електричний сигнал, кореляційно-фільтровий, метод, оптимізація, похибка, спектральна щільність потужності, цифровий фільтр.

Харченко А. Л. Основы построения цифровых корреляционно-фильтровых анализаторов спектра электрических случайных сигналов с использованием узкополосных динамических фильтров второго порядка. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.05 - приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2002.

В диссертации разработаны и исследованы научно-методические и прикладные основы построения цифровых корреляционно-фильтровых анализаторов спектра (АС). Получили дальнейшее развитие основы теории аналоговых узкополосных динамических фильтров (УДФ) в корреляционно-фильтровых АС. К ним относится комплекс обобщенных аналитических соотношений для статистических характеристик оценки СПМ (математическое ожидание, дисперсия и относительная дисперсия) и функции спектрального окна (ФСО) таких АС, с использованием которых получены аналогичные характеристики для АС с применением УДФ второго порядка (УДФВП) и математическая модель УДФВП. Сформулированы две задачи оптимизации характеристик УДФВП, разработаны и исследованы методы их решения с использованием неопределенных множителей Лагранжа. Первая задача предусматривает оптимизацию законов перестройки коэффициента затухания и центральной частоты УДФВП, а вторая задача – оптимизацию функции затухания при линейном изменении центральной частоты в полосе пропускания при условии, что коэффициент передачи фильтра поддерживается постоянным. Показано, что эти задачи имеют только асимптотическое решение, а полученные законы перестройки коэффициента затухания фильтра - сложную программно-аппаратную реализацию. Поэтому в работе исследованы два более простых способа задания коэффициента затухания УДФВП: кусочно-ступенчатой функцией (с двумя уровнями) или в виде определенного постоянного значения, а центральная частота фильтра изменяется по оптимальному или линейному законам. Исследованы методические погрешности (погрешность аппроксимации и статистическая погрешность) для этих способов и проведен их сравнительный анализ. Показано, что упрощенные способы задания коэффициента затухания УДФВП незначительно уступают по точности оптимальным, но обеспечивают более простые методику синтеза и аппаратную реализацию УДФВП. Разработаны основы теории цифровых УДФ (УЦДФ) в фильтровых АС. Они содержат обобщенные выражения для статистических характеристик оценок СПМ для классического фильтрового (метод возведения в квадрат) и корреляционно-фильтрового методов, которые затем конкретизированы для УЦДФВП, и условия эквивалентности оценок СПМ указанных методов. Разработаны научно-методические основы оптимального синтеза характеристик рекурсивных УЦДФВП для корреляционно-фильтровых АС по минимуму методической погрешности смещения. Получены два условия оптимизации, которым соответствует поддержание частоты дискретизации исследуемого сигнала, в четыре и в два раза большей центральной частоты фильтра. Для обоих этих условий получены выражения для коэффициентов передаточной функции УЦДФВП, из которых следует, что при первом условии оптимизации аппаратная реализация УЦДФВП получается несколько проще. Из сравнительного анализа фильтрового и корреляционно-фильтрового АС показана более простая программно-аппаратная реализация второго из них, который к тому же

обеспечивает более высокую точность при одинаковом порядке УЦДФВП. Разработаны прикладные основы построения цифровых корреляционно-фильтровых анализаторов спектра (ЦАС). Разработаны две методики синтеза параметров рекурсивного УЦДФВП корреляционно-фильтрового ЦАС: для постоянного и кусочно-ступенчатого коэффициентов затухания при кусочно-линейном изменении центральной частоты фильтра, приведены примеры их применения. Предложены две структурно-алгоритмические схемы модифицированной передаточной функции рекурсивного УЦДФВП, приведены обобщенные структурные схемы фильтра и ЦАС, технические предложения по их аппаратной реализации. Проведены экспериментальные исследования корреляционно-фильтровых ЦАС для обоих способов задания характеристик УЦДФВП, рассчитанных по полученным методикам синтеза. Они включают компьютерное моделирование и натурный эксперимент макета, выполненного на цифровом сигнальном процессоре TMS320C542 (DSP Starter Kit). Результаты экспериментальных исследований подтвердили достоверность основных научных результатов работы и показали, что относительная погрешность измерения оценки СПМ с помощью макета ЦАС не превосходит $\pm 2\%$. Практическое значение результатов работы состоит в том, что они служат основой для создания нового поколения цифровых фильтровых АС с применением УЦДФ, что обеспечивает им более высокую точность и быстродействие, чем с применением классических фильтров того же порядка. Использование УЦДФ является новым направлением в спектральном анализе электрических случайных сигналов. Полученные результаты исследований имеют высокую степень готовности к использованию в промышленности, так как они доведены до апробированных инженерных методик синтеза, программного обеспечения и макетного образца ЦАС. Основные результаты работы внедрены в ОАО "Мотор-Січ" (г. Запорожье), НТ СКБ "Полісвіт" ПО "Коммунар" (г. Харьков) и в учебном процессе на кафедре "Измерительно-информационная техника" НТУ "ХПИ".

Ключевые слова: анализатор спектра, измерение, корреляционно-фильтровый, метод, оптимизация, погрешность, спектральная

Kharchenko A. L. Bases of construction digital of filter-correlation analyzers of a spectrum of electrical casual signals with use of narrow-band dynamic filters of the second order. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.11.05 - devices and methods of measurement of electrical and magnetic sizes. National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2002.

In the dissertation the scientific - methodical and applied bases of construction digital of filter-correlation of analyzers of a spectrum (AS) are developed. Have received the further development of a basis of the theory of analog narrow-band dynamic filters (NBDF) in such AS and methods of optimization of the characteristics NBDF. The general bases of the theory digital NBDF, methodical and applied bases of optimum synthesis of the characteristics recursive of digital NBDF of the second order are developed, the optimum circuit of the filter is offered. Are carried out computer modeling and on location of research of a breadboard model digital of filter-correlation AS, which results have confirmed reliability of the basic scientific results of work.

Key words: digital filter, electrical signal, error, measurement, method, narrow-band dynamic filter, of filter-correlation, optimization, spectral density of capacity, the analyzer of a spectrum.