

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**БИКОВА ТЕТЯНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 681.2.088

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ  
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕНЗОДАВАЧІВ  
В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ**

05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних  
величин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент

**Черепашук Григорій Олександрович,**

Національний аерокосмічний університет

ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, доцент  
кафедри авіаційних приладів та вимірювань

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Кондрашов Сергій Іванович,**

Національний технічний університет

“Харківський політехнічний інститут”,

завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних  
технологій і систем

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Романько Володимир Миколайович,**

Національний науковий центр „Інститут метрології”,

директор наукового центру часо-частотних та лінійних вимірювань

Захист відбудеться 22 квітня 2010 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21 (електрокорпус, ауд. 92).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою:  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 10 травня 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.М. Глоба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні потреби галузі приладобудування характеризуються необхідністю розвитку та вдосконалення засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що працюють в динамічних режимах. Так в областях виробництва та досліджень транспортних засобів (літальних апаратів, автомобілів, залізничних вагонів та ін.) в реальних режимах руху конструкції виконуються вимірювання процесів, швидкість зміни яких не дозволяє знехтувати динамічними похибками електричних вимірювальних перетворювачів інформаційно-вимірювальних систем. Оскільки такі випробування проводяться з метою забезпечення високої експлуатаційної надійності транспортних засобів, то достатньо висока точність вимірювань є необхідною умовою застосування відповідних ЗВТ.

Електричні вимірювальні перетворювачі (ВП) систем, що експлуатуються при випробуваннях, в основному працюють з тензорезисторними давачами, які включені в мостову схему з виходом по напрузі. Тензодавачі мають вихідний сигнал низького рівня (одиниці мілівольт) і працюють в умовах високого рівня всіляких завад, тому електричні ВП для них виконують досить інерційними, що дозволяє згладити завади, але зумовлює виникнення суттєвої динамічної похибки при вимірюваннях змінних процесів. Для забезпечення потрібної точності таких ВП в динамічних режимах роботи необхідно виконувати корекцію динамічних похибок алгоритмічними методами на етапі обробки вимірювальної інформації.

Створенню та розвитку методів обробки сигналів з метою корекції динамічних похибок ЗВТ присвячені праці Н. Вінера, А.М. Тихонова, В.М. Фрідмана, Р. Калмана, М.М. Лаврентьєва, В.К. Іванова, А.Б. Бакушинського, В.О. Морозова, Г.М. Солопченка, О.Л. Шестакова, А.Ф. Верляня, В.С. Сізікова, Л.В. Новікова та ін. Аналіз їх робіт вказує на широкий фронт досліджень, спрямованих на розробку нових та розвиток існуючих методів корекції динамічних похибок, але основна увага при цьому приділена гладким періодичним сигналам, що не мають особливостей. В той же час найбільш важлива вимірювальна інформація, як правило, міститься в околицях особливих точок електричного сигналу величини, що вимірюється. Для обробки таких сигналів найбільш перспективним є метод, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, але його застосування гальмується рядом невирішених задач:

- синтезу стійкого оператора корекції при мінімальному об'ємі апіорної інформації про електричний сигнал, що поступає на ВП з тензомоста, з можливістю адаптації до цього сигналу в процесі обробки;
- вибору вейвлета, що дозволяє досягти максимальної точності при корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів без втрати стійкості оператора корекції;
- придушення шуму при вейвлет-перетворенні, яке дозволить забезпечити мінімальну похибку вимірювання електричного сигналу з тензомоста.

Таким чином, розвиток і вдосконалення метода корекції динамічних похибок електричних ВП, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, призначеного для аналізу неперіодичних електричних сигналів, є актуальною науково-прикладною задачею та визначає напрямки дисертаційних досліджень.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» в рамках держбюджетної НДР МОН України «Методологія проектування інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів енергоносіїв літальних апаратів та промислових паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0106U001053) та госпдоговірних НДР «Розробка та виготовлення багатоканальної вимірювальної системи для динамічних випробувань залізничних вагонів ВВП-9» (ВАТ «Крюковський вагонобудівний завод», м. Кременчук), «Виготовлення блока нормалізуючих перетворювачів» (ТОВ «НТК «Інфотех», м. Київ) і «Розробка та виготовлення модулів нормуючих перетворювачів для багатоканальної АСУ «Мультитест-АН» (ДП «Авіаційний науково-технічний комплекс ім. О. К. Антонова», м. Київ), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів в динамічних режимах роботи при обмеженому об'ємі апріорної інформації про сигнал, який поступає з тензомоста, шляхом корекції динамічних похибок методом, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи корекції динамічних похибок вимірювань і оцінити перспективні напрямки їх розвитку та синтезу;
- синтезувати з вейвлетів оператор корекції динамічних похибок вимірювань електричних сигналів з тензомостів при мінімальному об'ємі апріорної інформації про ці сигнали, з можливістю адаптації оператора до цього сигналу в процесі його обробки;
- запропонувати спосіб вибору вейвлета для побудови оператора корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів;
- виявити метод придушення шуму при вейвлет-перетвореннях, який дозволяє забезпечити мінімальну похибку вимірювання електричного сигналу з тензомоста;
- дослідити вплив похибки ідентифікації динамічної моделі ВП на похибку скорегованого сигналу з тензомоста.

**Об'єкт дослідження** – процеси вимірювання вихідних сигналів тензомостів в динамічних режимах роботи електричних вимірювальних перетворювачів.

**Предмет дослідження** – метод корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи залучались сучасні методи системного аналізу та синтезу, що використовуються при вирішенні задач підвищення точності вимірювання електричних сигналів в динамічних режимах. Побудова оператора корекції динамічних похибок електричних ВП здійснювалась методами теорії обернених задач та теорії вейвлет-перетворення. Розробка критерію вибору вейвлета для побудови оператора корекції виконувалась на основі теорії апроксимації та теорії систем автоматичного керування. Задача придушення шуму вирішувалась методами спектрального аналізу та цифрової обробки сигналів. Експериментальні дослідження виконувались методами вимірювання електричних величин, а обробка експериментальних даних – методами обробки результатів прямих вимірювань. Перевірка справедливості гіпотез та нових результатів здійснювалась методами імітаційного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше запропоновано для побудови оператора корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів математичний вираз, максимум якого дозволяє обирати вейвлет, з використанням якого досягається мінімальне середньоквадратичне відхилення (СКВ) похибки вимірювання сигналу без втрати стійкості оператора корекції;
- удосконалено метод придушення шуму під час корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів, який, на відміну від існуючих, полягає в використанні „надм'якої” порогової обробки вейвлет-коефіцієнтів декомпозиції сигналу з адаптивним вибором параметра, що регулює величину порога, і дозволяє придушувати шум при обмежених відомостях про сигнал з тензомоста;
- дістав подальший розвиток метод корекції динамічних похибок електричних ВП тензодавачів, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, який, на відміну від існуючих, полягає в тому, що здійснює корекцію на етапі реконструкції сигналу з вейвлет-коефіцієнтів, дозволяє адаптувати оператор корекції до особливостей сигналу, що обробляється, визначати рівень присутнього в сигналі шуму в процесі обробки і видаляти його з сигналу, і, тим самим, досягти мінімальної можливої похибки його вимірювання;
- отримано оцінки впливу похибки ідентифікації динамічної моделі електричного вимірювального перетворювача тензодавача на середньоквадратичну похибку скорегованого сигналу і показано, що оператор корекції є малочутливим до цієї похибки.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі приладобудування полягає у розробці методики обробки результатів динамічних вимірювань, що дозволяє підвищити їх точність. Запропоновано алгоритм корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів.

чів тензодавачів, який застосовано в блоках вимірювальної системи ВНП-10, що впроваджені на ДП «Авіаційний науково-технічний комплекс ім. О. К. Антонова» (м. Київ). Розроблено інтелектуальні електричні вимірювальні перетворювачі тензодавачів багатоканальних вимірювальних систем ВНП-9, які впроваджені у Випробувальному Центрі Проектно-конструкторського управління ВАТ «Крюковський вагонобудівельний завод» (м. Кременчук). Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі кафедри авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ» при підготовці курсу «Динамічні вимірювання» для студентів спеціальності 091302 – «Метрологія та вимірювальна техніка».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: метод корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів, методика побудови оператора корекції, рекомендації по вибору вейвлета, метод придушення шуму при корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Наведені в дисертаційній роботі наукові результати доповідалися й обговорювалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ-2004, ІКТМ-2006, ІКТМ-2007 (м. Харків, 2004 р., 2006 р., 2007 р.); IV, V, VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Метрологія та вимірювальна техніка». (м. Харків, 2004 р., 2006 р., 2008 р.), XV науковому симпозиуму «Метрологія та метрологічне забезпечення 2005» (м. Созополь, Болгарія, 2005 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Датчики, прилади та системи» ДПС-2005, ДПС-2006, ДПС-2007 (м. Ялта, 2005 р., 2006 р., 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2006» (м. Київ, 2006 р.); III, IV, V науково-технічних семінарах «Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні та прикладні аспекти» UM-2006, UM-2007, UM-2008 (м. Харків, 2006 р., 2007 р., 2008 р.); IX, X, XI Міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і космос» (м. Дніпропетровськ, 2007 р., 2008 р., 2009 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (м. Черкаси, 2009 р.).

**Публікації.** Основні наукові результати опубліковано в 25 наукових працях, серед них 9 статей в фахових виданнях ВАК України.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу та 5 розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 220 сторінок, включаючи 55 рисунків за текстом, 28 рисунків на окремих 15 сторінках, 10 таблиць за текстом, 5 додатків на 23 сторінках, 170 найменувань використаних джерел на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та задачі дослідження. Також наведено характеристики об'єкту і предмету досліджень, висвітлено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів та наведені відомості про публікації здобувача і апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуто особливості електричних вимірювальних перетворювачів тензометричних систем, що працюють у динамічних режимах та використовуються під час дослідження експлуатаційних параметрів транспортних засобів, зокрема літаків та залізничних вагонів. Доведено необхідність корекції їх динамічних похибок. Встановлено клас динамічних моделей, до яких відносяться електричні ВП тензодавачів, та проаналізовано характер сигналів тензомостів, що вимірюються під час випробувань. Проведено аналіз існуючих методів корекції похибок електричних ВП в динамічних режимах, в результаті якого встановлено, що вони не дозволяють в повній мірі вирішити задачу підвищення точності вимірювань при обмеженому об'ємі апріорної інформації про сигнал з тензомоста і потребують розвитку. Сформульовано вимоги до метода корекції динамічних похибок електричних ВП тензодавачів і запропоновано застосувати метод, що ґрунтується на використанні дискретного вейвлет-перетворення, попередньо удосконаливши його

необхідним чином. Дане рішення дозволило сформулювати основні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень і постановку задач дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячено побудові оператора корекції динамічних похибок електричних ВП в базисі вейвлетів. Вейвлет – це функція у вигляді короткого коливання, причому його спектр відповідає частотній характеристиці смугового фільтра електричних сигналів. Дискретне вейвлет-перетворення полягає в ітераційному розділенні електричного сигналу на складові, що належать відповідним смугам його частотного спектру. В частотній області пряме вейвлет-перетворення відповідає перетворенню сигналу набором вейвлет-фільтрів декомпозиції, а зворотне – набором вейвлет-фільтрів реконструкції.

Побудову оператора корекції запропоновано здійснити таким чином, щоб, виконавши статистичну обробку коефіцієнтів прямого вейвлет-перетворення вихідного сигналу електричного ВП, можна було б розділити спектральні складові, що належать шуму й інформативній частині сигналу. Для цього при побудові використано ортогональні вейвлети, а оператор корекції виконано із вейвлет-фільтрів реконструкції. Пряме вейвлет-перетворення виконується шляхом розкладення електричного сигналу по базисам із функцій масштабування  $\varphi_{i,k}(t)$  та вейвлетних функцій  $\psi_{i,k}(t)$ , для яких справедливі співвідношення:

$$\varphi_{i,k}(t) = \varphi_i\left(t - 2^{-ib_0k}\right) = \sum_{n=1}^N h(n-2k)\varphi_{i-1,n}(t), \quad (1)$$

$$\psi_{i,k}(t) = \psi_i\left(t - 2^{-ib_0k}\right) = \sum_{n=1}^N q(n-2k)\psi_{i-1,n}(t), \quad (2)$$

де  $b_0$  – інтервал дискретизації електричного сигналу;  $i$  – порядковий номер рівня декомпозиції сигналу;  $k$  – порядковий номер дискретного відліку;  $h(n)$ ,  $q(n)$  – коефіцієнти цифрових фільтрів з порядковим номером  $n$ , що використовуються в процедурі прямого вейвлет-перетворення;  $N$  – кількість коефіцієнтів фільтрів.

В частотній області пряме вейвлет-перетворення відповідає перетворенню електричного сигналу низькочастотним  $\Phi_i(j\omega)$  та смуговим  $\Psi_i(j\omega)$  фільтрами, частотні характеристики яких є Фур'є-перетворенням відповідно функцій  $\varphi_i(t)$  та  $\psi_i(t)$ . Так, якщо відомо, що сигнал тензомоста задано можливою смугою частот від 0 до  $\omega_0$ , при вейвлет-перетворенні вона буде розділена на  $i$  смуг таким чином, що  $\omega_i = \omega_{i-1} / 2$  (рис. 1).

Для реконструкції електричного сигналу введено базиси із функцій  $\tilde{\theta}_{i,k}(t)$  та  $\tilde{\eta}_{i,k}(t)$ , таких, що їх Фур'є-образи відповідають наступним рівнянням:

$$\tilde{\Theta}_i(j\omega) = G^{-1}(j\omega)\tilde{\Phi}_i(j\omega), \quad (3)$$

$$\tilde{N}_i(\omega) = G^{-1}(j\omega)\tilde{\Psi}_i(j\omega), \quad (4)$$

де  $G(j\omega)$  – амплітудно-фазова характеристика електричного ВП.

Таким чином, оператор корекції сигналу тензомоста являє собою сукупність смугових фільтрів, частотні характеристики яких відповідають частотній характеристиці оберненого оператора електричного ВП в відповідній смузі частот (рис. 2).

З метою забезпечення стійкості оператора корекції динамічних похибок сигналів тензомостів запропоновано вибір вейвлета здійснювати із тієї сукупності, частотні характеристики яких затухають швидше, ніж зростає частотна характеристика оператора  $G^{-1}(j\omega)$ .

Для реалізації алгоритму обробки результатів вимірювань розраховано коефіцієнти цифрових фільтрів

Рис. 1. Схема вейвлет-декомпозиції сигналу в частотній області

реконструкції оператора корекції динамічних похибок, що дозволяють використовувати ітераційну методику, закладену в алгоритм Малла для класичного дискретного вейвлет-перетворення:

$$\tilde{\alpha}_i(n) = \frac{1}{2\pi} \int G^{-1}(j\omega) \tilde{H}(2^{-i} j\omega) e^{2^{-i} j\omega n} d\omega, \quad (5)$$

$$\tilde{\beta}_i(n) = \frac{1}{2\pi} \int G^{-1}(j\omega) \tilde{Q}(2^{-i} j\omega) e^{2^{-i} j\omega n} d\omega, \quad (6)$$

де  $\tilde{H}(j\omega)$ ,  $\tilde{Q}(j\omega)$  – відповідно частотні характеристики фільтрів реконструкції  $\tilde{h}(n)$  та  $\tilde{q}(n)$ .

Рис. 2. Модулі частотних характеристик вейвлет-фільтрів реконструкції оператора корекції

Алгоритм обробки результатів вимірювань здійснюється наступним чином (рис. 3). Відліки вихідного сигналу електричного ВП шляхом поступової згортки з коефіцієнтами  $h(n)$  та  $q(n)$  обраного вейвлета та виконання операції децимації, тобто видалення кожного другого результату обчислень (знак « $2\downarrow$ » на схемі) перетворюються в послідовності коефіцієнтів апроксимації  $a_{ik}$  та деталізації  $d_{ik}$ . Після розкладання коефіцієнти деталізації підлягають пороговій обробці, про яку говоритиметься далі, з метою придушення шуму. Реконструкція сигналу виконується шляхом виконання операції інтерполяції, тобто добавляння нулів між відліками (знак « $2\uparrow$ » на схемі), обчислення згортки з коефіцієнтами  $\tilde{\alpha}_i(n)$ ,  $\tilde{\beta}_i(n)$ , які одержано за допомогою формул (5) та (6), та коефіцієнтами реконструкції  $\tilde{h}(n)$  з наступним сумуванням результатів.

Рис. 3. Обчислювальна схема оператора корекції динамічних похибок

Робота оператора корекції перевірена шляхом математичного моделювання процесу вимірювання вихідних сигналів тензомостів в динамічних режимах роботи електричних вимірювальних перетворювачів, в результаті чого встановлено, що похибка скорегованого сигналу тензомоста не перевищує похибку округлення відліків на виході електричного ВП.

**Третій** розділ присвячено рішенням задачі вибору вейвлета для побудови оператора корекції динамічних похибок електричних ВП. З цією метою проведено аналіз методів вибору вейвлетів для задач обробки електричних сигналів, в результаті чого запропоновано вибір вейвлета для рішення задачі корекції динамічних похибок вимірювання сигналів тензомостів здійснювати з урахуванням факторів: ортогональності базису, можливості побудови стійкого оператора корекції та виконання умови мінімуму середньої квадратичної похибки апроксимації сигналу в цьому базисі. Перший фактор обрано для того, щоб зберегти характеристики шуму, присутнього в зареєстрованому на виході електричного ВП сигналі, під час прямого вейвлет-перетворення. Із ортогональних вейвлетів обрано вейвлети Добеші, Симплета та Койфлета. В розділі визначено, які з ортогональних вейвлетів для яких динамічних моделей електричних ВП можуть використовуватися при побудові оператора корекції з метою забезпечення його стійкості. Запропоновано на практиці для автоматизації процесу побудови оператора корекції використовувати логічний показник  $\lambda_{\psi}$ , який визначає множину вейвлетів, придатних для побудови оператора корекції динамічних похибок електричних ВП, що описуються динамічними моделями аперіодичного типу першого, другого і третього порядків.

Вейвлет-перетворення є різновидом нелінійної апроксимації електричних сигналів, тому в ролі показника якості вибору базису запропоновано використати його інформативність, кількісною мірою якої слугує ентропія. З теорії пакетного вейвлет-перетворення обрано два вирази для обчислення цієї величини. Один із них визначає ентропію за виразом, аналогічним формулі Шеннона

$$E = -\sum_i d_i^2 \ln d_i^2, \quad (7)$$

де  $d_i$  – коефіцієнти деталізації вейвлет-декомпозиції сигналу, а другий – через логарифм енергії коефіцієнтів

$$E = \sum_i \ln d_i^2. \quad (8)$$

Проведено дослідження залежності ентропії вейвлет-коефіцієнтів, обчисленої кожним з них, від типу вейвлета для сигналу, сформованого безпосередньо з вейвлет-функцій. В результаті виявлено, що вираз (7) не дає вичерпної інформації про інформативність того чи іншого вейвлет-базису, на відміну від формули (8). Так, наприклад, для сигналу, сформованого з вейвлета Добеші db5, результати обчислення ентропії коефіцієнтів декомпозиції на першому рівні показано на рис. 4 і 5.

Рис. 4. Графік значень ентропії коефіцієнтів декомпозиції, обчисленої за допомогою формули (7) для найбільш поширених вейвлетів

Рис. 5. Графік значень ентропії коефіцієнтів декомпозиції, обчисленої за допомогою формули (8) для найбільш поширених вейвлетів



Досліджено вплив на результат обчислення ентропії присутнього в зареєстрованому на виході електричного ВП сигналі шуму, в результаті чого виявлено, що шум, середньоквадратичне значенням якого  $\tilde{\sigma}_{ш} < 0,5\%$  від максимального значення електричного сигналу, що корегується, не впливає на результат обчислення ентропії. При збільшенні його рівня спостерігаються випадки зміщення максимуму ентропії в бік підвищення порядку вейвлета, використання якого принаймні не спричинює втрату стійкості оператора корекції.

В розділі проведено дослідження залежності СКВ похибки сигналу тензомоста, скорегованого з використанням різних вейвлетів, в результаті чого встановлено, що базис, який відзначається максимальною абсолютною величиною ентропії, дозволяє скорегувати сигнал з мінімальним СКВ похибки (табл. 1), в той час, як до-вільний вибір вейвлета може призвести до підвищення СКВ в 1,5 рази.

Таблиця 1

В результаті досліджень запропоновано вибір вейвлета здійснювати за критерієм максимуму функції виду:

$$F_{\psi} = \lambda_{\psi} \sum_i \ln d_i^2, \quad (9)$$

$\lambda_{\psi}$  – логічний параметр, що характеризує виконання умови стійкості оператора корекції для конкретної моделі ВП.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню методів вейвлет-фільтрації електричних сигналів. Всі ці методи полягають в порівнянні вейвлет-коефіцієнтів з певним пороговим значенням і повному їх видаленні або частковому зменшенні по відповідному алгоритму. Таким чином, вейвлет-фільтрація відбувається в результаті обробки коефіцієнтів декомпозиції сигналу одним із порогових операторів, які називаються „жорстким”, „м’яким” та „надм’яким”.

Ці оператори мають наступний вид:

– „жорсткий” пороговий оператор

$$P_{Th}(d) = \begin{cases} d, & |d| \geq T, \\ 0, & |d| < T; \end{cases} \quad (10)$$

– „м’який” пороговий оператор

$$P_{Ts}(d) = \begin{cases} d - \text{sign}(d)T, & |d| \geq T, \\ 0, & |d| < T; \end{cases} \quad (11)$$

– „надм’який” пороговий оператор

$$P_{Tss}(d) = \begin{cases} d - \text{sign}(d)(1 - \mu)T, & |d| \geq T, \\ \mu d, & |d| < T, \end{cases} \quad (12)$$

де  $d$  – коефіцієнт декомпозиції;  $T$  – порогове значення;  $\mu$  – параметр, що обирається із діапазона  $0 < \mu < 1$  (якщо  $\mu=0$ , то „надм’який” оператор переходить в „м’який”, а коли  $\mu=1$  фільтрація не відбувається).

В розділі досліджено статистичні характеристики вейвлет-коефіцієнтів декомпозиції електричного сигналу, який відповідає білому шуму, в результаті чого виявлено, що на кожному рівні вейвлет-коефіцієнти нормально розподілені, а їх середньоквадратичне значення на початкових рі-

внях декомпозиції приблизно дорівнює середньоквадратичному значенню самого сигналу, а на наступних дещо зменшується (табл. 2).

Таблиця 2

На основі результатів цих досліджень, враховуючи, що на практиці відома смуга можливих частот сигналу з тензомоста, запропоновано визначати рівень присутнього в сигналі шуму шляхом статистичної обробки коефіцієнтів на першому рівні

декомпозиції, а в якості порогового значення приймати величину  $T = 3\tilde{\sigma}$ , де  $\tilde{\sigma}$  – оцінка середньоквадратичного значення шуму.

Проведено аналіз і досліджено роботу порогових операторів, в результаті чого встановлено, що „надм’який” оператор є найбільш перспективним для використання при корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів. З метою розробки рекомендацій щодо вибору параметра  $\mu$  в виразі (12) досліджено залежність СКВ похибки відфільтрованого сигналу від цього параметра при розкладенні сигналу на різну кількість рівнів декомпозиції. В результаті досліджень встановлено, що на початкових рівнях вейвлет-декомпозиції мінімальне СКВ похибки відфільтрованого сигналу досягається шляхом обробки його вейвлет-коефіцієнтів „м’яким” пороговим оператором (рис. 6).

Рис. 6. Графіки залежності СКВ похибки сигналу від параметра „надм’якої” порогової обробки при декомпозиції сигналу на різну кількість рівнів (I, II, ..., V – номер рівня).

Зі збільшенням рівня декомпозиції мінімальне СКВ похибки вимірювання сигналу тензомоста досягається при „надм’якій” пороговій обробці. Крім того, сама величина похибки також зростає. Це пояснюється тим, що здійснюється придушення коефіцієнтів, які належать інформативній складовій сигналу, що вимірюється.

Також виявлено, що величина  $\mu$ , при якій СКВ похибки є мінімальним, приблизно співпадає з кількістю коефіцієнтів, що не перевищують величину порога, віднесеною до загальної кількості коефіцієнтів на цьому рівні (табл. 3). На основі цих результатів запропоновано з метою придушення шуму в зареєстрованому на виході електричного ВП сигналі виконувати „надм’яку” порогову обробку вейвлет-коефіцієнтів з адаптивним вибором параметра  $\mu$  на кожному рівні за формулою:

$$\mu_i = N_{Ti} / N_i, \quad (13)$$

де  $N_{Ti}$  – кількість коефіцієнтів на  $i$ -му рівні декомпозиції, що не перевищують за величиною порогове значення;  $N_i$  – загальна кількість коефіцієнтів на  $i$ -му рівні декомпозиції.

Таблиця 3

В розділі співставлено результати корекції динамічних похибок різних сигналів тензомостів розробленим в дисертації методом та варіантом метода регуляризації Тихонова для тензометрії, в результаті чого показано, що СКВ похибки сигналу, скорегованого запропонованим методом, становить 4,5...5 % і нижча на 1,5-2 % від СКВ похибки, одержаної методом Тихонова.

В п’ятому розділі розроблена методика обробки результатів динамічних вимірювань електричних ВП тензодавачів методом, що ґрунтується на використанні вейвлет-перетворення, та досліджено її роботу при корекції динамічних похибок електричних ВП, що входять до складу систем типу ВПП-9 для випробувань залізничних вагонів та типу ВПП-10 для випробувань авіаційних конструкцій.

Системи типу ВПП-9 призначені для вимірювань в режимі реального руху потягу та при ударних випробуваннях. Для дослідження метода корекції динамічних похибок їх електричних ВП

було сформовано випробувальний електричний сигнал, що складається з послідовності імпульсів різної форми. Без корекції СКВ похибки вимірювання цього сигналу склали 16 % від максимального значення сигналу. При корекції динамічних похибок методом, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, вдалось досягти СКВ похибки вимірювання випробувального електричного сигналу 3,2 % від максимального значення, в той час як метод Тихонова для тензометрії дозволив забезпечити СКВ цієї похибки 5,2 %. Аналогічний експеримент було проведено з електричним сигналом у вигляді частотно-модульованої синусоїди. СКВ похибки його вимірювання склали 46 % від максимального значення сигналу. Корекція цього сигналу методом, що ґрунтується на використанні вейвлет-перетворення, дозволила знизити це значення до 16 %, в той час як корекція варіантом метода Тихонова для тензометрії – до 17 %.

Системи типу ВПП-10 працюють з сигналами тензомостів, що формуються в результаті роботи систем навантаження літальних апаратів. Одним з таких є сигнал, який складається з ділянок коливань трикутної форми, що містять постійну складову, та лінійних переходів між ними (рис. 7). Такий сигнал імітує навантаження на крило під час зльоту, руху в повітрі та приземлення. СКВ похибки вимірювання цього електричного сигналу склали 10 % від його максимального значення.

Після обробки результатів вимірювань методом, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, СКВ становило 0,7 %, а після обробки методом Тихонова – 6,6 %, що свідчить про більшу ефективність першого метода.

В розділі досліджено вплив похибки ідентифікації динамічної моделі електричного ВП на СКВ

Рис. 7. Графік вхідного сигналу електричного ВП системи типу ВПП-10

похибки вимірювання сигналу з тензомоста. Експерименти проводилися для електричних ВП системи ВПП-9, що моделюються ланками аперіодичного типу другого порядку, та електричних ВП системи ВПП-10, що моделюються ланками третього порядку. В першому випадку встановлено, що при зміні постійних часу моделі  $T_1$ ,  $T_2$  на 5 % СКВ похибки вимірювання сигналу з тензомоста змінюється не більше, ніж на 1 %, що становить 6 % самої величини СКВ (див. табл. 4). В другому випадку при зміні параметрів моделі  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  на 10 % СКВ похибки вимірювання сигналу змінюється не більше, ніж на 0,17 %, що становить 24 % від величини самого СКВ.

Таблиця 4 похибки нескорегованого сигналу, то вплив похибки ідентифікації моделі електричного ВП на неї визнано несуттєвим.

У додатках наведено відомості про впровадження результатів дисертації, результати обчислення коефіцієнтів цифрових фільтрів оператора корекції динамічних похибок, характеристики ряду найбільш вживаних ортогональних вейвлетів, технічні характеристики систем типу ВПП-9 та ВПП-10, до складу яких входять електричні вимірювальні перетворювачі.

Оскільки похибка скорегованого сигналу з тензомоста при цьому залишається значно меншою

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача розвитку і вдосконалення метода обробки одержаних в динамічних режимах результатів вимірювань електричних ВП, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, призначеного для аналізу неперіодичних електричних сигналів.

1. Проведено аналіз існуючих методів корекції динамічних похибок електричних ВП, в результаті чого виявлено, що вони не дозволяють в повній мірі вирішити задачу підвищення точності вимірювань при обмеженому об'ємі апріорної інформації про сигнал з тензомоста і потребують розвитку. Виявлено, що найбільш перспективним для цього є метод, що ґрунтується на використанні дискретного вейвлет-перетворення.

2. Синтезовано оператор корекції динамічних похибок електричних ВП в базисі вейвлет-функцій. Доведено, що при правильному виборі вейвлета, тобто з урахуванням порядку динамічної моделі електричного ВП, оператор корекції буде стійким. Цифровий фільтр, що реалізує алгоритм корекції динамічних похибок вимірювань сигналів з тензомостів, побудовано по структурі, що дозволяє відповідним вибором вейвлета адаптувати оператор корекції до особливостей електричного сигналу, що вимірюється, визначати і розділяти шум та інформативну частину сигналу і досягти мінімальної можливої похибки скорегованого сигналу.

3. Запропоновано для побудови оператора корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів математичний вираз, максимум якого дозволяє обирати вейвлет, з використанням якого досягається мінімальне СКВ похибки вимірювання сигналу без втрати стійкості оператора корекції. Ефективність використання запропонованого математичного виразу перевірена експериментально. В ході досліджень встановлено, що він дозволяє знизити СКВ похибки вимірювання сигналу тензомоста в 1,5...2 рази в порівнянні з тим, що може бути одержане при довільному виборі вейвлета.

4. Досліджено методи вейвлет-фільтрації електричних сигналів. Запропоновано для підвищення точності вимірювань сигналів тензомостів використати „надм'яку” порогову обробку вейвлет-коефіцієнтів з адаптивним вибором параметра, що регулює величину порога. Експерименти показують, що такий підхід дозволяє фільтрувати сигнали тензомостів при обмеженому об'ємі апріорної інформації про їх спектральний склад і забезпечити мінімальне СКВ похибки їх вимірювання.

5. Отримано оцінки впливу похибки ідентифікації динамічної моделі електричного вимірювального перетворювача тензодавача на середньоквадратичну похибку скорегованого сигналу. Встановлено, що похибка 5 % параметрів динамічної моделі електричного ВП другого порядку зумовлює зростання СКВ похибки вимірювання сигналу тензомоста не більше, ніж на 1 %, що становить 6 % від величини самого СКВ. Похибка 10 % параметрів динамічної моделі електричного ВП третього порядку приводить до зростання СКВ похибки вимірювання сигналу тензомоста не більш, ніж на 0,17 %, що становить 24 % від величини самого СКВ. Оскільки при цьому похибка скорегованих результатів вимірювань залишається значно меншою похибки нескорегованих результатів, то вплив похибки ідентифікації динамічної моделі електричного ВП на СКВ похибки вимірювання сигналів тензомостів визнано несуттєвим.

6. Розроблена методика корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів, що реалізується у вигляді прикладних програм для персонального комп'ютера і використовує стандартні обчислювальні процедури.

7. Встановлено, що для сигналів тензомостів, які мають місце при випробуваннях транспортних засобів, метод, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, дозволяє досягти на 1...6 % меншого СКВ похибки вимірювання, ніж варіант метода Тихонова для електричних ВП тензодавачів.

8. Результати роботи впроваджені на ДП «Авіаційний науково-технічний комплекс ім. О.К. Антонова» (м. Київ), в Випробувальному Центрі Проектно-конструкторського управління ВАТ «Крюковський вагонобудівельний завод» (м. Кременчук) та на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Быкова Т.В. Интеллектуальный преобразователь для тензометрических измерительных систем / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: Черкаський державний технологічний університет. – 2005. – №3. – С. 98 – 100.

*Здобувачем проаналізовано структуру та особливості електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів і відмічено задачі, які потребують нагального розв'язання, зокрема, з метою підвищення точності в динамічному режимі.*

2. Быкова Т.В. Калибраторы для силоизмерительных устройств / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: Черкаський державний технологічний університет. – 2005. – №3. – С. 101 – 103.

*Здобувачем запропоновано спосіб калібровки силовимірювальних засобів вимірювальної техніки, який може бути використаний в динамічному режимі.*

3. Быкова Т.В. Расчет неопределенности восстановления сигналов при динамических измерениях / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет повітряних сил ім. Івана Кожедуба. – 2006. – Вип. 7(56). – С. 11 – 12.

*Здобувачем розроблено методику оцінки невизначеності результатів вимірювань електричних величин після корекції динамічних похибок.*

4. Быкова Т.В. Калибраторы для силоизмерительных каналов / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: Черкаський державний технологічний університет. – 2006. – Спецвыпуск. – С. 95 – 97.

*Здобувачем проведено аналіз калібраторів, які можуть бути використані для метрологічного забезпечення динамічного режиму електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів.*

5. Быкова Т.В. Неопределенность вейвлет-восстановления результатов динамических измерений / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет повітряних сил ім. Івана Кожедуба. – 2007. – Вип. 6(64). – С. 10 – 12.

*Здобувачем запропоновано метод корекції динамічних похибок вимірювань, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення, і розроблено методику оцінки невизначеності результатів вимірювань після корекції.*

6. Быкова Т.В. Определение динамических характеристик тензометрических измерительных каналов / Т.В. Быкова, М.П. Сергиенко, Г.А. Черепашук // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2007. – №1(37). – С. 17 – 24.

*Здобувачем проведено аналіз структури вимірювального каналу тензометричної вимірювальної системи для випробувань на міцність типу ВПП-9 і одержано динамічну модель електричного вимірювального перетворювача.*

7. Быкова Т.В. Способ повышения эффективности оценки измеряемой величины при динамических измерениях / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет повітряних сил ім. Івана Кожедуба. – 2008. – Вип. 4(71). – С. 136 – 138.

*Здобувачем розроблено спосіб підвищення ефективності оцінки електричної величини, що вимірюється в динамічному режимі, після корекції методом, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення.*

8. Быкова Т.В. Синтез оператора коррекции результатов динамических измерений в базе ортогональных вейвлетов / Т.В. Быкова // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2009. – №2(59). – С. 103 – 108.

9. Быкова Т.В. Метод подавления шума при коррекции результатов динамических измерений с использованием ортогональных вейвлетов / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2009. – №5(62). – С. 80 – 84.

*Здобувачем розроблено метод придушення шуму під час корекції динамічних похибок, що полягає в використанні „надм'якої” порогової обробки вейвлет-коефіцієнтів з адаптивним вибором параметра, що регулює величину порога .*

10. Быкова Т.В. Методы динамической коррекции измерительных устройств / Т.В. Быкова // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні „ІКТМ-2004” : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 16 – 19 лист. 2004 р., Харків. – Харків: „ХАІ”, 2004. – С. 168.

11. Быкова Т.В. Повышение динамической точности измерительных каналов с аналого-цифровым преобразованием / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2004) : наук. праці IV Міжнар. наук.-техн. конф., 12 – 14 жовтня 2004 р., Харків. Т. 2. – Харків., 2004. – С. 310 – 312.

*Здобувачем проаналізовано використання поліноміальної апроксимації сигналу, що корегується, сплайнами другого і третього порядків з метою підвищення точності вимірювань в динамічному режимі.*

12. Быкова Т.В. Испытание и калибровка силоизмерительных устройств / Т.В. Быкова, В.А. Подорожный, Т.В. Чебыкина // Metrology and metrology assurance 2005 : 15<sup>th</sup> Scientific symposium with international participation, 13-17 Sept. 2005, Sozopol. – Sozopol, 2005. – P. 337 – 339.

*Здобувачем проведено аналіз стану метрологічного забезпечення тензометричних ЗВТ в динамічному режимі.*

13. Быкова Т.В. Метод автокалибровки тензодинамометров / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2006) : наук. праці V Міжнар. наук.-техн. конф., 10 – 12 жовт. 2006 р., Харків. Т. 2. – Харків, 2006. – С. 196 – 198.

*Здобувачем розроблено спосіб автоматизованої калібровки тензометричних давачів сили.*

14. Быкова Т.В. Многоканальные измерительные системы для статических и динамических испытаний конструкций / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // АВИА-2006 : матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф., 25 – 27 черв. 2006 р., Київ. Т. 1. – К. : НАУ, 2006. – С. 22.53 – 22.56.

*Здобувачем проведено аналіз структури багатоканальних вимірювальних систем для динамічних випробувань конструкцій.*

15. Быкова Т.В. Выбор методов коррекции динамических погрешностей при измерении быстропротекающих процессов / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2006) : наук. праці V Міжнар. наук.-техн. конф., 10 – 12 жовтня 2006 р., Харків. Т. 2. – Харків, 2006. – С. 384 – 386.

*Здобувачем проведено аналіз існуючих методів корекції динамічних похибок засобів вимірювальної техніки і сформульовано вимоги до методу, який обирається для конкретної вимірювальної задачі.*

16. Быкова Т.В. Перспективы применения метода регуляризации для восстановления результатов динамических измерений / Т.В. Быкова // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні „ІКТМ-2006” : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 14 – 16 лист. 2006 р., Харків. – Харків : „ХАІ”, 2006. – С. 214.

17. Быкова Т.В. Метрологические характеристики сигма-дельта АЦП / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Людина і космос : тези IX Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф. 18 – 20 квітня 2007 р., Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: 2007. – С. 204.

*Здобувачем проведено аналіз роботи сигма-дельта АЦП в динамічному режимі і виявлено фактори, що формують динамічну похибку вимірювань.*

18. Быкова Т.В. Математическая модель сигма-дельта модулятора первого порядка / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Людина і космос : тези IX Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф. 18 – 20 квітня 2007 р., Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: 2007. – С. 205.

*Здобувачем одержано динамічну модель сигма-дельта АЦП, що входять до складу тензометричних вимірювальних каналів систем для динамічних випробувань.*

19. Быкова Т.В. Решение обратной задачи динамики с помощью аппарата вейвлет-преобразования / Т.В. Быкова // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні „ІКТМ-2007” : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 13 – 15 лист. 2007 р., Харків. – Х. : „ХАІ”, 2007. – С. 240.

20. Быкова Т.В. Применение аппарата вейвлет-преобразования для восстановления результатов динамических измерений / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Людина і космос : тези Х Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф. 9 – 11 квітня 2008 р., Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: 2008. – С. 174.

*Здобувачем розроблено метод корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів з використанням апарату вейвлет-перетворення.*

21. Быкова Т.В. Способ выбора вейвлет-базиса для коррекции динамических погрешностей / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008) : наук. праці VI Міжнар. наук.-техн. конф., 14 – 16 жовтня 2008 р., Харків. Т. 2. – Харків, 2008. – С. 309 – 312.

*Здобувачем запропоновано комплексний критерій вибору вейвлет-базису для побудови оператора корекції, який дає мінімальну середнє квадратичне відхилення похибки вимірювання сигналу.*

22. Быкова Т.В. Динамические характеристики тензометрических измерительных систем для прочностных испытаний / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Метрологія та прилади. – Харків: ННЦ «Інститут метрології». – 2009. – №1. – С. 30 – 34.

*Здобувачем одержано динамічну модель електричного вимірювального перетворювача, виконаного по схемі підсилювача типу модулятор-демодулятор.*

23. Быкова Т.В. Способ автоматизации процесса коррекции динамической погрешности измерений / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Обробка сигналів і негауссівських процесів : праці II міжнар. наук.-практ. конф., 25-29 травня 2009 р. Черкаси : тези доп. – Черкаси: ЧДТУ, 2009. – С. 91 – 93.

*Здобувачем запропоновано математичний вираз для автоматизації вибору вейвлета при побудові оператора корекції на основі інформації про динамічну модель електричного вимірювального перетворювача та точність апроксимації сигналу за допомогою обраного базису, а також методику його застосування.*

24. Быкова Т.В. Требования, предъявляемые к вейвлету при построении обратного оператора [Электронный ресурс] / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Людина і космос : тези XI Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф. 8 – 10 квітня 2009 р., Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: 2009. – 1 електрон, опт. диск (CD-ROM) : цвет. ; 12 см. – Систем. треб. : Windows 2000/XP и выше, CD/DVD привод.

*Здобувачем проаналізовано способи вибору вейвлетів для задач обробки сигналів і запропоновано методику вибору вейвлета для рішення задачі корекції динамічних похибок.*

25. Быкова Т.В. Энтропийный критерий выбора вейвлет-базиса для построения обратного оператора [Электронный ресурс] / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук // Людина і космос : тези XI Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф. 8 – 10 квітня 2009 р., Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: 2009. – 1 електрон, опт. диск (CD-ROM) : цвет. ; 12 см. – Систем. треб. : Windows 2000/XP и выше, CD/DVD привод.

*Здобувачем досліджено способи обчислення ентропії коефіцієнтів вейвлет-перетворення і запропоновано найбільш ефективний для застосування під час корекції динамічних похибок метод, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення.*

## АНОТАЦІЇ

**Быкова Т.В. Метод підвищення точності вимірювальних перетворювачів тензодавачів в динамічних режимах роботи. – 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. – 2010.

Дисертацію присвячено розвитку та вдосконаленню метода корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів, що ґрунтується на використанні апарату вейвлет-перетворення. Запропоновано оператор корекції динамічних похибок електричних вимірювальних перетворювачів тензодавачів синтезувати таким чином, щоб він здійснював корек-

цію на етапі реконструкції електричного сигналу з вейвлет-коефіцієнтів. Це дозволить адаптувати оператор корекції до особливостей сигналу, що обробляється, визначати рівень присутнього в сигналі шуму в процесі обробки і видаляти його з сигналу і, тим самим, досягти мінімальної можливої похибки його вимірювання. Запропоновано для побудови оператора корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів математичний вираз, максимум якого дозволяє обирати вейвлет, з використанням якого досягається мінімальне середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання сигналу без втрати стійкості оператора корекції. Удосконалено метод придушення шуму під час корекції динамічних похибок вимірювань сигналів тензомостів, який, на відміну від існуючих, полягає в використанні „надм'якої” порогової обробки вейвлет-коефіцієнтів декомпозиції сигналу з адаптивним вибором параметра, що регулює величину порога, і дозволяє придушувати шум при обмежених відомостях про сигнал з тензомоста. Отримано оцінки впливу похибки ідентифікації динамічної моделі електричного вимірювального перетворювача тензодавача на середньоквадратичну похибку скорегованого сигналу і показано, що оператор корекції є малочутливим до цієї похибки.

*Ключові слова:* електричні вимірювальні перетворювачі, засоби обробки вихідних сигналів, методи підвищення точності, динамічний режим вимірювання, корекція динамічних похибок.

**Bikova T.V. The Method of an Accuracy Increase of the Strain Measuring Converters in the Dynamic Operating Conditions. – Manuscript.**

Dissertation for scientific degree of engineering sciences on specialty 05.11.05 – equipment and methods of measurement of electric and magnetic magnitudes. – National Technical University is the «Kharkov Polytechnic Institute». Kharkov. – 2010.

Dissertation is devoted to development and perfection strain sensors electric measuring transducers dynamic errors correction method, that is based on the use of the wavelet transform. It is offered to synthesize strain sensors electric measuring transducers dynamic errors correction operator thus, that it carried out a correction on the stage of reconstruction an electric signal from wavelet-coefficients. That allows to adapt correction operator to the features of signal which is processed, to determine the level of present in a signal noise in the process of treatment and delete it from a signal and, the same, attain the minimum possible error of its measuring. Mathematical expression is offered for the construction of dynamic errors of measurings of signals of strain sensors correction operator, maximum which allows to select wavelet, with the use of which minimum standard deviation of signal measuring error is arrived at without the loss of stability of correction operator. The muting method that is during the dynamic errors correction of strain sensors signals measurings is improved, which, unlike existing, consists in the use of „supersoft” threshold treatment of signal decomposition wavelet-coefficients with the adaptive choice of parameter, which regulates the size of threshold, and allows to delete noise at the limited information about a signal of strain sensors. The influence estimations of the dynamic model identification error of electric measuring transformer of strain sensors on the mean square error of the adjusted signal had got and it is revealed that an operator of correction is not sensitive to this error.

*Keywords:* electric measurings transducers, processing means of initial signals, methods of precision increase, dynamic mode of measuring, correction of dynamic errors.

**Быкова Т.В. Метод повышения точности измерительных преобразователей тензодатчиков в динамических режимах работы. – 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. – 2010.

Диссертация посвящена исследованию и усовершенствованию метода коррекции динамических погрешностей электрических измерительных преобразователей тензодатчиков, основанного на использовании аппарата вейвлет-преобразования.

Проанализированы особенности электрических измерительных преобразователей тензодатчиков, работающих в динамических режимах, установлены класс их динамических моделей и характер измеряемых сигналов тензомостов. Проведен обзор существующих методов коррекции ди-



намических погрешностей измерения электрических сигналов и показано, что наиболее перспективным является метод, основанный на использовании аппарата вейвлет-преобразования.

Предложено построение оператора коррекции динамических погрешностей электрических измерительных преобразователей тензодатчиков осуществлять таким образом, чтобы, выполнив статистическую обработку коэффициентов прямого вейвлет-преобразования выходного сигнала измерительного преобразователя, можно было бы разделить спектральные составляющие, относящиеся к шуму и информативной части сигнала. С этой целью при построении использованы ортогональные вейвлеты, а оператор коррекции выполнен из вейвлет-фильтров реконструкции. Таким образом, оператор коррекции динамических погрешностей измерения сигналов тензомостов представляет собой совокупность полосовых фильтров, частотные характеристики которых соответствуют частотной характеристике обратного оператора электрического измерительного преобразователя в соответствующих спектральных полосах. Предложено с целью обеспечения устойчивости оператора коррекции динамических погрешностей выбор вейвлета для заданной динамической модели измерительного преобразователя осуществлять из той совокупности вейвлетов, частотные характеристики которых затухают быстрее, чем растет частотная характеристика обратного оператора измерительного преобразователя.

Предложено математическое выражение, максимум которого позволяет выбирать вейвлет при построении оператора коррекции на основании информации о динамической модели электрического измерительного преобразователя тензодатчика и точности аппроксимации измеряемого сигнала с помощью выбранного базиса. Экспериментально доказано, что использование этого выражения позволяет достичь меньшей среднеквадратической погрешности скорректированного сигнала тензодатчика по сравнению с той, которая может быть получена при произвольном выборе базиса.

Усовершенствован метод подавления шума при коррекции динамических погрешностей электрических измерительных преобразователей путем использования „сверхмягкой” пороговой обработки вейвлет-коэффициентов с адаптивным выбором параметра, который регулирует величину порога. Предложено величину порога определять на первом уровне декомпозиции измеренного электрического сигнала путем статистической обработки вейвлет-коэффициентов. Разработан способ расчета параметра, регулирующего величину порога на последующих уровнях декомпозиции. Показано, что такой подход позволяет подавлять шум, присутствующий в зарегистрированном на выходе электрического измерительного преобразователя сигнале при минимальном объеме априорной информации о его спектральном составе.

Получены оценки влияния погрешности идентификации динамической модели электрического измерительного преобразователя на СКО погрешности скорректированных сигналов тензомостов и показано, что оператор коррекции является малочувствительным к этой погрешности.

Рассмотрены практические задачи коррекции динамических погрешностей электрических измерительных преобразователей тензодатчиков, входящих в состав измерительных систем для прочностных испытаний транспортных конструкций. Проведены экспериментальные исследования и разработана методика коррекции динамических погрешностей на основании предлагаемого метода. Результаты внедрения показали эффективность использования разработанного метода повышения точности электрических измерительных преобразователей в динамических режимах работы.

*Ключевые слова:* электрические измерительные преобразователи, средства обработки выходных сигналов, методы повышения точности, динамический режим измерений, коррекция динамических погрешностей.

Підписано до друку 15.02.2010 р.  
Формат 60x90/16. Папір офсетн. №2. Офс. друк.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 69

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
“Харківський авіаційний інститут”  
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17  
<http://www.khai.edu>  
Видавничий центр “ХАІ”  
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

---