

9. Murata, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications [Text] / T. Murata // Proceedings of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, Issue 4. – P. 541–580. – Available at: <http://www.cs.unc.edu/~montek/teaching/spring-04/murata-petrinets.pdf> doi: 10.1109/5.24143
10. Nielsen, M. Models for concurrency [Text] / M. Nielsen, G. Winskel. – Aarhus.: Preprint DAIMI PB-429, 1993. – 187 p.
11. Воеводин, В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах [Текст] / В. В. Воеводин. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
12. Гергель, В. П. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем [Текст] : уч. пос. / В. П. Гергель, Р. Г. Стронгин. – Новгород.: ННГУ, 2001. – 184 с. – Режим доступа: <http://hpc.icc.ru/documentation/unn/gergel.pdf>
13. Bertsekas, D. P. Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods [Text] / D. P. Bertsekas, J. N. Tsitsiklis. – Belmont: Athena Scientific, 2003. – 730 p.
14. Топорков, В. В. Модели распределенных вычислений [Текст] / В. В. Топорков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

Розглянуто задачу дослідження структурних властивостей нестационарних широкополосових сигналів з метою отримання вимірювальної інформації про технічний стан об'єкту спостереження. Запропоновано узагальнений алгоритм реалізації методу дослідження для інформаційно-вимірювальних систем на прикладі статистичної моделі вимірювального сигналу. Проведено аналіз ефективності застосування методу дослідження

Ключові слова: структурний аналіз, спектральний аналіз, вейвлет-перетворення, інформаційно-вимірювальні системи

Рассмотрена задача исследования структурных свойств нестационарных широкополосных сигналов с целью получения измерительной информации о техническом состоянии объекта наблюдения. Предложен обобщенный алгоритм реализации метода исследования для информационно-измерительных систем на примере статистической модели измерительного сигнала. Проведен анализ эффективности применения метода исследования

Ключевые слова: структурный анализ, спектральный анализ, вейвлет-преобразование, информационно-измерительные системы

УДК 681.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37404

МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ У ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Д. С. Шантир

Кандидат технічних наук

Кафедра автоматизації

експериментальних досліджень

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: shantyr@meta.ua

1. Вступ

Найбільш цінною та повною інформацією про технічний стан об'єкту є інформація, що характеризує енергетичні джерела, тому в основі методів отримання вимірювальної інформації, що рекомендовані нормативними документами, покладено вимірювання та моніторинг енергетичних характеристик (наприклад, потужності енергетичного спектра). Практично ж застосувати ці методи до сигналу отриманого з складного об'єкту неможливо, оскільки вони не дозволяють визначити характеристики окремих елементів, які мають вплив на технічний стан. Однак структура вимірювального сигналу має жорсткий зв'язок з процесами у об'єкті спостереження.

Під технічним станом об'єкта мається на увазі наявність чи відсутність відхилень від штатного режиму, ознаками якого є зміни в структурі вимі-

рювального сигналу. Відповідно в основі отримання інформації про технічний стан лежить виявлення, вимірювання та визначення тенденцій розвитку цих змін у часі.

Сучасний рівень розвитку теоретичної бази в області обробки сигналів та інформаційних технологій дозволяє значно збільшити об'єм інформації, що отримується шляхом аналізу змін структурних властивостей вимірювального сигналу [1].

Слід також зазначити, що новітні технології проектування, виробництва та експлуатації складних об'єктів мають тенденцію до зменшення значень величин, що характеризують зміни їх технічного стану відносно штатного. Це спричинює підвищення інформаційної прихованості, отже актуальною науковою проблемою залишається задача отримання кількісної інформації про властивості об'єктів дослідження та процесах у них, методами чутливими до малих відносних змін па-

раметрів структури інформативної складової вимірювального сигналу.

Застосовуючи запропонований метод аналізу структури нестационарних сигналів для об'єктів у перехідному режимі, можна виявити найменші зміни, що є ознаками існування або зародження незворотних змін технічного стану об'єкту. Запропонований алгоритм реалізації методу дослідження з можливістю вибору базису відповідно до фізичної природи та властивостей процесів, що спостерігаються, дозволяє побудувати інформаційно-вимірювальну систему за принципом проблемної орієнтації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналізуючи літературні джерела, в загальному випадку, можна виділити два напрями визначення стану об'єкта спостереження, ідея яких лежить в тому, що всяке відхилення від норми параметрів функціонування і структури об'єкта призводить до зміни характеру взаємодії його елементів і, отже, до зміни в супроводжуючих цю взаємодію фізичних процесах:

- виявлення факту наявності і тенденцій розвитку незворотних змін функціонування об'єкта, що характеризуються закономірними змінами в досліджуваному фізичному процесі [2–4];

- виявлення змін функціонування об'єкта на ранній стадії, що характеризуються малими змінами в досліджуваному фізичному процесі, які мають випадковий характер [3, 5].

З урахуванням вищесказаного, основну задачу отримання вимірювальної інформації необхідно сформулювати як задачу розділення множини можливих параметрів досліджуваного фізичного процесу, що характеризують стан об'єкта на дві підмножини:

- параметри, що характеризують штатний стан об'єкту спостереження;

- параметри, що характеризують відхилення від штатного стану об'єкту спостереження, наприклад ознаки зародження нових незворотних процесів і тенденції їх розвитку у часі.

Проблемам отримання вимірювальної інформації присвячено дуже багато теоретичних праць та практичних досліджень. В основі найбільш поширених та рекомендованих нормативними документами методів отримання вимірювальної інформації, лежать статистичні моделі сигналів. Зокрема серед вітчизняних дослідників статистичних методів в області діагностики підшипників качання є В. А. Авакян, Р. А. Коллот, Б. Г. Марченко та М. Б. Мислович. В основі статистичного підходу покладено вимірювання і моніторинг чисельних значень однієї або декількох статистик, реалізації досліджуваного фізичного процесу (інтенсивність $\sigma^2(t)$, поточна автокореляційна функція $R(\tau, t)$, поточний енергетичний спектр $G(\omega, t)$) та їх порівняння з значеннями цих статистик в штатному стані об'єкту спостереження. За характером сукупного відхилення поточного стану об'єкта від штатного можна формувати показники зміни функціонального стану об'єкта спостереження. Отже, найбільш поширеною є модель штатних станів об'єкта спостереження в різних режимах його роботи, де характер зміни стану

об'єкта визначається за відхиленнями інформативних параметрів від величин на виході моделі. При цьому аналіз можна проводити як у часовій, так і в частотній областях.

Такий підхід веде до втрати інформації потенційно закладеної в структурі вимірювального сигналу.

Серед найбільш відомих авторів структурним аналізом займаються Мучнік, Воробйов, Кіріченко [6, 7]. Як загальний підхід, пропонується структурний аналіз нестационарних сигналів проводити у часовій області наступним чином: розбити нестационарний сигнал на квазістационарні відрізки, а потім для кожного відрізка побудувати модель складовими якої є рівні сигнали. Для визначення рівнів пропонується з кілька моделей в основі яких лежить теорія ланцюгів Маркова.

В даній роботі запропоновано інший підхід до структурного аналізу сигналу, який враховує той факт, що досліджуваний фізичний процес є випадковим і в цілому нестационарним, але локально стаціонарним і може мати місце признак повторюваності, але не періодичності.

Під структурним аналізом будемо розуміти сукупність наступних операцій:

- статистичний опис випадкового процесу у часовій області

- статистичний опис процесу в частотній області
- оцінку статистичного показника, який є носієм інформації про стан об'єкта, за результатами комплексної незалежної обробки в частотній і часовій областях.

Відповідно до цього, пропонується підхід до розв'язання задачі отримання вимірювальної інформації, заснований на побудові моделі, що дозволяє виконувати аналіз структури вимірювального сигналу в два етапи:

- виділення і оцінювання інформативних параметрів штатних вимірювальних сигналів, тобто низькочастотних квазістационарних сигналів великої інтенсивності, моніторинг яких дозволяє судити про поточний стан об'єкта спостереження і робити прогноз;

- виділення і оцінювання інформативних параметрів високочастотних нестационарних сигналів малої тривалості, які несуть інформацію про незворотні процеси, що зароджуються, властиві тільки конкретним елементам об'єкта спостереження.

Основною трудностю, що виникає при такому підході є апріорна невизначеність статистики завад, на фоні яких проводиться оцінювання інформативних параметрів, нестационарність і мала тривалість процесів, що характеризують зміни стану досліджуваного об'єкта.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою досліджень є розробка методів і алгоритмів отримання вимірювальної інформації, чутливих до малих відносних змін структури вимірювального сигналу при відхиленні стану об'єкта спостереження від штатного, що дозволяють виявити ознаки зародження незворотних процесів у об'єкті і тенденції їх розвитку у часі.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- скласти модель структури вимірювального сигналу та визначити метод її аналізу;
- провести аналіз ефективності застосування розробленого методу.

4. Модель та метод дослідження структурних властивостей вимірювального сигналу

4. 1. Модель структури вимірювального сигналу

Нехай вимірювальний сигнал $y(t)$ функціонально пов'язаний з досліджуваним фізичним процесом $\alpha(t)$ лінійним перетворенням:

$$y(t) = L[\alpha(t)] + n(t),$$

де $L[\cdot]$ – вується, $n(t)$ – випадкова складова (внутрішні шуми первинного перетворювача, шуми квантування, похибки, викликані обмеженістю розрядної сітки, похибки реалізації алгоритму обробки, нестабільність характеристик окремих елементів перетворювача). У структурі фізичного процесу $\alpha(t)$, потрібно адитивно врахувати два основні чинники:

- взаємодія елементів об'єкта спостереження підкоряється законам фізики, отже, фізичний процес $\alpha(t)$ містить закономірну складову $\alpha_{zak}(t)$;
- оскільки не всі зв'язки між елементами об'єкта спостереження фіксовані, то фізичний процес $\alpha(t)$ містить випадкову складову $\alpha_{vnn}(t)$.

Виходячи з вищесказаного, видно, що фізичний процес породжує широкопasmовий вимірювальний сигнал, модель структури якого представимо у вигляді:

$$y(t) = s(t) + \xi(t) + n(t),$$

де $s(t) = L[\alpha_{zak}(t)]$ – модель структури закономірної складової ВС, $\xi(t) = L[\alpha_{vnn}(t)]$ – модель структури випадкової складової ВС.

Залежність вимірювального сигналу від деякого узагальненого показника q стану об'єкта спостереження подамо у вигляді:

$$y(t, q) = s(t, q) + \xi(t, q) + n(t).$$

У об'єктах, розрахованих на тривалий термін експлуатації в штатному режимі має місце процес $y_{шт}(t)$, якому відповідає штатний вимірювальний сигнал. Для його опису вимір застосуємо поліноміальну модель:

$$y_{шт}(t) = \lambda^{(0)} + \lambda^{(1)}(t - t_i) + \frac{1}{2}\lambda^{(2)}(t - t_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

відповідний вимірювальний сигнал позначимо як $s^I(\lambda)$.

Тоді, для описання відхилень стану досліджуваного об'єкту від штатного, в моделі структури потрібно ввести два виду відхилень:

- повільні, порівняно з періодом стаціонарності T ;
- швидкі, порівняно з максимальною частотою спектра закономірної складової F_{max} .

Повільні відхилення враховуємо шляхом моніторингу параметрів поліноміальної моделі

$$s_{шт}(q) = s^I(\lambda(q)).$$

Швидкі відхилення враховуємо, як виникнення нестационарності в межах інтервалу, що раніше вважався стаціонарним

$$s^{II}(q) = s(q) - s^I(\lambda(q)),$$

де $s^{II}(q)$ – модель структури швидких змін закономірної складової ВС.

Відповідно до прийнятих позначень, модель структури закономірної складової вимірювального сигналу, яка має вигляд

$$s(q) = s^I(\lambda(q)) + s^{II}(q),$$

назвемо моделлю структури вимірювального сигналу, перший доданок якої має відому структуру, але параметри її не відомі, у другому доданку структура є заделегідь невідомим елементом деякої множини.

Масштаб за частотою складових $s^I(\lambda(q))$ і $s^{II}(q)$ визначимо їх часом кореляції ($\tau^I \gg \tau^{II}$, відповідно).

4. 2. Метод аналізу структури вимірювального сигналу

Тепер необхідно виконати синтез і дослідження властивостей оптимального алгоритму, що дозволяє провести аналіз структури, тобто виявити перерозподіл енергії високочастотних інформативних складових в спектрі вимірювального сигналу, тобто знайти:

$$s^I(t, \lambda(t)) \quad \text{та} \quad \hat{s}^{II}(t) = y(t) - \hat{s}^I(t, \lambda(t)).$$

За показник якості селекції використаємо значення похибки:

$$\epsilon^{II}(t) = \hat{s}^{II}(t) - (y(t) - K\hat{s}^I(t, \lambda(t))),$$

де K – комплексний множник, що мінімізує вплив систематичної похибки, яка вноситься оцінкою $\hat{s}^I(t, \lambda(t))$:

$$\epsilon^I(t) = \hat{s}^I(t, \lambda(t)) - s^I(t, \lambda(t)) = s^I(t, \lambda(t))(\epsilon - 1), \quad K = \langle \epsilon \rangle.$$

Як критерій оптимальності селекції застосуємо критерій мінімуму середньоквадратичної похибки:

$$\langle (\epsilon^{II}(t))^2 \rangle = \min.$$

Для розв'язання поставленої задачі оптимальної селекції подамо структуру складової $s^{II}(t)$ у вигляді:

$$s^{II}(t) = \sum_k C_k s_k^{II}(t) + \xi(t),$$

де C_k – множник, що приймає значення нуль, якщо інформативна складова про технічний стан об'єкта спостереження $s_k^{II}(t)$ відсутня або одиниця, якщо – присутня; $\xi(t)$ – структурна складова, яка несе апріорно невідому інформацію.

Структуру відхилень стану досліджуваного об'єкту від штатного задамо як сукупність структур деякої

кінцевої множини $S^{II} = \{s_k^{II}\}$, що створюються окремими характерними елементами об'єкту.

За статистичні показники, які несуть інформацію про стан об'єкта спостереження прийmemo:

- у часовій області

$$q_t = \overline{s^{II^2}(t)} / \overline{s^{I^2}(t)},$$

де

$$\overline{s^{II^2}(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} s^{II^2}(t) dt, \quad \overline{s^{I^2}(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} s^{I^2}(t) dt.$$

- в частотній області

$$q_\omega = N_B / N_H,$$

де $N_B = \int_{\Omega_H}^{\Omega_B} G_s(\omega) d\omega,$

$$N_H = \int_{\Omega_p}^{\Omega_B} G_s(\omega) d\omega,$$

$G_s(\omega)$ – енергетичний спектр інформативної складової $s(t)$ (рис. 1).

Отже метод аналізу структури вимірювального сигналу полягає в оцінці спектральних складових вимірювального сигналу в два етапи: на першому – оцінка параметрів заок номірної складової, на другому – оцінка змін параметрів закономірної складової, яка несе інформацію про технічний стан об'єкта спостереження.

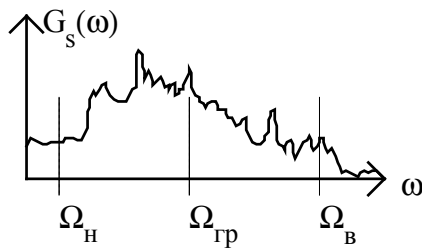


Рис. 1. Енергетичний спектр інформативної складової

4. 3. Алгоритм реалізації метода аналізу структури вимірювального сигналу

Показником структурних змін інформативної складової, тобто виникнення нестационарності, є множина значень C_k :

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_K\}.$$

В якості критерію зміни стану досліджуваного об'єкта виберемо:

- у часовій області

$$\text{Рішення}_t = \begin{cases} \text{зміни } \epsilon, & \text{якщо } q_t > q_t \text{ поріг}, \\ \text{змін нема}, & \text{якщо } q_t < q_t \text{ поріг}, \end{cases}$$

- в частотній області

$$\text{Рішення}_\omega = \begin{cases} \text{зміни } \epsilon, & \text{якщо } q_\omega > q_\omega \text{ поріг}, \\ \text{змін нема}, & \text{якщо } q_\omega < q_\omega \text{ поріг}, \end{cases}$$

- в структурі

$$\text{Рішення}_s = \begin{cases} \text{зміни } \epsilon, & \text{якщо } C = 1, \\ \text{змін нема}, & \text{якщо } C = 0. \end{cases}$$

На рис. 2 наведено структурно-логічну схему виділення інформативних складових моделі структури вимірювального сигналу.

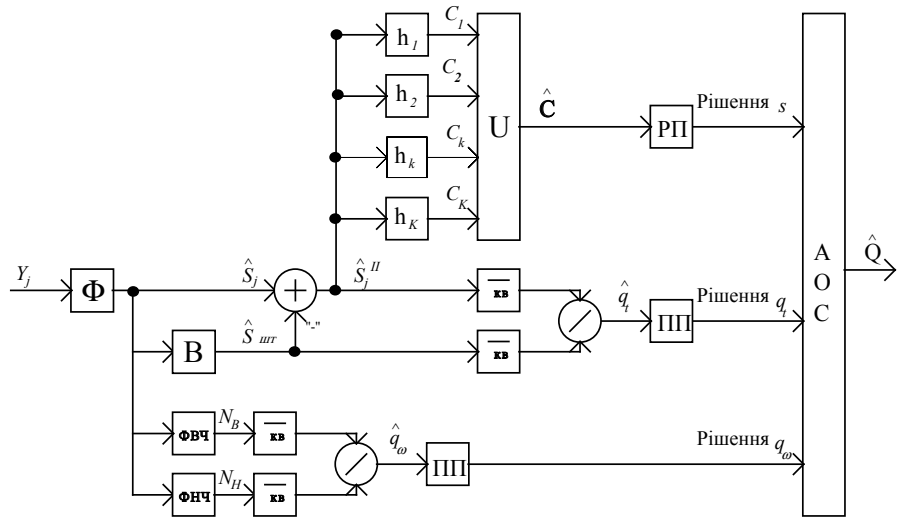


Рис. 2. Структурно-логічна схема виділення інформативних складових статистичної моделі структури широкопasmового вимірювального сигналу

На рис. 2 позначено: Φ – вхідний фільтр; B – формувач вибірки BC у штатному стані; $\Phi ВЧ$ – фільтр верхніх частот; $\Phi НЧ$ – фільтр нижніх частот; $\overline{кв}$ – піднесення до квадрата та усереднення; $/$ – дільник, h_1, h_2, \dots, h_N – фільтри, що виділяють структурні складові s_k^{II} ; $ПП$ – пороговий пристрій; $РП$ – рішаючий пристрій; $АОС$ – аналізатор ознак стану; U – операція об'єднання; Y_j – послідовність вибірок BC ; \hat{S}_j – оцінка інформативної складової моделі BC ; $\hat{S}_{шт}^I$ – оцінка інформативної складової BC в штатному стані; \hat{S}_j^{II} – оцінка інформативної складової BC при відхиленні від штатного стану; \hat{Q} – оцінка узагальненого показника стану об'єкта спостереження.

Основними елементами, що визначають, як принцип формування простору ознак стану для аналізу стану об'єкта спостереження, так і точності характеристики всієї схеми, є фільтри h_1, h_2, \dots, h_N .

Оскільки основним критерієм відмінності сигналів s_k^{II} є частотні смуги, які вони займають, і характер зміни у часі, то аналіз s_k^{II} зручно провести шляхом по-

будови спектральних моделей. При виконанні аналізу на основі спектральних моделей, найбільш широке застосування знайшли фільтри, побудовані на алгоритмах інтегральних перетворень з різними базисами, зокрема перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення [8–10], чірплет-перетворення [11–13].

4. 4. Аналіз ефективності застосування метода аналізу структури вимірювального сигналу

Ефективність застосування розробленого методу та запропонованого алгоритму оцінимо як виграш у наслідок зміни відношення сигнал/шум на вході та виході алгоритмів отримання вимірювальної інформації з інформативних складових моделі структури широкопasmового вимірювального сигналу. Відношення сигнал/шум на вході та виході алгоритму отримання вимірювальної інформації з низькочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу, запишемо у вигляді:

$$q_{вх} = \frac{A}{3\sigma_{вх}}, \quad q_{вих}^I = \frac{A}{3\sigma_{вих}^I},$$

де $(\sigma_{вх})^2, (\sigma_{вих}^I)^2$ – спектральна густина шуму на вході та виході алгоритмів, відповідно.

Спектральна густина шуму на вході (для широкопasmового вимірювального сигналу) визначається за формулою:

$$\sigma_{вх}^2 = NF_{max}^{вх}.$$

Для селекції та оцінювання параметрів низькочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу застосовуються алгоритми, побудовані на основі фільтра Калмана, який зменшує ширину спектру вхідного сигналу. Отже, на виході алгоритмів маємо

сигнал s^I з шириною спектру $F_{max}^I = \frac{1}{\tau_p}$, де τ_p – час

релаксації фільтра. Тоді спектральна густина шуму на виході буде:

$$(\sigma_{вих}^I)^2 = NF_{max}^I.$$

Оцінимо виграш, що дає застосування алгоритмів отримання вимірювальної інформації для низькочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу:

$$V^I = \frac{q_{вих}^I}{q_{вх}} = \frac{\sigma_{вх}}{\sigma_{вих}^I} = \sqrt{\frac{F_{max}^{вх}}{F_{max}^I}} = \sqrt{F_{max}^{вх} \tau_p}.$$

Відношення сигнал/шум на вході та виході алгоритмів отримання вимірювальної інформації з високочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу, запишемо у вигляді:

$$q_{вх}^{II} = q_{вих}^I = \frac{A}{3\sigma_{вих}^I}, \quad q_{вих}^{II} = \sqrt{\frac{\Theta}{N}},$$

де Θ – енергія високочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу, яка має місце при виникненні локальних нестационарностей на інтервалі часу τ :

$$\Theta = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} (s^{II}(t))^2 dt.$$

Для найбільш поширеного на практиці випадку виникнення особливості вимірювального сигналу у вигляді стрибка, енергія s^{II} буде дорівнювати:

$$\Theta = 2 \int_{-\tau/2}^0 \left(\frac{A}{\tau} t\right)^2 dt = \frac{1}{12} A^2 \tau.$$

Оцінимо виграш, що дає застосування алгоритмів отримання вимірювальної інформації для високочастотної складової моделі структури вимірювального сигналу:

$$V^{II} = \frac{q_{вих}^{II}}{q_{вих}^I} = \frac{3\sigma_{вих}^I}{A} \sqrt{\frac{\Theta}{N}} = 3 \sqrt{\frac{F_{max}^I \tau}{12}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\tau}{\tau_p}}.$$

Загальний виграш, що дає застосування розроблених методів та алгоритмів, оцінимо як:

$$V = \frac{q_{вих}^{II}}{q_{вх}} = V^I V^{II} = \frac{1}{2} \sqrt{3\tau F_{max}^{вх}}.$$

З отриманих формул розрахуємо ефективність застосування розроблених методів та алгоритмів. Виходячи з ширини спектру стрибка:

$$F_{max}^{вх} = \frac{5}{\tau}.$$

Тоді

$$V^I = \sqrt{5 \frac{\tau_p}{\tau}}, \quad V^{II} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\tau}{\tau_p}}, \quad V = \frac{q_{вих}^{II}}{q_{вх}} = V^I V^{II} = \frac{1}{2} \sqrt{15} \approx 1,94.$$

Таким чином застосування розроблених методів та алгоритмів отримання вимірювальної інформації з інформативних складових моделі структури широкопasmового вимірювального сигналу, для найбільш поширеного на практиці випадку виникнення особливості сигналу – стрибка, дає збільшення співвідношення сигнал/шум на виході алгоритмів майже вдвічі.

5. Результати теоретичного дослідження алгоритмів реалізації метода аналізу структурних властивостей вимірювального сигналу

Як показано вище, алгоритм реалізації запропонованого метода аналізу структурних властивостей вимірювального сигналу залежить від задачі, яку виконує інформаційно-вимірювальна система, де він застосований. Зокрема, в даній роботі, дослідження проводилось для реалізації методу шляхом застосування алгоритмів фільтрації Калмана на основі поліномів першого порядку (з постійним коефіцієнтом α), а також вейвлет-перетворювачів з ядром Хаара та Добеші. Результати теоретичного дослідження у вигляді аналітичних виразів наведені у табл. 1–3.

Таблиця 1

Аналітичні вирази для визначення характеристик фільтрів нижніх та верхніх частот, побудованих на основі фільтра Калмана першого порядку

Характеристика	Фільтр нижніх частот	Фільтр верхніх частот
Алгоритм фільтрації	$\begin{cases} \hat{s}_i = s_i^e + \alpha(y_i - s_i^e) \\ s_i^e = \hat{s}_{i-1} \end{cases}$	$\begin{cases} \hat{s}_i = s_i^e + \alpha(y_i - s_i^e) \\ s_i^e = \hat{s}_{i-1} \\ \hat{s}_i^{II} = y_i - \hat{s}_i \end{cases}$
Різницеве рівняння	$\hat{s}_i - (1-\alpha)\hat{s}_{i-1} = \alpha y_i$	$\hat{s}_i^{II} - (1-\alpha)\hat{s}_{i-1}^{II} = (1-\alpha)y_i - (1-\alpha)y_{i-1}$
Комплексна передаточна функція	$K(z) = \frac{\alpha}{1 - (1-\alpha)z^{-1}}$	$K(z) = 1 - \frac{\alpha}{1 - (1-\alpha)z^{-1}}$
Нулі	$z_0 = 0$	$z_0 = 1$
Полюса	$z_{II} = 1 - \alpha$	$z_{II} = 1 - \alpha$
$K(1)$	1	0
$K(-1)$	$K(-1) = \frac{\alpha}{2-\alpha}$	$K(-1) = \frac{2(1-\alpha)}{2-\alpha}$
АЧХ $x = \cos(\omega T)$	$K(x) = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - 2(1-\alpha)x + (1-\alpha)^2}}$	$K(x) = \frac{(1-\alpha)\sqrt{2(1-x)}}{\sqrt{1 - 2(1-\alpha)x + (1-\alpha)^2}}$
Смуга пропускання (частота зрізу)	$f_{cp} = \frac{1}{2\pi T} \arccos\left(1 - \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)}\right)$	$f_{cp} = \frac{1}{2\pi T} \arccos\left(1 - \frac{\alpha^2}{2-6\alpha+4\alpha^2}\right)$
Прямокутність	$L_{дБ} = \frac{-20 \text{Lg}\left(\sqrt{2} \left \frac{\alpha}{2-\alpha}\right \right)}{\text{Log}_2\left(\frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)}\right)\right)}$	$L_{дБ} = \frac{-20 \text{Lg}\left(\sqrt{2} \left \frac{2}{\alpha-1}\right \right)}{\text{Log}_2\left(\frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{\alpha^2}{2-6\alpha+4\alpha^2}\right)\right)}$
ФЧХ $x = \cos(\omega T)$ $y = \sin(\omega T)$	$\phi(x, y) = -\arctan\left(\frac{(1-\alpha)y}{1-(1-\alpha)x}\right)$	$\phi(x, y) = -\arctan\left(\frac{\alpha y}{(2-\alpha)(1-x)}\right)$
Імпульсна характеристика	$g_i = \alpha e^{pT}, \quad p = -\frac{\alpha}{T}$	$g_i = \alpha(1-\alpha)e^{pT}, \quad p = -\frac{\alpha}{T}$
Динамічна похибка	$\Delta_{дин} = c_1(y_i - y_{i-1})$	$\Delta_{дин} = c_1(y_i - y_{i-1})$
Коефіцієнти динамічної похибки	$c_1 = \frac{1-\alpha}{\alpha}$	$c_1 = \frac{1-\alpha}{\alpha}$
Комплексна динамічна похибка	$\Delta K(z^{-1}) = (1-\alpha) \frac{1-z^{-1}}{1-(1-\alpha)z^{-1}}$	$\Delta K(z^{-1}) = \frac{\alpha}{1-(1-\alpha)z^{-1}}$
Амплітудна похибка	$\Delta(x) = (1-\alpha) \sqrt{\frac{2(1-x)}{1-2(1-\alpha)x+(1-\alpha)^2}}$	$\Delta(x) = \frac{\alpha}{\sqrt{1-2(1-\alpha)x+(1-\alpha)^2}}$
Фазова похибка	$\Delta\phi(x, y) = \arctg\left(\frac{\alpha y}{(2+\alpha)(1-x)}\right)$	$\Delta\phi(x, y) = -\arctan\left(\frac{-(1-\alpha)y}{1-(1-\alpha)x}\right)$
Коефіцієнт послаблення завад	$\phi^2 = \frac{\alpha}{2-\alpha}$	$\phi^2 = 1-\alpha$
Вихідне співвідношення сигнал/шум квантування	$2^{2(b-1)}$	$2^{2(b-1)} \frac{\alpha}{(2-\alpha)(1-\alpha)}$
Похибка обчислень	$\delta_i = \frac{\alpha y_i (1+\delta)^2 + (1-\alpha)\hat{s}_{i-1}(1+\delta_{i-1})(1+\delta)^3}{\hat{s}_i} - 1$	$\delta_i = \left[\frac{\left[\begin{matrix} [y_i(1+\delta)^3 - \alpha y_i(1+\delta)^2] - \\ -(1-\alpha)y_{i-1}(1+\delta)^4 \\ + (1-\alpha)\hat{s}_{i-1}^{II}(1+\delta_{i-1})(1+\delta)^3 \end{matrix} \right]}{\hat{s}_i^{II}} - 1 \right]$

Таблиця 2

Аналітичні вирази для визначення характеристик збіжності, швидкодії та точності вейвлет-перетворювачів з ядром Хаара

Характеристика	Скейлінг-коефіцієнти	Вейвлет-коефіцієнти
Алгоритм	$v_j = \frac{1}{\sqrt{2}}(v'_j + v'_{j-1})$	$w_j = \frac{1}{\sqrt{2}}(w'_{j-1} - w'_j)$
Комплексна передаточна функція	$K(z) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+z^{-1})$	$K(z) = \frac{1}{\sqrt{2}}(z^{-1} - 1)$
Нулі	$z_0 = -1$	$z_0 = 1$
Полюса	$z_{\Pi} = 0$	$z_{\Pi} = 0$
K(1), K(-1)	$K(1) = \sqrt{2}, K(-1) = 0$	$K(1) = 0, K(-1) = -\sqrt{2}$
АЧХ ($x = \cos(\omega T)$)	$K(x) = \sqrt{1+x}$	$K(x) = \sqrt{1-x}$
Смуга пропускання (частота зрізу)	$f_{cp} = 1/3T$	$f_{cp} = 1/6T$
Прямокутність	$L_{\Delta B} = -20 / \text{Log}_2(1.5)$	$L_{\Delta B} = -20 / \text{Log}_2(3)$
ФЧХ ($x = \cos(\omega T), y = \sin(\omega T)$)	$\phi(x, y) = -\arctan\left(\frac{y}{1+x}\right)$	$\phi(x, y) = -\arctan\left(\frac{y}{1-x}\right)$
Імпульсна характеристика	$h_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, h_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$	$g_0 = -\frac{1}{\sqrt{2}}, g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$
Похибка обчислень	$\delta_i = \frac{(v'_j + v'_{j-1})(1+\delta)^2}{v_j \sqrt{2}} - 1$	$\delta_i = \frac{(w'_j + w'_{j-1})(1+\delta)^2}{w_j \sqrt{2}} - 1$

Таблиця 3

Аналітичні вирази для визначення характеристик збіжності, швидкодії та точності вейвлет-перетворювачів з ядром Добеші

Характеристика	Скейлінг-коефіцієнти	Вейвлет-коефіцієнти
Алгоритм	$v_j = h_0 v'_j + h_1 v'_{j-1} + h_2 v'_{j-2} + h_3 v'_{j-3}$	$w_j = g_{-2} w'_{j+2} + g_{-1} w'_{j+1} + g_0 w'_j + g_1 w'_{j-1}$
Комплексна передаточна функція	$K(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}$	$K(z) = g_{-2} z^2 + g_{-1} z + g_0 + g_1 z^{-1}$
Нулі	$z_0 = -1, z_0 = 2 - \sqrt{3}$	$z_0 = 1, z_0 = -2 - \sqrt{3}$
Полюса	$z_{\Pi} = 0$	$z_{\Pi} = 0$
K(1), K(-1)	$K(1) = \sqrt{2}, K(-1) = 0$	$K(1) = 0, K(-1) = -\sqrt{2}$
АЧХ ($x = \cos(\omega T)$)	$K(x) = 2(1+x)\sqrt{2(2-\sqrt{3})(2-x)}$	$K(x) = 2(1-x)\sqrt{2(2+\sqrt{3})(2+x)}$
Смуга пропускання (частота зрізу)	$f_{cp} = 1/3T$	$f_{cp} = 1/6T$
Прямокутність	$L_{\Delta B} = -20 / \text{Log}_2(1.5)$	$L_{\Delta B} = -20 / \text{Log}_2(3)$
ФЧХ ($x = \cos(\omega T), y = \sin(\omega T)$)	$\phi(x, y) = -2\arctan\left(\frac{y}{x+1}\right) - \arctan\left(\frac{y}{x-(2-\sqrt{3})}\right)$	$\phi(x, y) = -2\arctan\left(\frac{y}{x+1}\right) - \arctan\left(\frac{y}{x+(2+\sqrt{3})}\right)$
Імпульсна характеристика	$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g_{-2} = \frac{\sqrt{3}-1}{4\sqrt{2}}, g_{-1} = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, g_0 = -\frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, g_1 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$
Похибка обчислень	$\delta_i = \frac{\left[h_0 v'_j (1+\delta)^4 + h_1 v'_{j-1} (1+\delta)^4 + h_2 v'_{j-2} (1+\delta)^3 + h_3 v'_{j-3} (1+\delta)^2 \right]}{v_j} - 1$	$\delta_i = \frac{\left[g_{-2} w'_{j+2} (1+\delta)^4 + g_{-1} w'_{j+1} (1+\delta)^4 + g_0 w'_j (1+\delta)^3 + g_1 w'_{j-1} (1+\delta)^2 \right]}{w_j} - 1$

Наведені у таблицях результати дослідження мають зміст для систем, які працюють у реальному масштабі часу. Підвищити точність та інформативність аналізу можна, якщо застосувати алгоритми фільтрації вищих порядків, але при цьому слід враховувати також і збільшення затрат ресурсів пам'яті та машинного часу.

6. Обговорення результатів дослідження алгоритмів реалізації метода аналізу структурних властивостей вимірювального сигналу

Наведені результати дослідження призначені для моделювання блоку обробки вимірювального сигналу у інформаційно-вимірювальній системі, виходячи з умов конкретної задачі. Було виконано імітаційне моделювання реалізації запропонованого методу, в результаті якого виявлено особливості використання структурного аналізу для розв'язку окремих задач: контроль та діагностика вібраційного стану машин та механізмів, стендові випробування коробки передач, вимірювання вологості сипучих речовин в потоці, аналіз мовних та медикобіологічних сигналів. Отримані результати показали, що застосування розробленого методу дозволяє: зменшити похибки вимірювань (приблизно в 1,5–2 рази, в залежності від задачі, що вирішується); виключити грубі та систематичні похибки вимірювань, а також виключити вплив операторних (суб'єктивних) похибок; мінімізувати впливи зовнішнього середовища; побудувати гнучку структуру ІВС; забезпечити стійкість алгоритму роботи та реалізувати вимірювання параметрів нестационарного фізичного процесу в реальному часі; значно підвищити технологічні (скоротити технологічний цикл вироб-

ництва вимірювального приладу приблизно в 2 рази) та економічні (зменшити собівартість вимірювального приладу не менш як в 3 рази) показники.

7. Висновки

Проведено аналіз основних підходів до розв'язання задачі отримання вимірювальної інформації з нестационарного широкосмугового сигналу в ІВС, який показав, що найбільш поширений статистичний підхід не дозволяє використовувати повністю інформаційні можливості вимірювального сигналу. Виходячи з цього, сформульовано принцип структурного аналізу вимірювального сигналу. Розроблено узагальнену статистичну модель структури широкосмугового вимірювального сигналу. Розроблено і досліджено метод та алгоритм його реалізації для дослідження структурних властивостей нестационарного широкосмугового вимірювального сигналу у часовій та частотній областях. Розроблені метод та алгоритм дозволяють: виконати адаптацію процесу отримання вимірювальної інформації в ІВС до досліджуваного фізичного процесу; отримати апріорну інформацію про фізичний процес; дослідити фізичний процес, та виявити нестационарності; викрити приховані тенденції фізичного процесу при розв'язанні задач довгострокового спостереження за показниками якості об'єкта дослідження. Перспективою подальших розвідок в методології дослідження структурних властивостей нестационарних сигналів є адаптація базисів вейвлет-аналізу до конкретних задач, а також використання більш сучасних методів обробки сигналів, зокрема спектральний аналіз з локалізованими модульованими базисами [13].

Література

1. Моттль, В. В. Скрытые марковские модели в структурном анализе сигналов [Текст] / В. В. Моттль, И. Б. Мучник. – М.: Физматлит, 1999. – 352 с.
2. Барков, А. В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам [Текст] / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21–23.
3. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
4. Дорошко, С. М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам [Текст] / С. М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
5. Балийкий, Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов [Текст] / Ф. Я. Балийкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
6. Воробьев, С. А. Структурный анализ результатов медико-биологического эксперимента при неизвестных параметрах модели [Текст] / С. А. Воробьев // Вестник новых медицинских технологий. – 1999. – Т. IV, № 1. – С. 113–115.
7. Коротких, С. С. Исследование вызванных потенциалов в ЭКГ человека с помощью дискретного вейвлет-преобразования [Текст] / С. С. Коротких, Л. О. Кириченко // Радиоелектроника, информатика, управління. – 2011. – № 2(25). – С. 86–91.
8. Kingsbury, N. G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals [Text] / N. G. Kingsbury // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 2001. – Vol. 10, Issue 3. – P. 234–253. doi: 10.1006/acha.2000.0343
9. Addison, P. S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook [Text] / P. S. Addison. – Institute of Physics, 2002. doi: 10.1887/0750306920
10. Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets [Text] / I. Daubechies. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. – 357 p. doi: 10.1137/1.9781611970104
11. Mann, S. The Chirplet transform: A generalization of Gabor's logon transform [Text] / S. Mann, S. Haykin // Proc. Vision Interface, 1991. – P. 205–212.
12. Mann, S. Chirplets and warplets – novel time-frequency methods [Text] / S. Mann, S. Haykin // Electronics letters. – 1992. – Vol. 28, Issue 2. – P. 114–116. doi: 10.1049/el:19920070
13. Kovacevic, J. Life beyond bases: the advent of frames (Part II) [Text] / J. Kovacevic, A. Chebira // IEEE Signal Processing Magazine. – 2007. – Vol. 24, Issue 5. – p. 115–125. doi: 10.1109/msp.2007.904809