

Сучасне методологічне забезпечення проблемноорієнтованих інформаційно-вимірювальних систем оцінювання параметрів стану динамічних об'єктів

Розглянуто тенденції впровадження до інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) сучасних методів обробки сигналів для оцінювання поточного технічного стану об'єкта спостереження в динамічному режимі, що дозволяє підвищити достовірність прийняття рішення про необхідність негайного обслуговування та побудувати довгостроковий прогноз на основі аналізу змін структурних властивостей вимірювальних сигналів.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, оцінювання параметрів, динамічний об'єкт, методичне забезпечення.

Вступ. Сучасні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) будуються на принципах модульності і відкритості, що забезпечує гнучкість їх структури і дозволяє вирішувати широкий спектр задач. Однак розв'язання кожної задачі потребує орієнтованого на неї прикладного програмного забезпечення. Це обмежує використання наявних можливостей ІВС для вирішення задач, що мають спільність в поставленні та потребують однакових типових підходів до їх розв'язання і реалізації результатів. Типовість при цьому виявляється у відношенні до технічних засобів та методологічного й алгоритмічного забезпечення систем.

Інформаційно-вимірювальні системи призначені для забезпечення споживача інформацією про функціональний стан об'єкта спостереження [1]. В багатьох галузях практичної діяльності під час виконання задач контролю, моніторингу та діагностики стану об'єктів спостереження отримують інформацію з широкосмугового вимірювального сигналу (ВС), що породжується нестаціонарними фізичними процесами (скажімо, у разі виявлення ознак зародження дефектів механічної системи за малими відносними змінами значень інформативних параметрів або структури акустичного чи вібросигналу). Широкосмуговий вимірювальний сигнал створюється взаємним впливом великої кількості взаємозв'язаних елементів об'єкта та спостерігається у фіксованій точці об'єкта. За своєю природою такий ВС є випадковим процесом.

Враховуючи нестаціонарність процесів, що мають місце на динамічних об'єктах, складним є завдання визначення й оцінювання параметрів широкосмугового ВС, кожна спектральна складова якого є самостійною інформативною одиницею. У зв'язку з цим ІВС, що застосовуються на практиці, побудовано на принципах контролю статистик, отриманих за результатами спостережень за окремо взятим фіксованим за положенням і тривалістю інтервал часу. Однак, такий підхід веде до втрати інформації, потенційно закладеної в структурі ВС. Виникають труднощі, пов'язані з одно-

значним розпізнаванням стану об'єкта спостереження та виявленням умов, причин і наслідків його зміни. Отже, підвищити інформативність аналізу ВС можна застосуванням методів структурного аналізу у часовій і частотній областях. До того ж, ІВС повинна забезпечувати комплекс всіх можливих і необхідних вимірювальних перетворень, з урахуванням того факту, що навіть малі флуктуації досліджуваного фізичного процесу під час функціонування об'єкта спостереження можуть нести інформацію про незворотні зміни його стану. Виявлення цих змін на стадії їх зародження дозволить уникнути руйнування машин та механізмів [2]. Таким чином, актуальним науково-технічним завданням є отримання в ІВС кількісної інформації про властивості об'єктів і процеси, що в них відбуваються, методами, чутливими до малих відносних змін інформативних параметрів структури ВС.

Сучасний рівень розвитку теоретичної бази, що стосується обробки ВС, і новітні інформаційні технології дозволяють перейти від інтегрального оцінювання до диференційного і тим самим значно збільшити обсяг інформації, що отримується з ВС, шляхом аналізу змін його структурних властивостей. Основними проблемами при цьому є необхідність оцінювання малих змін у структурі ВС, завод та шумів, нестаціонарність і мала тривалість процесів, що характеризують зміну стану об'єкта спостереження.

Поставлення завдання. Джерелом інформації про функціональний стан об'єкта спостереження є фізичні процеси, які супроводжують його функціонування. Зміна властивостей і параметрів цих процесів пов'язані зі зміною параметрів стану об'єкта, що викликано наявністю несправності або розвитком того чи іншого дефекту.

Визначення стану об'єкта спостереження передбачає два напрями:

- виявлення факту наявності і тенденцій розвитку незворотних змін функціонування об'єкта, що характеризуються закономірними змінами в досліджуваному

фізичному процесі;

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

- ідея їх полягає в тому, що всяке відхилення від норми параметрів функціонування і структури об'єкта призводить до зміни характеру взаємодії його елементів, а отже, до змін у фізичних процесах, що супроводжують цю взаємодію.

З урахуванням вищесказаного, основне завдання отримання вимірювальної інформації в ВС 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'єкта спостереження, та параметри, що характеризують відхилення від штатного стану об'єкта спостереження.

Статистичний та структурний підхід до розв'язання поставленої задачі. Розв'язання основної задачі отримання вимірювальної інформації полягає в створенні моделі, що дозволяє:

- визначити параметри, які характеризують зміну функціонального стану об'єкта спостереження,

- вести моніторинг параметрів, які характеризують поточний стан об'єкта спостереження,

- визначити тенденції змін у часі параметрів, які характеризують функціонування об'єкта спостереження.

Проблемам отримання вимірювальної інформації присвячено чимало теоретичних праць та практичних досліджень. В основі найбільш поширених та рекомендованих нормативними документами методів отримання вимірювальної інформації лежать статистичні моделі ВС. В основі статистичного підходу покладено вимірювання і моніторинг чисельних значень однієї або кількох статистик, реалізації досліджуваного фізичного процесу (інтенсивність $\sigma^2(t)$, поточна автокореляційна функція $R(\tau, t)$, поточний енергетичний спектр $G(\omega, t)$ та їх порівняння зі значеннями цих статистик в штатному стані об'єкта 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 ВС від величин на виході моделі. При цьому аналіз ВС можна проводити як у часовій, так і в частотній областях.

Такий підхід призводить до втрати інформації, потенційно закладеної в структурі ВС. Оцінити ці втрати можна порівнянням ентропії ВС і обсягу інформації, що отримується під час енергетичного контролю.

Сучасний рівень розвитку теоретичної бази обробки ВС і новітні інформаційні технології дозволяють значно збільшити обсяг інформації, що отримується з ВС шляхом аналізу змін його структурних властивостей. Тому останнім часом структурні методи аналізу сигналів набувають все більшого поширення у різних галузях діяльності.

Класичний структурний аналіз нестационарних сигналів проводиться у часовій ділянці таким чином: роз-

бивається нестационарний сигнал на квазістационарні відрізки, а потім для кожного відрізка будується модель, складовими якої є рівні сигналу. Для визначення останніх використовують моделі, в основі яких лежить теорія ланцюгів Маркова [3].

Сучасна методологія структурного аналізу сигналу враховує той факт, що досліджуваний фізичний процес є випадковим і в цілому нестационарним, але локально стаціонарним, і може мати місце ознака повторюваності, але не періодичності. Тоді під структурним аналізом можна розуміти сукупність таких операцій:

- статистичний опис випадкового процесу у часовій ділянці;

- статистичний опис процесу в частотній ділянці;

- оцінювання статистичного показника, що несе інформацію про стан об'єкта за результатами комплексної незалежної обробки в частотній і часовій ділянках.

Такий підхід дозволяє виконувати аналіз структури ВС в два етапи:

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

2) виділення й оцінювання інформативних параметрів високочастотних нестационарних сигналів малої тривалості, які несуть інформацію про незворотні процеси, що зароджуються, властиві лише конкретним елементам об'єкта спостереження.

Основною складністю, що виникає за такого підходу, є априорна невизначеність статистики завад, на тлі яких оцінюють інформативні параметри ВС, мала тривалість процесів, що характеризують зміни стану досліджуваного об'єкта.

Реалізація структурного підходу до оцінювання параметрів вимірювального сигналу. Під широким вибором ВС будемо розуміти деяку вибірку з рівномірним кроком дискретизації. Параметри вибірки – положення, об'єм, крок дискретизації, динамічний діапазон, розрядність визначаються вимогами алгоритму обробки ВС.

Основним інформаційним показником вибірки є її ентропія:

$$H = B \log \frac{S_{\text{сиг}}}{N_{\text{сиг}}},$$

де $B = TP$ – база сигналу, $\frac{S}{N}$ – відношення енергетичних показників закономірної та випадкової складової ВС.

Введемо до розгляду характерні для випадкового процесу у (t) інтервали часу:

- період між регламентними обслуговуваннями $T_{\text{регл}}$,

- період квазістационарності $T_{\text{стац}}$.

Для опису процесу в цілому подамо його у вигляді послідовності вибірок $\gamma = \sum_j Y_j$, де кожна вибірка відповідає інтервалу спостереження, який сумірний з періодом квазістационарності, але не перевищує його.

У об'єктах, розрахованих на тривалий термін

експлуатації в штатному стані, має місце процес $y_{шт}(t)$, якому відповідає штатний ВС. Для опису ВС в штатному стані об'єкта спостереження застосуємо поліноміальну модель:

$$y_{шт}(t) = \lambda^{(0)} + \lambda^{(1)}(t - t_1) + \frac{1}{2}\lambda^{(2)}(t - t_1)^2, \\ t = 1, 2, \dots, N.$$

Відповідний ВС позначимо як $Y_{шт} = s'(\lambda)$.

Тоді для описання відхилень стану досліджуваного об'єкта від штатного, до моделі структури ВС потрібно ввести два види 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

$$s_{\text{пов}}(q) = s'(\lambda(q)).$$

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

$$s^{\text{ш}}(q) = s(q) - s'(\lambda(q)),$$

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

Відповідно до прийнятих позначень модель структури закономірної складової ВС має вигляд:

$$s(q) = s'(\lambda(q)) + s^{\text{ш}}(q),$$

де перший доданок має відому структуру, але параметри її невідомі, у другому доданку структура є заделегідь невідомим елементом деякої множини. Масштаб складових моделі визначається часом їх кореляції ($\tau^{\text{ш}} \gg \tau^{\text{п}} \gg$ відповідно).

Структурний аналіз визначеного широкосмугового ВС полягає в селекції інформативних складових статистичної моделі та оцінюванні їх параметрів:

- на першому рівні аналізу – моделі структури закономірної складової ВС в штатному стані досліджуваного об'єкта $s'(\lambda(q))$;
- на другому рівні аналізу – моделі структури швидких змін закономірної складової ВС $s^{\text{ш}}(q)$.

На першому рівні аналізу необхідно обчислити оцінки $\hat{\lambda}^{(0)}, \hat{\lambda}^{(1)}, \hat{\lambda}^{(2)}$

параметрів моделі структури закономірної складової ВС в штатному стані досліджуваного об'єкта $s'(\lambda(q))$.

Відповідно до поліноміальної моделі можна побудувати алгоритм обчислення оптимальних, в значенні мінімуму

середньої квадратичної похибки оцінок $\hat{\lambda}^{(0)}, \hat{\lambda}^{(1)}, \hat{\lambda}^{(2)}$ в реальному масштабі часу [4].

На другому рівні аналізу $s^{\text{ш}}(q)$ подамо статистичною моделлю:

$$s^{\text{ш}}(q) = \int_{\mathbf{x}} \Phi(\mathbf{x}, q) \Psi(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots) \in R,$$

де $\Phi(\mathbf{x})$ – функція значень $s^{\text{ш}}(q)$; $\Psi(\mathbf{x})$ – вагова (базисна) функція; \mathbf{X} – множина, елементами якої можуть бути, наприклад, масштаб (дозвіл за частотою) і зсув у часі. Відповідно, вид моделі $s^{\text{ш}}(q)$

визначається вибором вагової функції $\Psi(\mathbf{x})$ скажімо, локалізованої за частотою періодичної функції (базис перетворення Фур'є), локалізованої у часі і за частотою солітоноподібної функції (базис вейвлет-перетворення), частотно-модульованої солітоноподібної функції (базис чірплет-перетворення) та інших [5,6]. Вибір базисної функції для аналізу ВС визначається

властивостями процесу $s_{шт}(t)$, серед яких: нестационарність; швидкі зміни миттєвого спектра; наявність розривів, стрибків; зміни знаку похідної.

Появу складової $s^{\text{ш}}(q)$ у статистичній моделі:

$$s(q) = s'(\lambda(q))(1 + \delta(q)),$$

де $\delta(q) = \frac{s^{\text{ш}}(q)}{s'(\lambda(q))}$ будемо вважати ознакою виникнення змін стану об'єкта спостереження, показником чого є деяка множина оцінок \hat{C}_i :

$$\hat{C} = \{\hat{C}_1, \hat{C}_2, \dots, \hat{C}_K, \dots, \hat{C}_K\}.$$

На рис. 1 наведено структурно-логічну схему аналізу статистичної моделі структури ВС, призначеної для отримання інформації про функціональний стан досліджуваного об'єкта.

Принцип дії схеми аналізу ґрунтується на використанні властивості сингулярності інформативних складових статистичної моделі структури ВС, тобто:

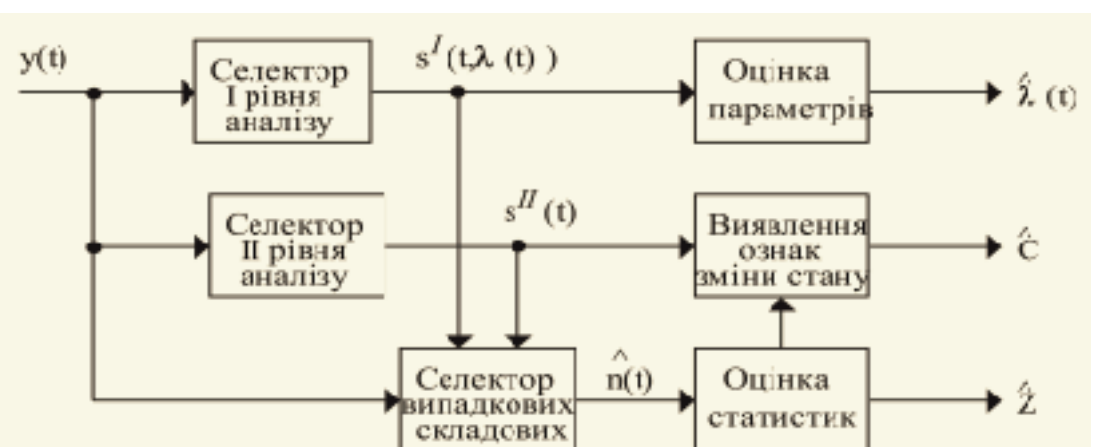


Рис. 1. – Структурно-логічна схема аналізу статистичної моделі структури вимірювального сигналу

$$G'(\omega)G''(\omega)=0$$

Основні вимоги до методології структурного аналізу. Оскільки основним завданням обробки ВС в ІВС є оцінювання інформативних параметрів усіх складових його моделі, то для кожної складової узагальненої моделі сигналу будується своя модель, що описує стан інформативних параметрів сигналу у частотній і часовій ділянках.

Найчастіше застосовувані моделі – спектральні, які будуються за допомогою інтегральних перетворень, та поліноміальні, що створюються на основі розв'язку стохастичних диференціальних рівнянь.

Вибір методу аналізу цих моделей ґрунтується на таких вимогах:

- мінімум витрат обсягу пам'яті;
- робота в реальному часі (мінімум витрат часу на обчислення);
- виключення грубих похибок і зменшення дії випадкових впливів на точність результату обробки;
- можливість аналізу ВС із заданою роздільною здатністю на різних масштабах у часовій та частотній ділянках;
- оптимальність оцінювання параметрів моделі за заданим критерієм,
- доступність оцінювання параметрів моделі споживачеві,
- достовірність оцінювання параметрів моделі,
- максимальна інформативність оцінювання параметрів моделі.

Висновки.

У розвитку інформаційно-вимірювальних систем для оцінювання параметрів стану динамічних об'єктів складається тенденція до підвищення інформативності вимірювального сигналу у двох напрямках:

- покращення стохастичних моделей вимірювального сигналу;
- застосування нових лінійних перетворень, що підвищують точність та полегшують сприйняття результатів вимірювання.

У цій статті запропоновано новий підхід до методологічного забезпечення ІВС, що дозволяє усунути апріорну невизначеність комплексно, за рахунок:

- створення моделі вимірювального сигналу, інформативність якої наближається до рівня ентропії вимірювального сигналу;
- синтезу проблемно-орієнтованого алгоритму обробки вимірювального сигналу з метою отримання інформації про поточний стан об'єкта спостереження;
- синтезу алгоритму виявлення показників процесу зміни поточного стану об'єкта спостереження.

Перспективами розвідок у дослідженнях з розвитку методологічного забезпечення ІВС є вирішення проблеми зниження потенційної інформативності за використання лінійних перетворень шляхом адаптації базису перетворень до властивостей вимірювального сигналу.

Список літератури

1. Новопашенный Г. Н. Информационно-измерительные системы [Текст]: учеб. пособие / Н. Г. Новопашенный. – М.: Высшая школа, 1977. – 208 с.
2. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
3. Моттль, В. В. Скрытые марковские модели в структурном анализе сигналов / В. В. Моттль, И. Б. Мучник – М.: Физматлит, 1999. – 352 с.
4. Згуровский, М. З. Аналитические методы калмановской фильтрации для систем с априорной неопределенностью / М. З. Згуровский, В. Н. Подладчиков. – Киев: Наукова думка, 1995. – 298 с.
5. Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets / I. Daubechies // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. – 350 p.
6. Mann, S. The Chirplet transform: A generalization of Gabor's logon transform / S. Mann, S. Haykin // Proc. Vision Interface 1991, 205–212 (3–7 June 1991).

Аннотация. Рассмотрены тенденции внедрения в информационно-измерительные системы (ИВС) современных методов обработки сигналов для оценки текущего технического состояния объекта наблюдения в динамическом режиме, что позволяет повысить достоверность принятия решения о необходимости немедленного обслуживания и построить долгосрочный прогноз на основе анализа изменений структурных свойств измерительных сигналов.

Summary. Tendencies of introduction to information-measuring systems (IMS) of advanced signal processing techniques to assess the current technical state of the observed object in dynamic mode, thus enhancing the reliability of determining need for immediate service and build long-term forecasts by analyzing changes in the structural properties of the measuring signals are considered.

Стаття надійшла до редакції 10 березня 2015 р.