МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

MEASUREMENT, CONTROL AND DIAGNOSIS IN TECHNICAL SYSTEMS

ДРУГА МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ (ВКДТС -2013)»

Збірник тез доповідей

29-30 жовтня 2013 р.

ВНТУ
ВІННИЦЯ
2013

УДК 621.3.08
ББК 30.607

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки

Головний редактор: **В.В.Грабко**

Відповідальний за випуск: **Кучерук В.Ю.**

Рецензенти: **Столярчук П.Г.**, доктор технічних наук, професор
Кухарчук В.В., доктор технічних наук, професор

Друга міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС -2013), 29-30 жовтня, 2013 р. Збірник тез доповідей. – Вінниця: ПП «ТД«Едельвейс і К», 2013. – 288 с.
ISBN 978-966-2462-35-7
У збірнику опубліковано матеріали конференції, присвяченої проблемам теоретичних основ вимірювань, контролю та технічної діагностики, інформаційно-вимірювальних технологій та метрології.

УДК 621.3.08
ББК 30.607

ISBN 978-966-2462-35-7

УДК 006.91

В.Ю.Кучерук, д.т.н., проф., М.С.Павловська, аспірант

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

Ключові слова: аттрактор, вібродіагностика, процедура вкладення, рівень вібрації, теорія детермінованого хаосу, теорія самоорганізації (синергетика), фазова траєкторія, фрактальна розмірність.

Підвищення надійності, ефективності експлуатації машин і механізмів пов'язано із необхідністю контролю їх технічного стану. Досить часто при контролі технічного стану використовується вібродіагностика, в якій з використанням певних методів формується система ознак, що характеризує технічний стан механізму.

При моніторингу технічного стану обладнання основним параметром є загальний рівень вібрацій, перевищення яким допустимих меж є сигналом для прийняття відповідних заходів. Проте часто на практиці, не зважаючи на загальний рівень вібрації, в механізмі розвиваються інші дефекти, вплив яких на загальний рівень вібрації спочатку незначний, але через деякий час швидкість розвитку дефекту починає рости, що в кінцевому випадку позначається на рівні вібрації. При цьому досить важко запобігти виникненню аварійної ситуації.

Тому виникає необхідність у розробці нових методів аналізу вібросигналів, які дозволяють більш якісно оцінювати інформацію. Одним з таких підходів є використання елементів теорії детермінованого хаосу, параметри якого є досить чутливими до зміни інформативних ознак.

Теорія самоорганізації (синергетика) вивчає поведінку складних систем, умови їх стійкості, природу нестійкості і еволюцію систем далеко від термодинамічної рівноваги. Методи синергетики, які являють собою ніщо інше як методи нелінійної фізики, дають можливість описати багато процесів, які спостерігаються в системах, зовнішньо не маючи нічого спільного один з одним, з допомогою одних і тих самих математичних моделей, число яких відносно невелике [1-3].

Одним з важливих і найбільш цікавих розділів синергетики є теорія динамічного хаосу. В даний час вивчений цілий клас систем, котрі в деяких областях фазового простору, називаються «дивними аттракторами», проявляють хаотичні властивості.

При аналізі вібросигналів агрегатів різного типу прийнято вважати, що хаотична шумова складова в сигналі є прикрою перешкодою.

Проте випадкові коливання, які виникають в технологічних системах мають детермінований характер [4]. Вони породжуються самою системою і тому можуть слугувати важливим джерелом інформації про її внутрішні характеристики.

Кількісною мірою, яка характеризує стан динамічної системи, може слугувати фрактальна розмірність дивного атрактору. Нижня оцінка цієї величини визначається шляхом вирахування кореляційної розмірності по методиці Паккарда-Такенса [2-3]. Варто відмітити, що процедура Паккарда-Такенса дозволяє ідентифікувати, яким є джерело випадкових сигналів – детермінованим чи шумовим. Якщо діагностується детермінований хаос, то це означає, що система керована, тобто зміною деяких параметрів можна впорядкувати її рух [4].

У будь-якому випадку початковим етапом для дослідження сигналів методами нелінійної динаміки повинна бути процедура реконструкції фазової траєкторії динамічної системи, що породжує сигнал. Єдиним методом, що дозволяє реконструювати характер фазової траєкторії системи на основі аналізу експериментально отриманого сигналу, є процедура вкладення (embedding procedure).

Підставою для такого підходу є теорема Такенса [5], яка стверджує, що шляхом правильного підбору розмірності m і параметра затримки τ можна отримати $(m+1)$- мірний фазовий образ, який досить повно відображає властивості істинної траєкторії динамічної системи у фазовому просторі. Рівняння цієї синтетичної траєкторії може бути записано у вигляді $z_{i+1} = x(t - i\tau)$, де індекс $(i+1)$ номер координати реконструйованого фазового простору $Z = \{z_1, ..., z_{i+1}\}$, а параметр i приймає цілочисельні значення від 0 до m. В експериментальних дослідженнях динаміки дана процедура називається вкладенням кратності m, а проекції одержуваного $(m+1)$ -мірного фазового образу $\{z_1, ..., z_{i+1}\}$ на площину $\{z_j, z_k\}$, де $j <> k$ можуть приймати значення від 1 до $i+1$, картами затримки. Стверджується, що розмірність складних процесів зазвичай знаходиться в межах від $m = 3$ до $m = 6$. Таким чином, розмірність відповідних фазових образів від 4 до 7.

При проведенні процедури вкладення важливим параметром є затримка τ, яка не обов'язково повинна бути рівна інтервалу дискретизації h при цифровому аналізі. Найчастіше її вибирають, виходячи з очікуваного або оціненого, наприклад, за методом авторегресії, періоду однієї з головних мод процесу. В останньому випадку за період приймають часовий інтервал, який відповідає першому перетинанню кривої авторегресії з віссю абсцис.

На практиці форма хвилі вібраційного сигналу є одномірним рядом значення рівня вібрації, отриманим з певною дискретністю, який потім обробляється одним з методів обробки вібросигналу.

На перший погляд здається, що послідовність по єдиній змінній дає досить обмежену інформацію про досліджуваний об'єкт. Проте виявляється, що частотна послідовність однієї змінної містить набагато більшу інформацію – має сліди всіх змінних, що беруть участь в описанні динаміки системи, а також дозволяє безмодельним способом ідентифікувати деякі її ключові особливості.

Нехай, $A_0(t)$ - частотна послідовність експериментально виміряних амплітуд віброшвидкості коливань, які збуджуються корпусом агрегату. Так як попередньо не опираємося ні на яку конкретну модель, то було б бажано відновити цю динаміку виключно на основі відомої послідовності $A_0(t)$. З цією метою розглянемо фазовий простір, утворений змінними $\{A_k\}, k = 0,...,n-1$. Стан досліджуваного об'єкта в цьому просторі відповідає точці, а послідовність станів, які він пройшов визначає деяку криву – фазову траєкторію. З часом в системі встановлюється деякий постійний режим, якщо тільки динаміка системи зводиться до сукупності детерміністичних рівнянь, що описують дисипативні процеси. Це знаходить відображення в збіжності сімейств фазових траєкторій до деякої підмножини фазового простору. Цю інваріантну підмножину прийнято називати аттрактором.

Таким чином, при дослідженні динамічних процесів експлуатації обладнання по будь–якій послідовності експериментальних даних необхідно ідентифікувати аттрактор, якщо він існує. Іншими словами, потрібно встановити, чи можуть властивості об'єкта, що досліджується з допомогою цієї послідовності, розглядатися як прояв детермінованої функції чи в ній міститься деякий неусувний елемент стохастичності.

Якщо буде встановлено, що аттрактор існує, то важливу апріорну інформацію несе його розмірність ν. Розмірність ν дає нам вкрай важливу характеристику динаміки джерела сигналів.

Для визначення підходящого набору змінних, що створюють фазовий простір, зручно розвернути вихідну частотну послідовність $A_0(f)$ в ряд наборів з послідовно зростаючими зсувами, визначеними як величини, кратні деякій фіксованій затримці r - різниці фаз ($r = m\Delta f$, де m – ціле і Δf - інтервал між послідовними вибірками). Тобто, вибираючи з набору експериментальних даних, приходимо до наступного набору дискретних змінних:

$$\begin{aligned} &A_0 : A_0(f_1),..., A_0(f_N); \\ &A_1 : A_0(f_1 + r),..., A_0(f_N + r); \\ &A_{n-1} : A_0(f_1 + (n-1)r),..., A_0(f_N + (n-1)r). \end{aligned} \tag{1}$$

При належному виборі r можна сподіватися, що ці змінні будуть лінійно незалежними, а це єдина вимога, необхідна для визначення фазового простору. Причому, всі ці змінні можна отримати в одній часовій послідовності, яка відноситься до $A_0(f)$, яка визначена експериментально. Дивні атрактори являють собою фрактальні множини, головні властивості яких визначаються розмірнісними характеристиками (розмірність Хаусдорфа, кореляційна розмірність). Найбільш просто визначається кореляційна розмірність ν з допомогою кореляційного інтеграла

$$C(\varepsilon) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^{N} \theta(\varepsilon - \left|\vec{A}_i - \vec{A}_j\right|), \tag{2}$$

де $\theta(z)$ - функція Хевісайда, а саме

$$(z) = \begin{cases} 1, z \geq 0; \\ 0, z < 0. \end{cases}$$

Тут A_i – вектор, що описує положення відповідної точки у фазовому просторі в деякий момент часу $t_i = t_0 + ir(i = 1,..., N)$, де r - деякий заданий проміжок часу, N – об'єм вибірки. Значення $C(\varepsilon)$ визначає відносне число пар точок, відстань між будь–якими двома сусідніми з яких не перевищує ε. При малих ε кореляційний інтеграл $C(\varepsilon) \approx \varepsilon^{\nu}$, тому розмірність ν можна визначити по тангенсу кута нахилу залежності $\ln C$ від $\ln \varepsilon$, отриманої розрахунком $C(\varepsilon)$ за формулою (2) при різних значеннях ε для достатньо великих N. В розглянутому випадку достовірно виміряною є лише одна із координат вектора $A\ (f)$, а саме амплітуда віброшвидкості. В подібних випадках для відновлення розмірно-дивного аттрактору використовують процедуру Паккарда-Такенса.

Нехай A_i – реалізація однієї з координат фазового простору системи $A(f): A_i = A(t_i), i = 1,2,..., N.$ Введемо в розгляд новий фазовий простір (простір вкладення), розмірності m, точки якого визначаються векторами

$$\bar{y}_j^{(m)} = \{A_j, A_{j+1},..., A_{j+m-1}\}, \tag{3}$$

які сконструйовані з послідовних значень величини $A(j = 1,2,..., = N - m + 1)$. При зміні t отримаємо в цьому просторі траєкторію, що відтворює деяку множину, кореляційну розмірність якої ν_m можна вирахувати через кореляційний інтеграл

$$C_m(\varepsilon) = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n^2} \sum_{j,k=1}^{n} \theta(\varepsilon - \left|\vec{y}_j^{\,(m)} - \vec{y}_k^{(m)}\right|), \tag{4}$$

за нахилом залежності $\ln C_m$ від $\ln \varepsilon$. Маючи розмірність вектора y, проаналізуємо залежність ν_m від m. Очевидно, що при малих m розмірність ν із збільшенням m повинна збільшуватися. Проте, якщо випадковий сигнал є проявом детермінованого хаосу, то при деякому m=m_0 величина m перестає зростати. Досягнуте при цьому значення ν_{m0} і приймається за розмірність ν_m дивного аттрактору вихідної системи і називається розмірністю реалізації. Якщо ж ріст ν_m продовжується без насичення, то це свідчить про те, що сигнал, який спостерігається є «білим шумом».

Таким чином, звичайний шумовий випадковий процес можна розглядати як рух системи на аттракторі безкінечної розмірності. Кінцева розмірність ν_m означає, що даний сигнал можна відновити з допомогою динамічної системи.

Список літературних джерел

1. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику / Лоскутов А.Ю , Михайлов А.С. М.: Наука, 1990. – 305с.

2. Шустер Г. Детерминированный хаос / Г. Шустер – М.: Мир, 1990. -312с.

3. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. -367с.

4. Кузев И.Р., Солодовников Д.С. Новый подход к первичному анализу вибрационных сигналов роторных агрегатов с применением теории детерминированного хаоса.//Материалы второго научно-технического семинара «Обеспечение промышленной безопасности производственных обьектов топливно-энергетического комплекса», Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – 238с.

5.Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. - М.: Эдиториал УРСС, 2000. - 336с.