

Рис. 4. Ідентифікація стану підігрівника гарячого водопостачання при переході з низького рівня підігріву теплоносія, що гріє, на середній: 1,2,3 (динамічні характеристики $\Delta t(t)/\Delta t_{уст. расч. низ.}(t)$ при входженні в допуск середнього рівня підігріву; 4—еталонна динамічна характеристика як допуск середнього рівня підігріву $\Delta t_{расч. урв.}(t)/\Delta t_{уст. расч. низ.}(t)$)

Планується подальший розвиток запропонованої концепції діагностики енергетичних систем як у теоретичному плані з використанням синергетичних властивостей енергетичних систем у повній мірі, так і у практичному плані щодо комплексної реалізації управління на основі представленої архітектури експертних систем та у навчальному процесі.

1. Де Гроот С., Мазур П. *Неравновесная термодинамика*. — М., 1964. 2. Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса*. — М., 1986. 3. Чайковская Е.Е. *Синергетическое управление производством и потреблением теплоты на основе информации* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк, 2002. — Вып. 47. — С.183 — 190. 4. Чайковская Е.Е. *Синергетическая концепция диагностики энергетических систем* // Філософські науки. Збірник наукових праць. — Суми, СумДПУ, 2003. — С. 230—236.

УДК 621

Я. Грень

Національного університету “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ВИБОРУ ЛОКАЛЬНО-СТАЦІОНАРНИХ ДІЛЯНОК ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

©Грень Я., 2004

New method of choice of the local stationary sites by signal parameters evaluation simultaneously in time and frequency domains has been presented. This method is assigned for vibration signal processing of rotating machinery for their diagnostics on transient regimes.

Постановка проблеми. Відмови енергетичних та авіаційних обертових машини таких, як турбіни, генератори, живильні насоси, газотурбінні двигуни тощо призводять до важких наслідків. Уникнути відмов дає змогу вчасне виявлення (діагностування) дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Для вібраційного діагностування технічного стану обертового обладнання зручно використовувати неусталені режими роботи — розгін та вибіг. У таких режимах вібраційні сигнали можуть бути представлені моделлю локально-стаціонарного випадкового процесу [1]. За такого пред-

ставлення вібраційний сигнал ділиться на окремі ділянки, де з заданою точністю зберігає ознаки стаціонарності. Питання ергодичності на відповідних ділянках вирішується як і для стаціонарних сигналів.

Відомі методи вибору стаціонарних ділянок в часовій та частотній областях, розроблені раніше [2, 3, 4], хоча і дають змогу виконувати аналіз в реальному часі, але мають ряд недоліків. Переважно ці недоліки пов'язані з розміром вікна аналізу. Вибір ділянок стаціонарності в частотній області, зокрема за допомогою різницевого спектрального [4] аналізу, дає змогу виявляти незначні зміни у сигналі, які можуть бути непомітними в часовій області. Такий вибір вимагає використання великих вікон аналізу, що призводить до низької роздільної здатності в часовій області. Іншим недоліком великого вікна є нестаціонарність сигналу в межах взірцевого інтервалу (перше вікно). Високу роздільну здатність в часі забезпечують невеликі вікна аналізу, однак вони мають низьку роздільну здатність в частотній області. Водночас часто необхідно виявляти "тонкі" зміни в структурі сигналу, а для цього потрібно забезпечити високу роздільну здатність одночасно в часовій і в частотній областях.

Метою цієї роботи є розробка адаптивного алгоритму часово-частотного аналізу нестаціонарних вібраційних сигналів в реальному часі.

Вібраційні сигнали обертових машин. Вібраційні сигнали обертових машин мають низку особливостей, які слід враховувати, розробляючи алгоритми вибору ділянок локальної стаціонарності. Основною ознакою таких сигналів є наявність домінуючої гармоніки, так званої обертової складової, частота якої дорівнює частоті обертання вала машини. Для таких сигналів розмір вікна аналізу повинен бути кратним до періоду обертової складової [4]. У разі зміни частоти обертання повинен відповідно змінюватись і розмір вікна аналізу. Якщо вікно аналізу буде не кратним до періоду обертової складової, то оцінка параметрів сигналу буде неточною.

Окрім обертової складової (основної гармоніки), в спектрі наявні гармоніки, частоти яких кратні до частоти основної гармоніки. Залежно від конструктивних особливостей механізму та наявних дефектів кількість, амплітуда та фаза цих гармонік змінюється у різних режимах роботи. Інколи зміни полягають у незначній зміні фази гармоніки. Такі зміни важко виявити в часовій області. Інколи відбувається незначний перерозподіл потужностей між гармоніками, а це важко помітити в частотній області. Тому аналіз таких сигналів слід виконувати одночасно в часовій та частотній областях.

Вибір локально-стаціонарних ділянок. Для того, щоб забезпечити високу роздільну здатність аналізу нестаціонарних вібраційних сигналів, пропонується вибирати змінні ділянки локальної стаціонарності, користуючись одночасно часовою та частотною областями. Передовсім на початку реалізації за попередніми відомостями про сигнал вибирають розмір вікна аналізу в часовій області. Далі виконують ковзну перевірку стаціонарності сигналу в часовій області за допомогою методу ковзного вікна аналізу [2, 5] (вікно пересувається по реалізації з кожним новим відліком). Якщо довжина стаціонарної ділянки сигналу в часовій області дає змогу отримати спектр з потрібною роздільною здатністю, то ця ділянка вибирається взірцевим інтервалом в частотній області. Далі (після формування вікна аналізу в частотній області) перевірка на стаціонарність здійснюється з кожним новим відліком в обох областях одночасно. Оцінку стаціонарності пропонується виконувати в частотній області на основі порівняння спектрів на взірцевому та поточному інтервалах. Якщо різниця цих спектрів не перевищує задані межі, то вважають, що сигнал зберігає ознаки стаціонарності. Порівняння спектрів виконують з появою кожного нового відліку. В часовій області порівнюють середні значення та дисперсії на взірцевому та поточному інтервалах. Якщо зміна хоча б одного з контрольованих параметрів перевищує допустимі межі, то вважаємо, що стаціонарна ділянка закінчилась в кінці попереднього вікна аналізу. Поточне вікно аналізу стає новим взірцевим інтервалом в часовій області. Алгоритм після формування частотного взірцевого інтервалу має такий вигляд

$$\forall D, \bar{x}, G(f), \Theta \left(\left(\bigwedge_{r=i+1}^k (|\Delta D_r| \leq \varepsilon_D) \wedge (|\Delta \bar{x}_r| \leq \varepsilon_x) \wedge (|\Delta G(f, r)| \leq \varepsilon_G) \right) \right) \vdash$$

$$\vdash \left(\Theta_A \in [(i+1)T_s, (k + N_{win} - 1)T_s] \right) \vee$$

$$\vee \left(\left(\bigvee_{r=i+1}^k (|\Delta D_r| > \varepsilon_D) \vee (|\Delta \bar{x}_r| > \varepsilon_x) \vee (|\Delta G(f, r)| > \varepsilon_G) \right) \right) \vdash$$

$$\vdash \left(\left(\Theta_A \in [(i+1)T_s, (k + N_{win} - N_{sh} - 2)T_s] \right) \wedge \left(\Theta_{ir} \in [kT_s, (k + N_{win} - 1)T_s] \right) \right)$$

де $\Delta D_r = D_r - D_o$, D_r — дисперсія в поточному вікні; D_o — дисперсія на взірцевому інтервалі; $\Delta \bar{x}_r = \bar{x}_r - \bar{x}_o$, \bar{x}_r — середнє значення в поточному вікні; \bar{x}_o — середнє значення на взірцевому інтервалі; $\Delta G(f, r) = G_r(f) - G_o(f)$, $G_r(f)$ — спектр в поточному вікні; $G_o(f)$ — спектр на довірчому інтервалі; Θ — повна реалізація сигналу; $\Theta_A \in \Theta$ — поточний інтервал аналізу; Θ_{ir} — взірцевий інтервал, що складається з N_{win} відліків; $r, k \in [i+1, N - N_{win} + 1]$; N_{sh} — кількість відліків, на яку зсувається вікно аналізу; $N = ENT(\Theta/T_s)$ — повна довжина реалізації; \vdash — знак секвенції; $\varepsilon_D, \varepsilon_x, \varepsilon_G$ — максимальні відхилення дисперсії, середнього значення та спектра, які вибираються на основі апріорних відомостей про сигнал.

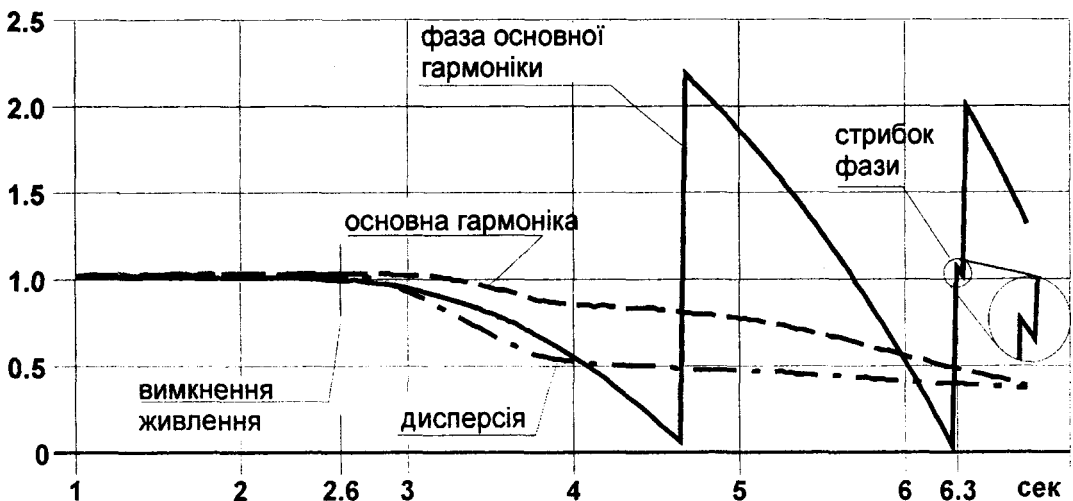
Зсув вікна може бути в межах $1 \leq N_{sh} \leq N_{win}$. Очевидно, найкращу точність забезпечує $N_{sh} = 1$ і при такому зсуві для спектрального оцінювання зручно використовувати метод ковзного ШПФ [6].

Для вибору стаціонарних ділянок використовують різницеві амплітудні та фазові спектри. Зсув вікна аналізу на величину, не кратну до періоду обертової складової, не впливає на обчислення амплітудного спектра але спотворює фазовий. При кожному зсуві вікна аналізу приріст похибки визначення фази $\Delta\alpha$ є сталим, залежить від величини зсуву вікна та періоду обертової складової

$$\Delta\alpha = 180(N_R - 2N_{sh})/N_R$$

де N_R — період обертової складової у відліках.

Приклад застосування алгоритму. Для демонстрації запропонованого методу вибору ділянок локальної стаціонарності розглянемо коливання системи асинхронний двигун-генератор постійного струму. Цей сигнал містить переважаючу основну гармоніку та декілька малопотужних з частотами, кратними до частоти основної. На рисунку подано нормовані відносно оцінки на першому взірцевому інтервалі дисперсія, амплітуда та фаза основної гармоніки.



Статистичні характеристики вібраційного сигналу

На ділянці від 1 до 2,6 с валопровід системи обертається зі сталою частотою і вібраційний сигнал є стаціонарним. В момент 2,6 с живлення вимикається і починається вибіг — сигнал стає нестаціонарним. Найкраще початок вибігу проявився на дисперсії сигналу. Зміни амплітуди основної гармоніки малопомітні, оскільки вона найпотужніша, а незначна зміна енергії сигналу, яка проявляється на дисперсії, відбувається за рахунок великої кількості малопотужних складових. На початку вибігу фаза основної гармоніки також майже не змінюється. Далі крива дисперсії та амплітуди основної гармоніки мають подібну форму і тому практично рівноцінні для розбиття сигналу на стаціонарні ділянки. Фаза коливання плавно змінюється за рахунок зниження частоти обертання вала до моменту 6,3 с, коли відбувається різка зміна. Стрибок фази не проявився достатньо чітко ні в часовій області, ні на амплітудному спектрі і міг бути непомічений без використання фазового спектра.

Наведений приклад свідчить, що, досліджуючи обертові машини, вибір ділянок локальної стаціонарності слід виконувати одночасно в часовій та частотній областях.

Висновки. Запропонований комбінований адаптивний підхід до вибору змінних ділянок локальної стаціонарності дає змогу забезпечити високу точність аналізу нестаціонарного вібраційного сигналу в реальному часі, в часовій і частотній областях.

Вибираючи ділянки локальної стаціонарності вібросигналів обертових машин, слід забезпечити:

- кратність вікна аналізу до періоду обертової складової;
- зсув вікна аналізу на величину, не кратну до періоду основної гармоніки (для поділу лише за часом);
- при зсуві вікна повинна здійснювалась відповідна корекція фазового спектра.

1. Silverman R.A. *Locally stationary random processes* // *Trans. IRE.* — 1957. — Vol. IT—3, #3. — P. 182—196.
2. Погрібний В.О., Собульски А., Рожанківський І.В., Грень Я.В., Джуцимські З. *Адаптивний кореляційний аналіз локально—стаціонарних випадкових процесів* // *Космічна наука та технологія*, Т. 4, № 4, К., 1998. — С. 30—35.
3. Погрибной В.А. *Бортовые системы обработки сигналов.* — К., 1984.
4. Pogribny W., Rozhankivsky I., Gren Ya. *Adaptive Measurement of Non-Stationary Vibrations.* — 2nd International Conference on Measurement, Smolenice, Slovak Republic, April 26—29, 1999. — P. 331—334.
5. Pogribny W., Rozhankivsky I., Gren Ya. *Adaptive Local-Stationarity Research Algorithm Based on the Moving Windows* // *Proceedings of International Conference on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training, Lviv—Slavsko, Ukraine, February 14—19, 2000.* — P. 104—105.
6. Pogribny W. *Sliding FFT Differential Algorithms* // *Proceeding of the 4th International Conference on Quality, Reliability, and Maintenance, Oxford, UK, March 21—22, 2002.* — P. 77—80.