

Є.О. ЗАЙЦЕВ

Інститут електродинаміки НАН України

В.І. СІНИЦЯ, М.В. ЛІСОГОР

Національний технічний університет України «КПІ»

В.Є. СИДОРЧУК

Київський національний торговельно-економічний Університет

ЗАСТОСУВАННЯ АВТОРЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ В ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ

В статті розглянута лазерна система моніторингу вібро сигналів дифузійно-відбиваючих енергетичних об'єктів. В розглянутій системі запропоновано та експериментально досліджено використання методів авторегресійного аналізу на основі метода найменших квадратів. На основі експериментальних досліджень показано перспективність використання коваріаційного методу авторегресійного аналізу при побудові підпрограми оцінювання спектральних складових діагностичного сигналу, що входить до програмно-математичного забезпечення системи моніторингу.

Ключеві слова: коваріаційний метод, лазер, моніторинг, вібродіагностика, імітаційне моделювання, LabVIEW

E.A. ZAITSEV

Institute of Electrodynamics of NASU

V.I. Sinita, M.V. Lisohor

National Technical University of Ukraine "KPI"

V.E. Sydorчук

Kyiv national university of trade and economics

APPLICATION AUTOREGRESSION ANALYSIS BASED ON THE METHOD OF LEAST SQUARES IN LASER MONITORING SYSTEM

In the papers deals with laser system for monitoring vibration signals reflecting diffusion-energy facilities object. In the considered system proposed and experimentally investigated using autoregressive methods of analysis based on the ordinary least squares method. Experimental studies have shown perspective using autoregressive covariance analysis method in evaluation subprogramme of diagnostic spectral components of test vibration signal. Realized subprogramme can be using in software of monitoring system.

Keywords: Covariance method, laser monitoring, vibration diagnostics, simulation, LabVIEW

Вступ

Моніторинг є одним із методів контролю та діагностування стану енергетичних об'єктів. Як відомо із [1,2] вібрації є одними із найбільш динамічних параметрів об'єкту, що характеризують його стан. Зміна параметрів вібрацій найчастіше проходить синхронно зі зміною внутрішнього стану об'єкту та динамічних сил, що діють на контрольований об'єкт або виникають в ньому. Тому моніторинг енергетичних об'єктів дозволяє проводити прогнозування його реального ресурсу роботи під час роботи без виведення обладнання з робочого режиму. Крім того, механічний зв'язок сенсору моніторингової системи з енергетичним об'єктом, що контролюється не завжди є допустимим або можливим із-за технологічних особливостей. Тому в останні роки основна увага приділяється розробці безконтактних методів вимірювання параметрів вібрації, перевагою яких є відсутність механічного зв'язку на досліджуваній об'єкт. Серед останніх, поширення набули струмовихрові та оптичні методи. Принцип дії останніх вимірювачів найчастіше засновано на використанні ефекту Доплера [3]. Оптичні вимірювачі дозволяють вимірювати амплітуди і фази гармонічних вібрацій, але з їх допомогою неможливо досліджувати негармонійні та великі по амплітуді вібрації. Також до їх недоліків можна віднести досить дорогу і складну оптичну частину; жорсткі вимоги до просторової та часової когерентності лазерного джерела випромінювання; високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкта [4].

Цих недоліків позбавлені лазерні вимірювальні системи фазового типу (далі ЛВСФТ). Принцип роботи яких заснований на високочастотній модуляції інтенсивності лазерного випромінювання з наступним вимірюванням фазового зсуву між огинаючою прийнятого випромінювання та опорного сигналу. Модуляція фазового зсуву в цьому випадку прямо пропорційна вібраціям досліджуваної поверхні. Основною перевагою таких приладів, на відміну від наведених вище, є наступне: відстань до вимірюваної поверхні може досягати десятка метрів; вимірювання проводяться від дифузійно-відбиваючих об'єктів (закон Ламберта); відсутній контакт з поверхнею, що важливо при наявності агресивних середовищ [4].

З розвитком напівпровідникових гетероструктур з'явилась можливість створення компактних, точних й швидкодіючих моніторингових систем на основі ЛВСФТ [1, 5]. Такі системи є ефективним засобом для вирішення задач, що виникають при діагностуванні й контролі вібрацій енергетичних обертових та не обертових об'єктів. Таке поєднання забезпечує створення складних апаратно-програмних комплексів, здатних вирішувати діагностичні задачі, що виникають під час експлуатації енергетичного обладнання (гідро-, дизель- та електрогенераторів) [2]. При цьому в [6] запропоновано для побудови експертної системи контролю вібро процесів використовувати програмне забезпечення (ПЗ) на основі

швидкого перетворення Фур'є (далі ШПФ). Застосування ШПФ має ряд недоліків, які призводять до появи похибок та неточностей при діагностиці [4]. Такими недоліками є: "розтікання" спектру, збагачення спектру сигналу за рахунок обмеження вибірки досліджуваного сигналу в часі, потреба в використанні спектральних вікон, неоднорідності вібросигналів у часі [6] і т. п.

При врахуванні наведених факторів ПЗ вимірювачів, розглянутих в [7], для аналізу вібросигналів виявляється недостатньо інформативним і тому в багатьох випадках не ефективним для діагностики і прогнозування технічного стану енергетичного об'єкту. У зв'язку з чим для дослідження вібросигналів широкого застосування набули авто регресійні (АР) алгоритми параметричного спектрального аналізу [8]. Використання параметричних моделей для побудови ПЗ лазерних систем моніторингу дозволяє отримати більш достовірні результати контролю і аналізу діагностування вібрацій об'єктів завдяки спектральним оцінкам з більш високою потенційною точністю та роздільною здатністю, порівняно з класичними методами спектрального аналізу, особливо при роботі з вибірками малого обсягу [9] та при аналізі нестационарних періодичних стохастичних вібросигналів [10].

Найбільше поширення при обробці вібросигналів енергетичних об'єктів отримав підхід, заснований на побудові лінійних стаціонарних АР моделей [11, 12, 13]. Робота ПЗ на основі параметричних методів АР аналізу складається з трьох етапів. На першому з них проводиться вибір параметричної моделі часового ряду, відповідний наявного запису виміряних даних. На другому етапі обчислюються оцінки параметрів моделі. На третьому етапі оцінені значення параметрів вводяться в теоретичний вираз для спектральної щільності потужності (СЦП), що відповідає обраній моделі [14].

Предметом дослідження є застосування алгоритмів АР спектрального аналізу, що засновані на методі найменших квадратів (коваріаційний та модифікований коваріаційний) в лазерних системах моніторингу стану енергетичних об'єктів

Метою дослідження, що проводиться в роботі є дослідження можливостей і структури алгоритмів авто регресійного аналізу на основі метода найменших квадратів (МНК) при модифікації програмно-математичного забезпечення моніторингових систем на базі ЛВСФТ.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються задачі пов'язані з побудовою ПЗ на основі імітаційного моделювання алгоритмі АР спектрального аналізу, що засновані на МНК та їх експериментальне порівняння з методами, що використані в лазерній моніторинговій системі [1].

Новизна та актуальність робіт, що проводяться в дослідженні полягає в розробці ПЗ для спектрального оцінювання АР-процесу, що відрізняються від існуючих тим, що дозволяють візуально відображати детальну інформацію про вібростан об'єкт в режимі реального часу та проводити діагностику стану об'єкту на основі динаміки зміни його вібростану.

Теоретичні дослідження

При практичній реалізації ПЗ, що призначено для обробки вихідного сигналу оптичної частини лазерної моніторингової системи найбільшого застосування знайшли методи засновані на швидкому перетворенні Фур'є [4]. Такий підхід до визначення спектру досліджуваного сигналу потребує виконання багатьох операцій і його використання є доцільним при дослідженні низькочастотних вібраційних процесів (20Гц-500Гц). В інших випадках є доцільним використання АР-методів для побудови моніторингових систем вібраційних процесів.

Одним із найбільш поширеніших методів АР аналізу, що базується на використанні МНК є коваріаційний метод (геометричний алгоритм). Алгоритми роботи цього методу засновані на оцінках лінійного передбачення, які використовуються в якості оцінок АР – параметрів. В цьому випадку оцінка лінійного передбачення вперед по порядку p для відліку $x[n]$ може бути записана наступним чином:

$$\hat{x}^f[n] = -\sum_{k=1}^p a_p^f[k]x[n-k], \quad (1)$$

В цьому випадку помилка лінійного передбачення вперед:

$$e_p^f[n] = x[n] - \hat{x}^f[n] = x[n] + \sum_{k=1}^p a_p^f[k]x[n-k]. \quad (2)$$

Співвідношення між помилками лінійного передбачення вперед і коефіцієнтами лінійного передбачення для коваріаційного методу можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} e_p^f[p+1] \\ \vdots \\ e_p^f[N-p] \\ \vdots \\ e_p^f[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[p+1] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-p] & \cdots & x[p+1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N] & \cdots & x[N-p] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ a^f[1] \\ \vdots \\ a^f[p] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тоді нормальні рівняння, що мінімізують середній квадрат помилки, можуть бути знайдені як:

$$\sigma_p^{f^2} = \sum_{n=p+1}^N |e_p^f[n]|^2, \quad (4)$$

для порядку p , мають вигляд:

$$R_p \begin{pmatrix} 1 \\ a_p^f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\sigma_p^{f^2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Елементи ермітової $(p+1) \times (p+1)$ матриці X_p , мають вигляд кореляційних форм, знаходяться за формулою:

$$r_p[i, j] = \sum_{n=p+1}^N x^*[n-i]x[n-j], \quad (6)$$

де $0 \leq i, j \leq p$.

Елементи матриці X_p в коваріаційному методі не можуть бути записані як функції різниці $(i-j)$, а це означає, що X_p не є теплицевою матрицею [15]. Однак той факт, що матриця є добутком теплицевих матриць, забезпечує можливість побудови швидкого алгоритму, аналогічного алгоритму Левінсона.

Розрахунок коефіцієнтів відображення фільтру $a[k]$ відбувається за формулою:

$$r_{xx}[m] = -\sum_{k=1}^p a[k]r_{xx}[m-k], \quad (7)$$

де $0 \leq m \leq p$; p – порядок моделі, який можна розрахувати за допомогою критерію Акаїке [16].

Розрахунок спектральної щільності потужності (СЩП) АР - моделі, згідно спектральному параметричному методу Юла-Уолкера здійснюється за формулою:

$$P_{AP}(f) = \frac{\sigma^2 T}{|A(f)|^2} = \frac{\sigma^2 T}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a[k] \cdot e^{-j2\pi k f T} \right|^2}, \quad (8)$$

де $|A(f)|^2$ – амплітудно-частотна характеристика фільтру; T – час спостереження.

Таким чином, коваріаційний метод полягає в мінімізації одночасно по всіх коефіцієнтах лінійного передбачення за допомогою метода найменших квадратів. Така мінімізація дозволяє приборати обмеження, яке накладається рекурсією Левінсона. В свою чергу підхід заснований на використанні АР-моделі на основі коваріаційного метода дозволяє покращити характеристики спектральної оцінки [6, 14].

Іншим методом АР-аналізу, що базується на використанні МНК - є модифікований коваріаційний метод. Алгоритм роботи методу використовує спільні мінімізації квадратичних помилок прямого і зворотного лінійного передбачення.

Нормальні рівняння в даному випадку мають наступний вигляд [15]:

$$\sum_{k=1}^p [r_x(l, k) + r_x(p-k, p-l)] a_p(k) = -[r_x(1, 0) + r_x(p, p-1)], \quad (9)$$

$$R_p \begin{pmatrix} 1 \\ a_p^f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\sigma_p^{f^2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Розрахунок елементів матриці нормальних рівнянь R_p здійснюється за формулою:

$$r_p[i, j] = \sum_{n=p+1}^N (x^*[n-i]x[n-j] + x[n-p+i]x^*[n-p+j]). \quad (11)$$

Модифікований коваріаційний метод об'єднує помилки лінійного передбачення вперед та назад для отримання більшої кількості точок, в яких визначаються помилки. Помилка в даному методі обчислюється за допомогою формули:

$$\sigma^2 = r_x(0, 0) + r_x(p, p) + \sum_{k=1}^p a_p [r_x(0, k) + r_x(p, p-k)]. \quad (12)$$

Розрахунок коефіцієнтів відображення фільтру a та розрахунок СЩП АР - моделі, згідно модифікованого коваріаційного метода відбувається за формулами (5) та (6) відповідно.

Отже, модифікований коваріаційний метод об'єднує помилки лінійного передбачення вперед та назад для отримання більшої кількості точок, в яких визначаються помилки, на відміну від коваріаційного. Також модифікований коваріаційний метод забезпечує визначення статистично більш стійких оцінок з потенційно високою роздільною здатністю. Разом з тим модифікований коваріаційний метод не гарантує динамічну стійкість фільтру лінійного передбачення в порівнянні з коваріаційним. При практичній реалізації моніторингових систем з використанням описаних АР-методів наведенні вище моменти досліджуються за допомогою імітаційного моделювання [16].

Експериментальні дослідження

При експериментальних дослідженнях створеного ПЗ моніторингової системи, була використана

структурна схема зображена рис.1, яка складається з лазерного сенсора, пристрою збору даних, порту вводу-виводу та персонального комп'ютера (ПК). В якості лазерного сенсора використано оптичний приймально-передавальний пристрій, що складається з напівпровідникового лазерного випромінювача (ПЛВ) та відповідного до лазера лавинного фотоприймача (ФП), блоку змішувачів та керованого блоку синтезаторів частоти (БСЧ), який призначений для генерування частоти модуляції ПЛВ та формування сигналу опорної напруги. Для забезпечення роботи системи були розроблені та використані спеціальні програмно-математичні засоби, що включають: інтерфейс користувача, модуль керування та модуль обробки даних. Модулі програмно-математичних засобів призначені для забезпечення взаємодії пристрою збору даних, елементів лазерного сенсора, ПК, організації інформаційних потоків в системі, реалізації алгоритмів обробки даних в процесі моніторингу об'єкту, відображення отриманих результатів та елементів керування.

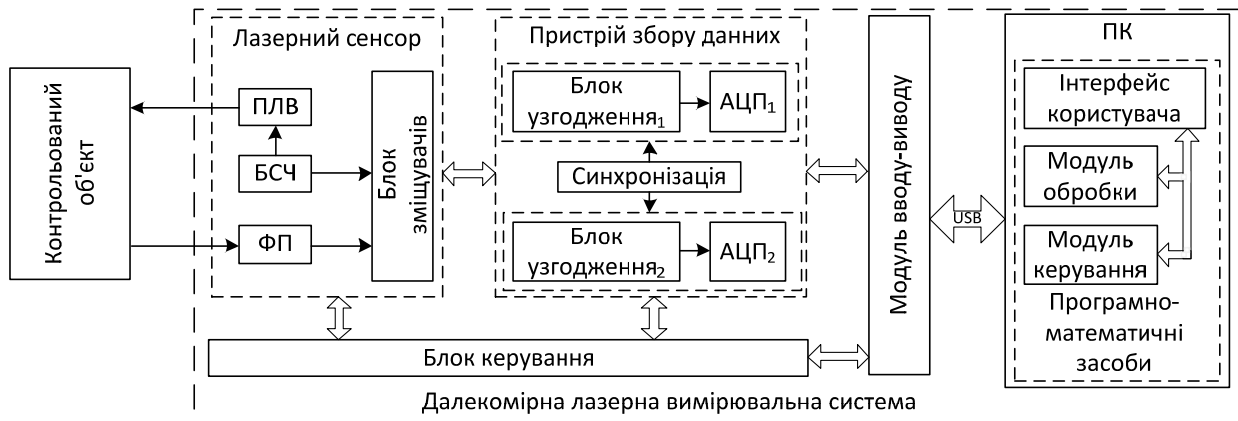


Рис. 1.

В якості інструментарію для побудови ПЗ моніторингової системи на базі ЛВСФТ, а також імітаційного моделювання роботи системи в процесі розробки ПЗ використовується графічне програмне середовище LabView, що дозволяє:

- створювати віртуальні прилади (симулятори), що дозволяють моделювати роботу приладу в залежності від діагностичних ознак об'єкту;
- проводити моделювання, імітацію та аналіз динамічних систем з метою дослідження працездатності систем і вдосконалення проєктів ПЗ на стадії, як розробки так і впровадження завдяки можливості модернізації бібліотечних блоків;
- створювати свої власні бібліотеки, а також поповнювати бібліотеки блоками розробленими при використанні поширених текстових мов програмування.

Практична перевірка розробленого ПЗ, що виконано у вигляді віртуальних приладів на мові програмування LabView для системи моніторингу проводилася при оцінюванні частот вібраційних процесів досліджуваного об'єкту з використання динаміка 25ГДН-1-4 під'єданого до генератора сигналів звукового діапазону ГЗ-118. На рис. 2. представлено осцилограму

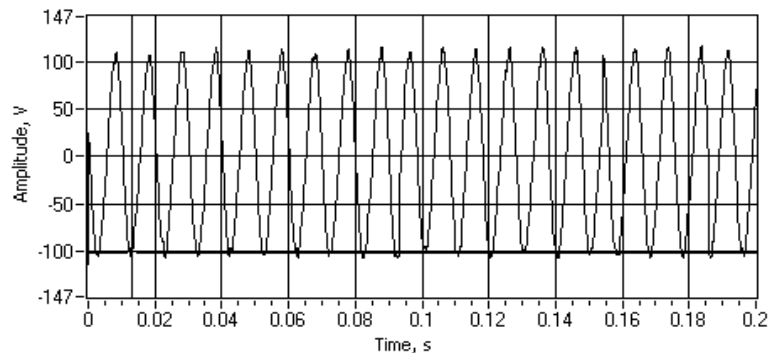


Рис. 2.

отриману за допомогою лазерної системи моніторингу для тестового сигналу з частотою 105 Гц. На рис.3. приведені результати обробки вихідного сигналу за допомогою розробленого ПЗ на основі: алгоритму ШПФ (рис.3,а), коваріаційного алгоритму (рис.3,б) та модифікованого коваріаційного алгоритму (рис.3,в).

В результаті проведених досліджень отриманих спектральних оцінок, а також раніше проведених досліджень в [1,5] встановлено, що при використанні в якості методу оцінювання алгоритму ШПФ маємо ярко виражені бокові спектральні складові інформаційного сигналу системи моніторингу, що обумовлені мережевими та іншими завадами. Останні можуть маскувати та вносити зміщення с основні спектральні складові оцінюваного діагностичного сигналу. У випадку застосування АР-методів для оцінювання спектру діагностичного сигналу, у порівнянні з класичним ШПФ, дозволило зменшити спектральні складові, відмінні від центральних та виділити явно виражену мережеву заваду (друга гармоніка з частотою 100Гц). При використанні коваріаційного методу алгоритм якого базується на методі найменших квадратів(рис.3,б) отримано "гострі" і розділені спектральні складові тестового сигналу й мережевої завади, відсутність ефекту зміщення спектральних складових діагностичного сигналу, а також в цьому випадку додаткові спектральні складові мають дуже незначну амплітуду в порівнянні з іншими розглянутими АР-методами [1,5]. В результаті досліджень АР-методів також з'ясовано, що спектр сигналу отриманий на основі АР-методів має

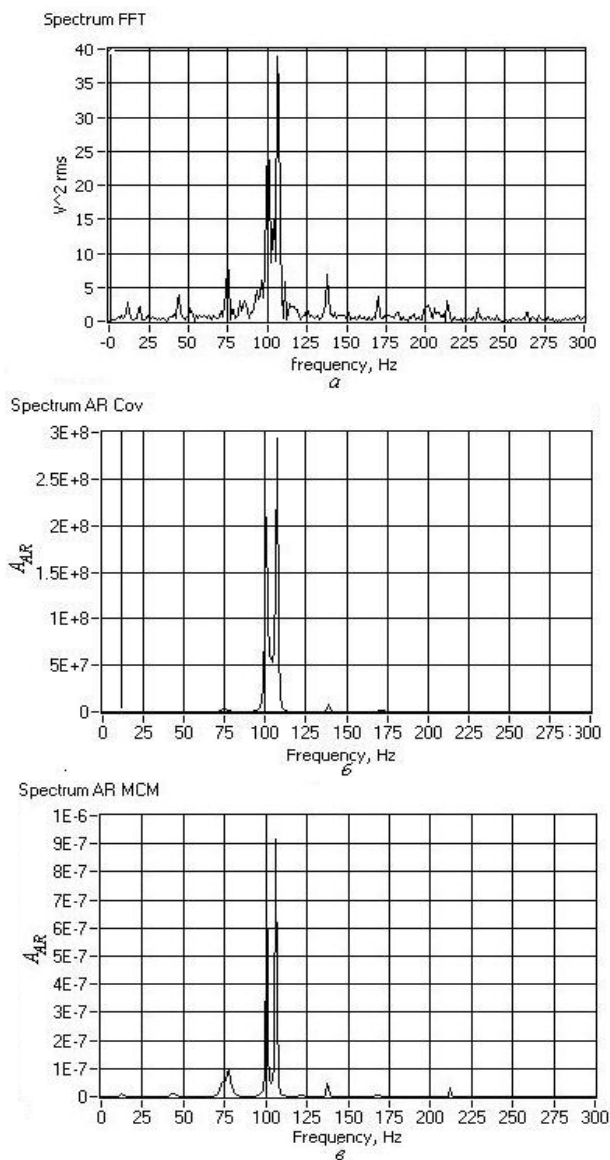


Рис. 3.

псевдо-амплітудне значення та при практичному використанні потребує введення коефіцієнту корекції.

Оцінка тестових вібросигналів поверхні гучномовця свідчить про те, що спектри тестових сигналів оброблені за допомогою АР-аналізу мають явно виражені піки амплітуд, та не мають виражених шумових складових сигналу, тобто дозволяють зменшити додаткові спектральні складові, відмінні від основних гармонік досліджуваного інформаційного сигналу.

В результаті експериментальних досліджень розробленого програмного забезпечення для оцінювання спектральних складових діагностичних сигналів на основі АР-методів та аналізу отриманих результатів встановлено, що доцільно застосовувати в складі програмного забезпечення лазерних системах діагностики розробленого модулю на основі коваріаційного методу.

Висновок

Результати імітаційного моделювання роботи системи ЛВСФТ та експериментальні дослідження на основі запропонованого діагностичного ПЗ свідчать, що при розробці ПЗ ЛВСФТ дифузійно-відбиваючих поверхонь енергетичного обладнання, доцільним і перспективним є використання коваріаційного методу при побудові діагностичного ПЗ оцінювання спектральних складових. Також застосування АР-методів дозволяє зменшити вплив шумів на досліджувані спектральні складові у порівнянні з найбільш використовуваним алгоритмом на основі ШПФ.

Література

1. Брагинец І.О., Зайцев Є.О., Лісогор М.В., Синиця В.І. Застосування імітаційного моделювання авторегресійних методів спектрального аналізу для вирішення задач вібродіагностики//Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. - №37. – с. 124- 132.
2. Борисенко А. Н. Теория и практика компьютеризированных информационно-измерительных систем для управления и диагностики дизель-генераторов//Рукопись. Диссертация. – Институт электродинамики НАН Украины, – Киев. – 2010.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 848 с.
4. Брагинец И. А., Зайцев Е.А. Помехоустойчивость фазовых лазерных датчиков вибраций//Технічна електродинаміка. – 2010. - №3. – с. 67-73.
5. Зайцев Є.О., Лісогор М.В. Застосування метода Берга для аналізу вібросигналів отриманих за допомогою лазерних сенсорів //Електроніка і зв'язь: науко-технічний журнал. – 2014. – Т. 19, № 6(83). – С. 66–72.
6. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения // Пер.с англ. – М.: Мир. – 1990. – 584 с.
7. Брагинец И. А., Зайцев Е. А. Лазерные фазовые датчики вибраций и перемещений в диапазоне частот от 15 до 1000 //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск, частина 2. – 2010. – с. 186-191.
8. Mulgrew B., Grant P., Thompson J. Digital signal processing: concepts and applications // Macmillan press Ltd – 1999 – 456 p.
9. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов // Прикладная математика. – М.: Мир. – 1978. – 848 с.

10. Зварич В. Н., Марченко Б. Г. Линейные процессы авторегрессии с периодическими структурами как модели информационных сигналов // Известия Вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54. – № 7. – с. 25 - 30.
11. Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M. White noise in information signal models // Applied Mathematics Letters. – 1994. – Vol. 7. – № 3. – P. 93-95.
12. Зварич В. Н., Марченко Б. Г. Линейные процессы авторегрессии в задачах вибродиагностики узлов электрических машин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – №1. – с. 45-54.
13. Марченко Б. Г., Мыслович М. В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – Киев: Наукова думка, 1992. – 196 с
14. Кей С. М., Марпл С. Л. Современные методы спектрального анализа// ТИИЭР. – 1981. – т.69. – №11. – С. 5-51.
15. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов // Монография: пер. с англ. под ред. Ю. К. Беляева – М.: Мир. – 1976. – 757 с.
16. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем //Искусство и наука: Пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М.: Мир. – 1978. – 418 с.

Reference

1. Braginec I.O., Zaitsev E.O., Lisogor M.V., Sinica V.I. Zastosuvannya imitacijnoho modelyuvannya avtoregresijnix metodiv spektralnogo analizu dlya virishennya zadach vibrodiagnostiki//Praci Institutu elektrodinamiki NAN Ukraini. – 2013. - №37. – s. 124- 132.
2. Borisenko A. N. Teoriya i praktika kompyuterizirovannyx informacionno-izmeritelnyx sistem dlya upravleniya i diagnostiki dizel-generatorov//Rukopis. Dissertaciya. – Institut elektro-dinamiki NAN Ukrainy, – Kiev. – 2010.
3. Landsberg G.S. Optika. Ucheb. posobie: Dlya vuzov. – 6-e izd., stereot. – М.: FIZMATLIT. – 2003. – 848 s.
4. Braginec I. A., Zaitsev E.A. Pomexoustojchivost fazovyx lazernyx datchikov vibracij// Tex-nichna elektrodinamika. – 2010. - №3. – s. 67-73.
5. Zaitsev С.О., Lisogor M.V. Zastosuvannya metoda Berga dlya analizu vibrosignaliv otrimanix za dopomogoyu lazernix sensoriv //Elektronika i svyaz: nauchno-technicheskij zhurnal. – 2014. – Т. 19, № 6(83). – S. 66–72.
6. Marpl S. L. Cifrovoj spektralnyj analiz i ego prilozheniya // Per.s angl. – М.: Mir. – 1990. – 584 s.
7. Braginec I. A., Zaitsev E. A. Lazernye fazovye datchiki vibracij i peremeshhenij v diapazone chastot ot 15 do 1000 //Texnichna elektrodinamika. Tematichnij vipusk, chastina 2. – 2010. – s. 186-191.
8. Mulgrew B., Grant P., Thompson J. Digital signal processing: concepts and applications // Macmillan press Ltd – 1999 – 456 p.
9. Rabiner L., Gould B. Teoriya i primenenie cifrovoj obrabotki signalov // Prikladnaya mate-matika. – М.: Mir. – 1978. – 848 s.
10. Zvarich V. N., Marchenko B. G. Linejnye processy avtoregressii s periodichesкими struktu-rami kak modeli informacionnyx signalov // Izvestiya Vuzov. Radioelektronika. – 2011. – Т. 54. – № 7. – s. 25 -30.
11. Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M. White noise in information signal models // Applied Mathematics Letters. – 1994. – Vol. 7. – № 3. – P. 93-95.
12. Zvarich V. N., Marchenko B. G. Linejnye processy avtoregressii v zadachax vibrodiagnostiki uzlov elektricheskix mashin // Texnicheskaya diagnostika i nerazrushayushhij kontrol. – 1996. – №1. – s. 45-54.
13. Marchenko B. G., Myslovich M. V. Vibrodiagnostika podshpnikovyx uzlov elektricheskix mashin. – Kiev: Naukova dumka, 1992. – 196 s
14. Kej S.M., Marpl S.L. Sovremennye metody spektralnogo analiza// TIIEP. – 1981. – т.69. – №11. – S. 5-51.
15. Anderson T. Statisticheskij analiz vremennyx ryadov // Monografiya: per. s angl. pod red. Yu. K. Belyaeva – М.: Mir. – 1976. – 757 s.
16. Shannon R. Imitacionnoe modelirovanie sistem //Iskusstvo i nauka: Per. s angl. pod red. E. K. Maslovskogo. – М.: Mir. – 1978. – 418 s.

Рецензія/Peer review : 27.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 20.6.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією