

ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АВТОРЕГРЕСІЙНИХ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ВІБРОДІАГНОСТИКИ

Є.О. Зайцев¹, канд. техн. наук, І.О. Брагинець², канд. техн. наук, В.І. Синиця³, канд. техн. наук, М.В. Лісогор⁴

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: zaitsev@i.ua

3, 4 – Національний технічний університет України «КПІ»,
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна

Досліджено можливість застосування авторегресійних методів оцінювання спектральної щільності потужності вібросигналів на основі імітаційного моделювання та розробки віртуального спектроаналізатора для задач вібродіагностики з подальшим застосуванням для вирішення завдань ідентифікації несправностей обладнання. Розроблено імітаційні моделі у вигляді приладів на основі параметричних методів оцінювання спектральної щільності потужності. Проведено порівняльний аналіз результатів спектрального аналізу з результатами класичного алгоритму дискретного перетворення Фур'є на базі реальних даних, отриманих при дослідженні фазових лазерних датчиків вібрації. Проведено експериментальні дослідження із застосуванням розроблених віртуальних приладів для оцінки спектральної щільності потужності реальних вібросигналів. Бібл. 7, рис. 5.
Ключові слова: спектральна щільність потужності, авторегресійна модель, параметричний спектральний аналіз, алгоритм Юла-Уолкера, алгоритм Берга, вібродіагностика, вібровимірювання, імітаційна модель, віртуальний спектроаналізатор.

Вступ. Робота складних механізмів і машин у промисловості, на транспорті, у повсякденному житті нерозривно пов'язана з ефектом вібрацій, інтенсивність і характер яких проявляються по-різному залежно від технічного стану обладнання. Тому, аналізуючи вібрації за допомогою різних методів, можна без виведення обладнання з робочого режиму отримати досить повну і достовірну інформацію про його поточний стан і несправності, що починають зароджуватися в ньому. Проводячи періодично такий аналіз, можна, виходячи з динаміки змін вібрацій у часі, спрогнозувати залишковий робочий ресурс задовго до виходу обладнання з ладу.

Існуюча концепція вібродіагностики машинного обладнання передбачає вирішення двох взаємопов'язаних завдань: оцінки поточного технічного стану за результатами вимірювань спектрального складу вібросигналу контрольованого обладнання та прогнозування його залишкового робочого ресурсу за даними послідовних вібровимірювань. При цьому в ролі експертної системи застосовується комп'ютерна програма, основу якої, як правило, становить модуль перетворення Фур'є.

До числа найбільш перспективних напрямків досліджень в області вібродіагностики можна віднести теоретико-інформаційний підхід, відповідно до якого при аналізі вібросигналів застосовується авторегресійна модель (АР-модель) процесу вібрацій. Завдяки АР-моделі з'являється можливість раннього виявлення слабких несправностей, що зароджуються [1, 5]. Використання параметричних моделей дає змогу одержати більш точні, з більш високою роздільною здатністю спектральні оцінки, ніж це можливо за допомогою класичних методів спектрального аналізу, особливо при роботі з вибірками малого обсягу.

Найбільшого поширення набув підхід, заснований на побудові лінійних стаціонарних моделей. Відповідно до цього підходу аналізований процес розглядається як процес на виході лінійної системи, на вхід якої надходить білий шум. Оскільки білий шум має рівномірну спектральну щільність, то, пропускаючи його через лінійну систему нескінченної розмірності, можна отримати спектральну щільність потужності будь-якої форми. Тому лінійна модель придатна для апроксимації багатьох детермінованих і випадкових процесів з дискретним ча-

сом, що зустрічаються на практиці. Спектральна характеристика лінійних моделей повністю визначається параметрами моделі й дисперсією білого шуму [3].

Наукові дослідження, пов'язані з експериментом, можуть безпосередньо проводитися на об'єкті або його моделі. Останнім часом поряд з експериментами на фізичних моделях все більшого поширення набувають математичні моделі, які дають змогу отримувати відомості про об'єкт, досліджуючи його модель. Такі експериментальні дослідження отримали назву експериментальні дослідження імітаційних моделей.

Предметом дослідження є АР-алгоритми спектрального аналізу на основі методів Юла-Уолкера і Берга, реалізовані за допомогою імітаційного моделювання.

Метою імітаційного моделювання є дослідження можливостей і структури АР-методів з метою вирішення проблеми використання АР-алгоритмів для оцінки спектральної щільності потужності (СЩП) у задачах вібродіагностики.

Задачі, вирішення яких дасть змогу досягнути зазначеної мети, наступні:

- розробити імітаційні АР-моделі Юла-Уолкера і Берга;
- провести експериментальні дослідження з використанням розроблених моделей.

Теоретичні дослідження. Як інструментарій імітаційного моделювання вибрано програмне середовище LabView – мова графічного програмування, призначена для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем, яка дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати створені імітаційні моделі. Результати імітаційного моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків, таблиць або збережені у вигляді файлів.

Імітаційна модель АР-методу Юла-Уолкера [6] реалізована за допомогою графічного програмування і використовує оцінювання АР-параметрів послідовності для оцінок автокореляційної функції. Нормальні рівняння Юла-Уолкера для АР-процесу мають вигляд

$$\begin{bmatrix} r_{xx}[0] & r_{xx}[-1] & \dots & r_{xx}[-p] \\ r_{xx}[1] & r_{xx}[0] & \dots & r_{xx}[-p+1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}[p] & r_{xx}[p-1] & \dots & r_{xx}[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a[1] \\ \vdots \\ a[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де r_{xx} – коефіцієнти кореляційної матриці; a – коефіцієнти відображення фільтра; σ^2 – квадрат помилки передбачення; p – порядок моделі.

Розрахунок коефіцієнтів кореляційної матриці відбувається за формулою

$$r_{xx}[i, j] = \sum_{n=1}^{N+p} x^*[n-i]x[n-j], \quad (2)$$

де $x[n]$ – вхідна послідовність; N – кількість відліків вхідної послідовності; i, j, p, n – цілі числа.

Алгоритм роботи імітаційної моделі, реалізованої на основі АР-методу Берга [7], наступний: при кожному значенні порядку моделі мінімізується середня арифметична дисперсія похибки передбачення:

$$\sigma_p^{2fb} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=p+1}^N |e_p^f[n]|^2 + \frac{1}{N} \sum_{n=p+1}^N |e_p^b[n]|^2 \right], \quad (3)$$

де e_p^f – помилка лінійного передбачення вперед; e_p^b – помилка лінійного передбачення назад.

Розрахунок коефіцієнтів кореляційної матриці АР-методу Берга відбувається за формулою

$$r_{xx}[i, j] = \sum_{n=1}^{N-p} (x^*[n+p-i]x[n+p-j] + x^*[n+j]x[n+i]). \quad (4)$$

Розроблені імітаційні моделі входять до складу імітаційних приладів, що використовуються для проведення спектрального аналізу із застосуванням цифрових алгоритмів та складаються з блок-схеми та інтерактивного інтерфейсу оператора. Блок-схему розробленого віртуального приладу зображено на рис. 1.



Рис. 1

Експериментальні дослідження. При наявності вібрацій контрольованого об'єкта у вихідному синусоїдальному сигналі фазового лазерного датчика вібрацій виникають модуляції фазового зсуву, параметри якої пропорційні параметрам контрольованих вібрацій (амплітуді й частоті). Застосовуючи швидке перетворення Фур'є, знаходимо спектр сигналу, який розділяємо на дві складові – спектр інформативного та спектр шумового сигналів. Шумова складова визначається за відсутності вібрацій та розкладається, в свою чергу, на спектральну складову «білого шуму» та спектральну складову квазігармонічних завад, що виникають у приладі під дією мережевих наведень, індустриальних завад і т.п. [2]. Такий підхід до визначення спектра досліджуваного сигналу потребує виконання багатьох операцій, а його використання є доцільним при дослідженні низькочастотних вібраційних процесів (20...500 Гц). У інших випадках для оцінки вібраційних процесів доцільним є використання АР-методів.

Аналіз АР-моделей при оцінюванні частот вібраційних процесів досліджуваного об'єкта проводився на основі побудованих імітаційних моделей.

На рис. 2 показано осцилограму, яку було отримано за допомогою фазового лазерного датчика вібрацій для тестового сигналу частотою 100 Гц. Як джерело тестового сигналу застосовувався динамік 25ГДН-1-4, підключений до генератора сигналів звукового діапазону ГЗ-118.

На рис. 3 представлено результати обробки вихідного сигналу за допомогою розроблених програм на основі імітаційних моделей із застосуванням алгоритмів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) (рис. 3 а), Юла-Уолкера (рис. 3 б) та Берга (рис. 3 в). Використання АР-методів для оцінювання спектра досліджуваного сигналу у порівнянні з класичним швидким перетворенням Фур'є (ШПФ) дало змогу зменшити спектральні складові, відмінні від центральних.

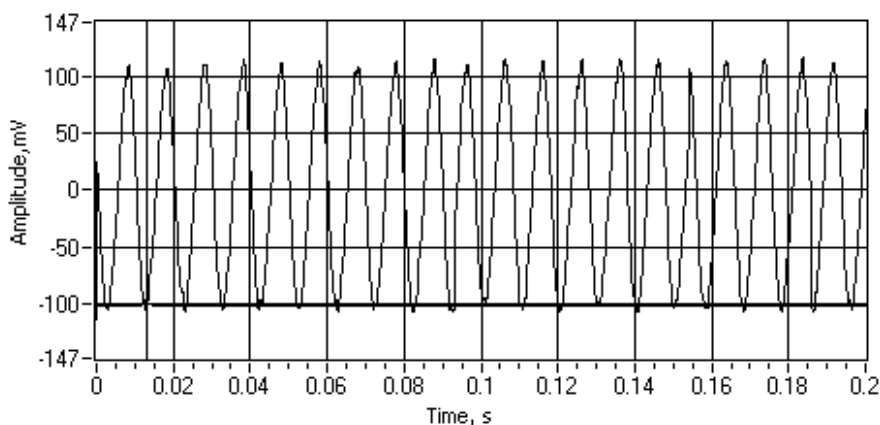


Рис. 2

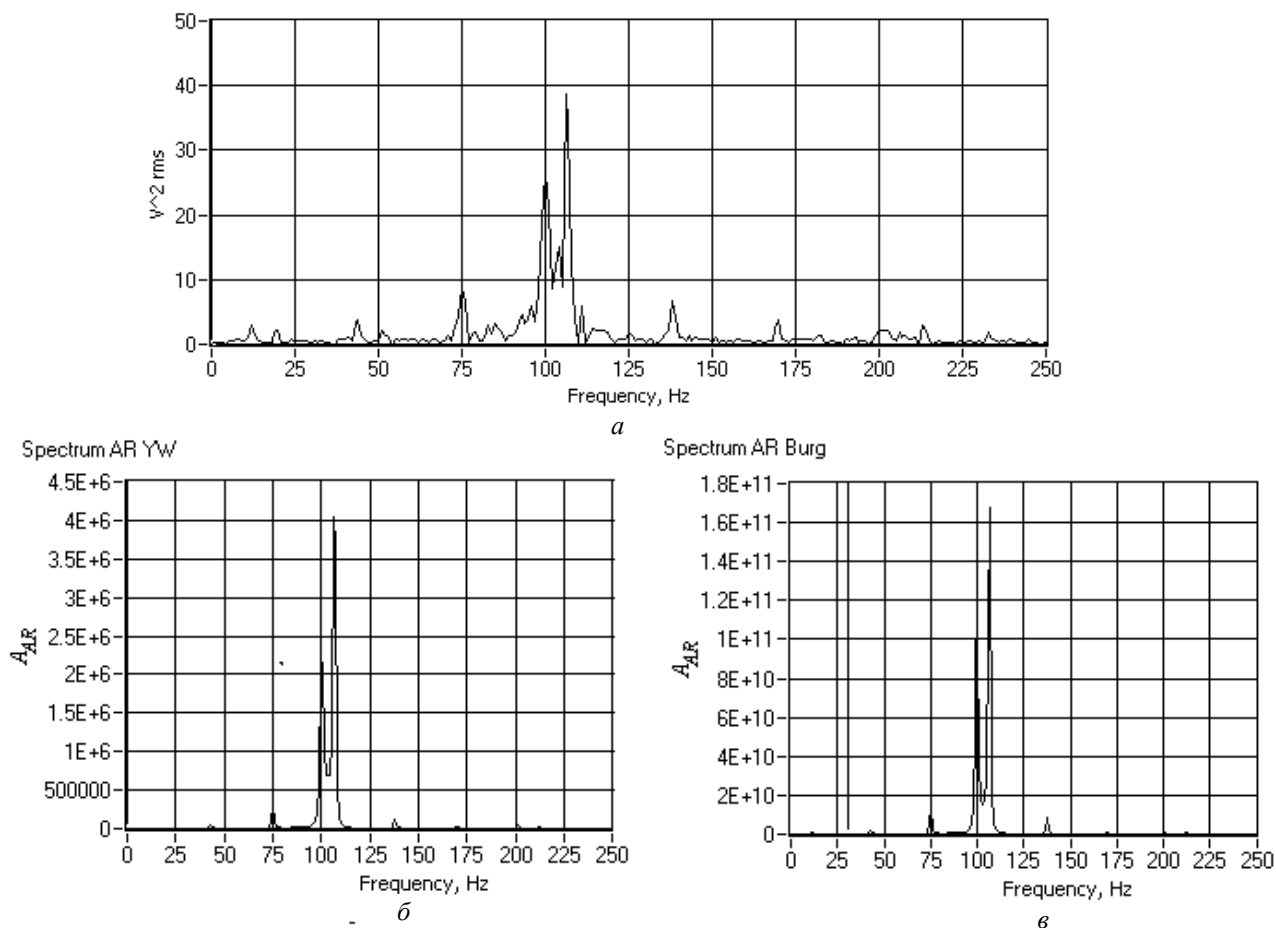


Рис. 3

На рис. 4 зображено осцилограму, яку отримано за допомогою фазового лазерного датчика вібрацій для тестового сигналу частотою 1200 Гц.

На рис. 5 представлено результати обробки вихідного сигналу за допомогою розроблених програм на основі імітаційних моделей із застосуванням алгоритмів ДПФ (рис. 5 а), Юла-Уолкера (рис. 5 б) та Берга (рис. 5 в).

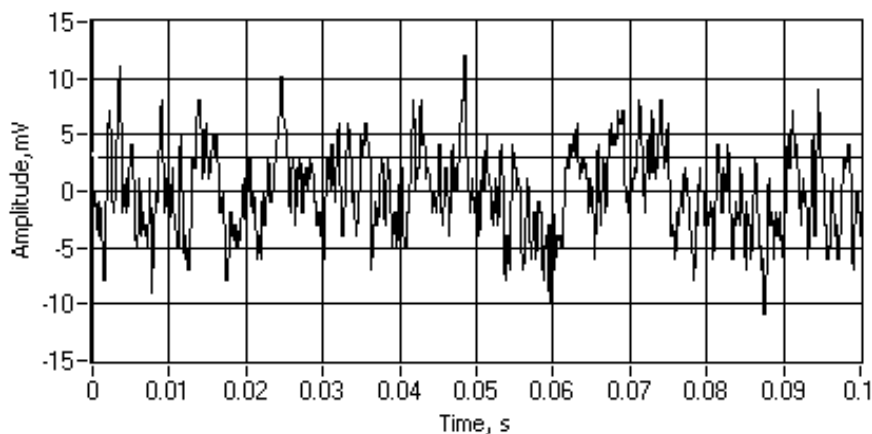


Рис. 4

У результаті розрахунків АР-методами спектр сигналу має псевдоамплітудне значення, що можливо скорегувати відповідними коефіцієнтами амплітуди.

Отримані результати свідчать, що АР-методи оцінювання СЦП дають кращі спектральні оцінки з роздільною здатністю за частотою, ніж ДПФ, а спектри

мають явно виражені піки амплітуд та не мають виражених шумових складових сигналу, тобто дають змогу подавляти додаткові спектральні складові, відмінні від основних гармонік. Тому доцільно проводити подальші дослідження з використанням АР-методів при оцінюванні вібрацій за допомогою фазових лазерних систем від дифузійно-відбиваючих поверхонь.

Висновки. Метод дослідження за допомогою віртуальних інструментів надає можливість підвищення ефективності вимірювань спектральних характеристик, дає змогу провести вибір індивідуальних параметрів моделі для кожного конкретного випадку вимірювань і моделювання поведінки процесу при різних значеннях незалежних (факторних) змінних.

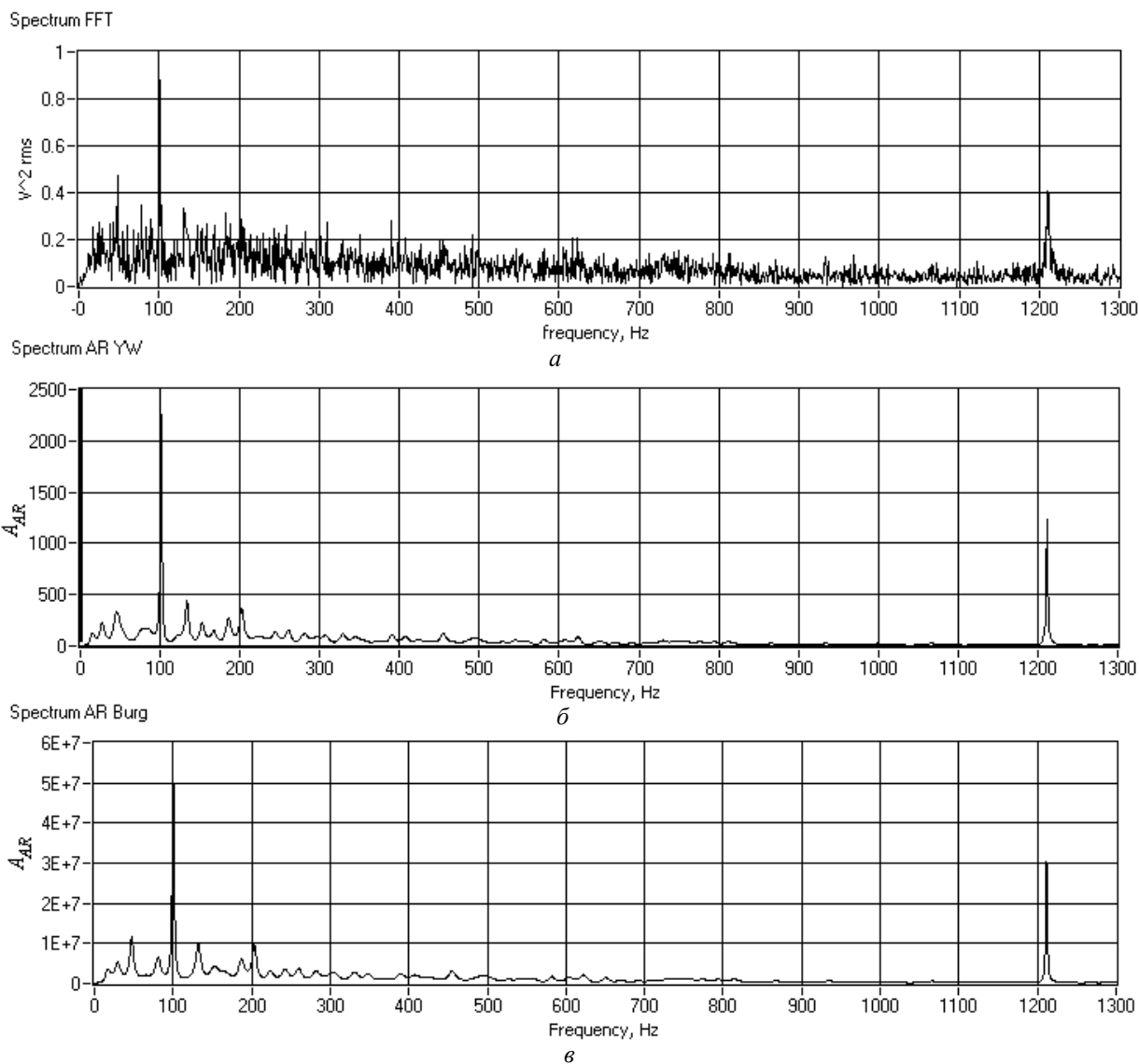


Рис. 5

Результати імітаційного моделювання і проведені дослідження із застосуванням віртуальних приладів дають підставу стверджувати, що розроблені віртуальні моделі параметричних АР-методів доцільно використовувати у складі програмного забезпечення лазерних фазових вимірювальних систем оцінювання вібраційних сигналів від дифузійно-відбиваючих поверхонь. Проведено оцінку достовірності та адекватності (оцінка якості) моделі щодо її відповідності досліджуваному об'єкту та працездатності шляхом порівняльного аналізу з класичним алгоритмом Фур'є.

1. Анохин В.В. Параметрическое моделирование дискретных стохастических процессов по известным входным и выходным сигналам // Экспонента Pro. Математика в приложениях. – 2004. – С. 142–145.
2. Брагинец И.А., Зайцев Е.А. Помехоустойчивость фазовых лазерных датчиков вибрации // Техн. электродинамика. – 2010. – № 3. – С. 67–73.
3. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа: Обзор // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69. – № 11. – С. 5–51.
4. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1990. – 584 с.
5. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь: Вибро-Центр. – 1996. – 167 с.
6. Синиця В.І., Лісогор М.В. Комп'ютерна програма «Віртуальний цифровий аналізатор спектру методом Юла-Уолкера». Свідчення про реєстрацію № 44146 від 05.06.12.
7. Синиця В.І., Лісогор М.В. Комп'ютерна програма «Віртуальний цифровий аналізатор спектру методом Берга». Свідчення про реєстрацію № 49066 від 13.05.13.

УДК 681.3.06

Е.А. Зайцев¹, канд. техн. наук, **И.А. Брагинец²**, канд. техн. наук, **В.И. Синица³**, канд. техн. наук, **М.В. Лисогор⁴**

1, 2 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

3, 4 – Национальный технический университет Украины «КПИ»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Применение имитационного моделирования авторегрессионных методов спектрального анализа для решения задач вибродиагностики

Статья посвящена исследованию возможностей применения авторегрессионных методов оценки спектральной плотности мощности вибросигналов на основе имитационного моделирования и разработки виртуального спектроанализатора для задач вибродиагностики с последующим применением для идентификации неисправностей оборудования. Разработаны имитационные модели в виде виртуальных спектроанализаторов для двух базовых параметрических методов оценки спектральной плотности мощности (Юла-Уолкера и Берга). Проведен сравнительный анализ результатов параметрического спектрального анализа с результатами классического алгоритма дискретного преобразования Фурье на базе реальных данных, полученных при исследовании фазовых лазерных датчиков вибрации. Проведены также экспериментальные исследования с применением разработанных виртуальных приборов для оценки СПМ реальных вибросигналов. Библиография, 7, рис. 5.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, авторегрессионная модель, параметрический спектральный анализ, алгоритм Юла-Уолкера, алгоритм Берга, вибродиагностика, виброизмерения, имитационная модель, виртуальный спектроанализатор.

Е.О. Zaitsev¹, **I.O. Bragynets²**, **V.I. Synytsa³**, **M.V. Lisohor⁴**

1, 2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

3, 4 – National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",

Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

The use of simulation techniques autoregressive spectral analysis to solve problems vibrodiagnostics

Estimation of the power spectral density (PSD) of discrete deterministic and stochastic processes using Fast Fourier Transform is efficiently computationally and provides acceptable results for a large class of signal processes. However, despite the above, the advantages of such an approach estimating the PSD, there are several fundamental limitations. The most important of them – the resolution power, i.e. the ability to distinguish between spectral lines of two or more signals. The second limitation is due to the weight processing of data to calculate the FFT. Weighing manifested in the form of "leakage" in the frequency domain the energy of the main lobe of the spectral line "flows" in the side lobes, which results in the imposition and the distortion of other spectral lines of the presence all signals. These limitations are especially apparent in the analysis of the measuring frequency signals with a small number of samples. Many measurement processes have short duration or their spectra change slowly over time, which can be considered constant only in short segments of data records. At the same time, the parametric spectral analysis provides a more accurate, with a high-resolution spectral estimation, and is most effective when working with the data of short length. Parametric spectral analysis involves the construction of a mathematical model of the time series, and only then on the basis of the found models to evaluate its spectral characteristics. Such models allow to make more realistic assumptions about the data outside the window than the assumption of their vanishing. As a result, there is no need for window functions and, consequently, is eliminated and associated with him distortion.

The article investigates the possibilities of application of autoregressive methods PSD estimates based on simulation and design of virtual spectrum analyzer for vibrodiagnostics tasks, with subsequent applications to address problems of identification of equipment problems. Simulation models have developed in the form of virtual spectrum analyzer to the two basic methods of parametric estimation of power spectral density (Yule-Walker and Burg).

A comparative analysis of the results of the parametric spectral analysis with the results of the classical discrete Fourier transform algorithm based on real data obtained in the study of phase laser vibration sensors. The experimental studies have been carried out using the developed virtual devices for estimate PSD of real vibration signals. References 7, figures 5.

Key words: power spectral density, AR model, parametric spectral analysis, algorithm Yule-Walker, algorithm Berg, vibrodiagnostics, vibration measurement, simulation model, a virtual spectrum analyzer.

Надійшла 20.11.2013

Received 20.11.2013