

## Методи и средства обработки сигналов и изображений

УДК 621.376.2; 004.04

Є.О. Зайцев<sup>1</sup>, канд.техн.наук, М.В. Лісогор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail:zaitsev@i.ua.

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

### Застосування метода Берга для аналізу вібросигналів отриманих за допомогою лазерних сенсорів

*Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування авторегресійного методу Берга для оцінювання спектральної щільності потужності на основі даних імітаційного моделювання та елементів програмного забезпечення аналізу спектру для задач вібродіагностики.*

*Проведено порівняльний аналіз результатів параметричного спектрального аналізу з результатами класичного алгоритму швидкого перетворення Фур'є на базі реальних даних, що були отримані при дослідженні дифузійно-відбиваючих об'єктів за допомогою фазових лазерних сенсорів вібрації. Проведено експериментальні дослідження із застосуванням розробленого програмного забезпечення для оцінки спектральної щільності потужності реальних вібросигналів. Бібл. 16, рис. 4.*

**Ключові слова:** програмне забезпечення, швидке перетворення Фур'є, спектральна щільність потужності, авторегресійна модель, параметричний спектральний аналіз, алгоритм Берга, вібродіагностика, вібровимірювання, імітаційна модель, віртуальний спектральноаналізатор.

#### Вступ

Актуальність вирішення задач вібродіагностики полягає в тому, що значну частину всіх процесів контролю деталей енергетичного обладнання складають процеси пов'язані з контролем вібрацій цих поверхонь. Існує дві групи методів вимірювання параметрів вібрації поверхонь: контактні за допомогою механічного зв'язку датчика з досліджуваним об'єктом, і безконтактні, тобто не зв'язані з об'єктом механічного зв'язку [8]. Серед першої групи найбільш поширеними є методи вимірювання вібрації за допомогою п'єзоелектричних

датчиків. Недоліками таких датчиків є: спотворення форми сигналу, вплив самого датчика на характер вібрації, що вносить додаткову похибку вимірювання. Крім того, механічний зв'язок датчика з досліджуваним об'єктом далеко не завжди допустимий. Тому в останні роки основна увага приділяється розробці безконтактних методів вимірювання параметрів вібрації перевагою, яких є відсутність впливу на досліджуваний об'єкт. Серед останніх велике поширення набули оптичні та вихрові методи. Принцип дії оптичних безконтактних вимірювачів найчастіше заснований на застосуванні ефекту Доплера [12]. Такі вимірювачі дозволяють вимірювати амплітуди і фази гармонійних 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 [5].

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 огинаючої прийнятого випромінювання, при цьому модуляція фази 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 [5].

ЛВСФТ, крім окремого застосування, можуть ефективно бути включені в інформаційно-вимірювальні системи моніторингу стану об'єкту [7]. Таке поєднання забезпечує створення складних апаратно-програмних комплексів, здатних вирішувати діагностичні задачі, що виникають підчас експлуатації енергетичного обладнання (гідро-, дизель- та електрогенераторів) [4]. При цьому в [6] для побудови експертної системи контролю вібропроцесів використовується програмне забезпечення на основі швидкого перетворення Фур'є (далі ШПВ). Застосування ШПФ в таких системах дуже часто має ряд недоліків, які призводять до появи похибок та неточностей при діагностиці [5]. До таких недоліків призводить: "розтікання" спектру, потребу використання вікон, збагачення спектру сигналу за рахунок обмеження вибірки досліджуваного сигналу в часі, неоднорідності вібросигналів у часі [13] і т.п.

При врахуванні перерахованих факторів програмне забезпечення (далі ПЗ) вимірювачів, розглянутих в [6], для аналізу вібросигналів виявляється недостатньо інформативним і тому в багатьох випадках не ефективним для діагностики і прогнозування технічного стану контрольованого обладнання. У зв'язку з чим для дослідження вібросигналів широкого застосування набули авторегресійні алгоритми параметричного спектрального (далі АР) аналізу [1]. Використання параметричних моделей дозволяє одержати спектральні оцінки з більш високою потенційною точністю та роздільною здатністю, порівняно з класичними методами спектрального аналізу, особливо при роботі з вибірками малого обсягу [15] та для аналізу нестационарних періодичних стохастичних сигналів [9]. Тому предметом дослідження є АР аналіз методом Берга, як апарат/інструмент вирішення проблем, що виникають при дослідженні вібросигналів за допомогою ЛВСФТ.

АР аналіз, що проводиться в роботі виконується за допомогою імітаційних моделей [16] на основі методу Бергу. Побудована модель використовується для оцінки спектральних характеристик досліджуваного сигналу на виході ЛВСФТ.

Найбільше поширення отримав підхід, заснований на побудові лінійних стаціонарних АР моделей [2, 10, 14]. 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 (або, що те ж саме, через

нескінченне число лінійних систем, з'єднаних послідовно або паралельно), можна отримати спектральну щільність потужності будь-якої форми. Тому за допомогою апроксимованої лінійної моделі можливо описати детерміновані і випадкові процеси з дискретним часом, які зустрічаються на практиці. Спектральна характеристика лінійних моделей визначається параметрами моделі і дисперсією білого шуму [11].

Параметричний метод АР аналізу, що використаний в даній роботі, складається з трьох етапів і має на увазі побудову математичної моделі часового ряду і тільки після цього на основі знайдених моделей дозволяє оцінити його спектральні характеристики. 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 теоретичне вираз для спектральної щільності потужності (СЩП), відповідний обраної моделі.

Метою даної статті є обґрунтування застосування АР-методу Берга при обробці вібросигналів лазерної інформаційно-вимірювальної системи.

Цілями статті є:

- використання АР-методу Берга для оцінки СЩП вихідних сигналів фазових лазерних сенсорів;
- порівняльний аналіз СЩП експериментальних сигналів отриманих за допомогою лазерних сенсорів при використанні АР аналізу на основі методу Берга та аналізу за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

## Основна частина

Метод Берга оцінює АР-параметри по послідовності оцінок коефіцієнтів відбиття.

Алгоритм Берга ідентичний геометричному, проте оцінка коефіцієнта відбиття знаходиться з інших міркувань, а саме: при кожному значенні параметра  $p$  в ньому мінімізується арифметичне середнє потужності помилок лінійного передбачення вперед і назад (тобто вибіркова дисперсія помилки передбачення):

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

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

Розрахунок автокореляційної функції відбувається за формулою:

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

Розрахунок СЩП АР-моделі, згідно спектральному параметричному методу Берга відбувається за формулою:

$$P_{AP}(f) = \frac{\sigma^2 T}{|A(f)|^2} = \frac{\sigma^2 T}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a[k] \cdot e^{-j2\pi k f T} \right|^2}, \quad (3)$$

де  $|A(f)|^2$  – амплітудно-частотна характеристика фільтру;  $T$  – крок у часі;  $a[k]$  – коефіцієнти відображення фільтра, що розраховуються з виразу:

$$r_{xx}[m] = -\sum_{k=1}^p a[k] r_{xx}[m-k], \quad (4)$$

де  $0 \leq m \leq p$ ;  $p$  – порядок моделі, який можна розрахувати за допомогою критерію Акаїке [3].

Реалізація АР-алгоритму виконана за допомогою віртуального програмування в графічному редакторі LabView. Розроблені віртуальні інструменти для проведення спектрального аналізу з використанням алгоритму Берга, а також для класичного непараметричного алгоритму ШПФ, що дає змогу провести порівняльний аналіз параметричного методу з класичним ШПФ.

Розробка та тестування програмного забезпечення (далі ПЗ) АР аналізу методом Берга проводилося на основі методів описаних в [3, 6, 16]. Побудована модель використовується для експериментальної оцінки спектральних характеристик досліджуваного сигналу на виході ЛВСФТ.

### Експериментальні дослідження

При наявності вібрацій контрольованого об'єкта у фазовому лазерному датчику вібрацій вихідний сигнал описується наступним чином:

$$U(t) = A \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi(t)) \quad (1)$$

де:  $A$  – амплітуда вхідного сигналу,  $f$  – частота сигналу,  $t$  – час,  $\varphi$  – фазовий зсув, пропорційні параметрам контрольованих вібрацій.

В такому сигналі параметри модуляції фазового зсуву  $\varphi$  пропорційні параметрам контрольованих вібрацій (амплітуді та частоті). В класичному варіанті побудови ПЗ для лазерного сенсора [4] використовуючи перетворення Гільберта визначають миттєве значення фазового зсуву  $\varphi$ . Далі застосовуючи швидке перетворення Фур'є визначають спектр сигналу  $\varphi$ .

На рис. 1. представлено осцилограму отриману з використанням фазового лазерного сенсора вібрацій при вимірюванні тестового сигналу частотою 30Гц. В якості джерела тестового сигналу було використано гучномовець 25ГДН-1-4, під'єднаний до генератора сигналів звукової діапазону ГЗ-118 через підсилювач нижніх частот TDA2822M.

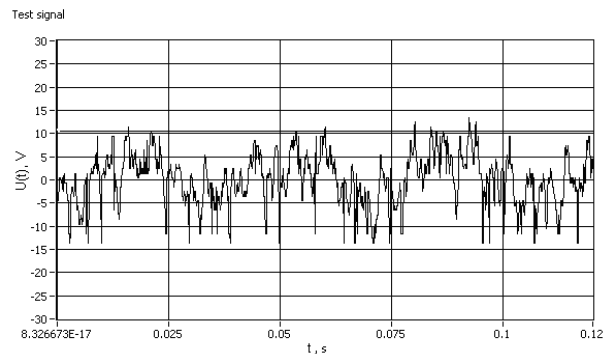
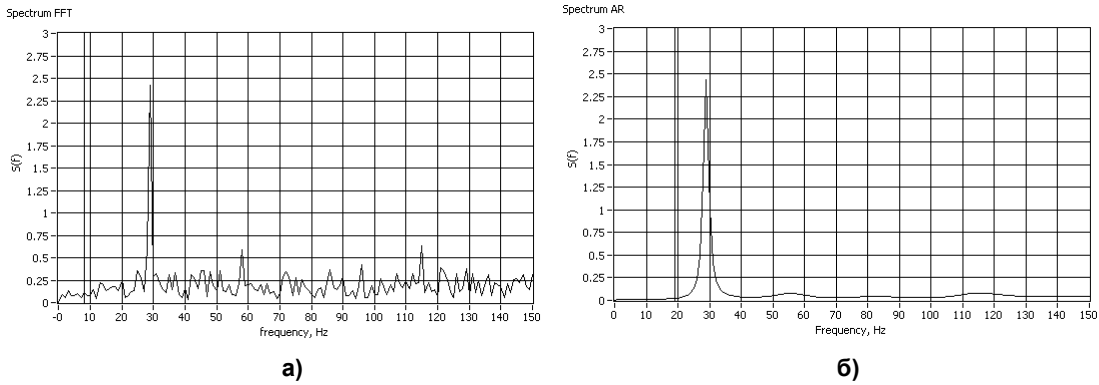


Рис. 1. Осцилограма тестового сигналу з частотою 30Гц, отриманого за допомогою фазового лазерного датчика вібрацій

На рис. 2 представлені результати обробки сигналу (рис.1) спектроаналізатором на основі імітаційної моделі з використанням алгоритму ШПФ (рис.2,а) та алгоритму АР-аналізу методом Берга (рис.2,б). Визначений спектр за допомогою ШПФ (рис.2,а) візуально розділяється на дві складові – спектр інформативного сигналу та спектр шумового сигналу (неінформативної складової). Шумова складова виникає під дією мережевих наведень, індустриальних перешкод, флуктуацій температури повітря, тощо [5, 12].

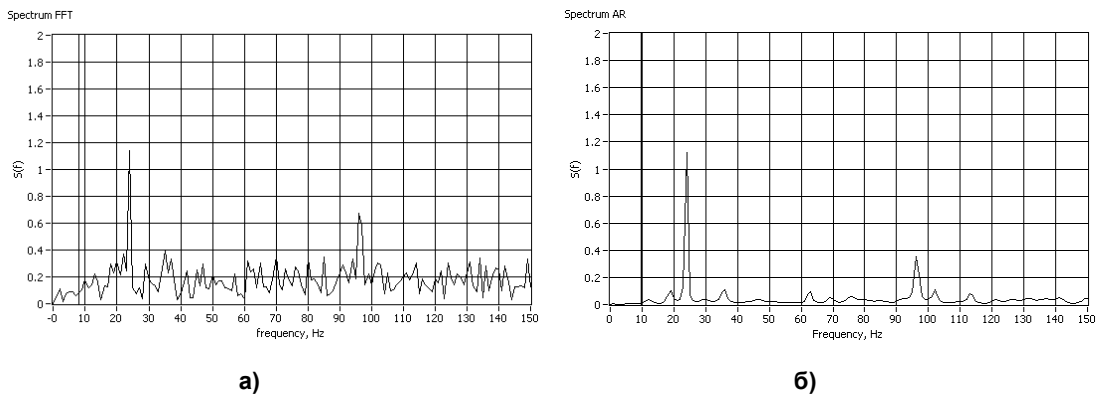
Спектр визначений за допомогою методу Берга у порівнянні з класичним ШПФ дозволив зменшити спектральні складові викликані шумовими складовими досліджуваного сигналу. В результаті розрахунків за допомогою методу Берга спектр сигналу має псевдо-амплітудне значення, що кореговане відповідними розрахунковими коефіцієнтами амплітуди.



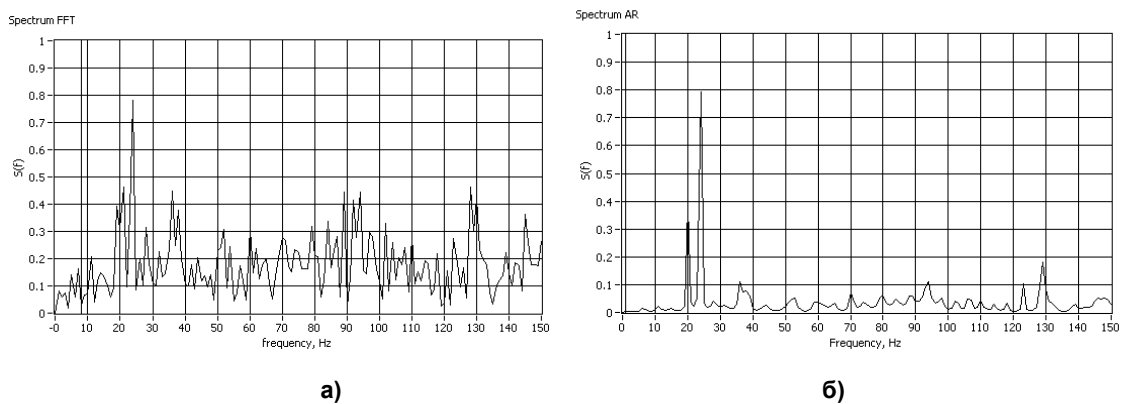
**Рис. 2.** Результат обробки тестового сигналу на 30Гц за допомогою розроблених програм: на основі алгоритму ШПФ (а), на основі алгоритму АР-аналізу на основі алгоритму Берга (б)

Для визначення впливу використаного підсилювача TDA2822M на тестовий сигнал було проведено наступні експерименти: живлення підсилювача гучномовця вклучене, генератор те-

стового сигналу вимкнено (рис.3); живлення підсилювача гучномовця вклучене, генератор тестового сигналу вклучений (рис.4).



**Рис. 3.** СЦП тестового вхідного сигналу частотою 30 Гц з ввімкненим джерелом підсилювача динаміка та ввімкненим генератором без сигналу: а) – алгоритм ШПФ; б) – АР алгоритм Берга



**Рис. 4.** СЦП тестового вхідного сигналу частотою 30 Гц з вимкненим джерелом підсилювача динаміка та ввімкненим генератором без сигналу: а) – алгоритм ШПФ; б) – АР алгоритм Берга

В результаті експериментальних досліджень тестових сигналів, було з'ясовано, що додаткове збагачення спектру тестового сигналу відбувається за рахунок внутрішніх і зовнішніх наведень у підсилювачі TDA2822M, а також за рахунок флуктуацій джерела живлення. Наявність додаткових гармонік на спектрограмі (рис.3.,б та рис.4, б) свідчить про необхідність у розробці більш ефективної схеми підсилювача та його схеми живлення.

### Висновок

Експериментальні дослідження розробленого спектроаналізатору для оцінки СЩП свідчить про те, що АР-аналіз на основі метода Берга має кращі спектральні оцінки з роздільною здатністю по частоті, ніж ШПФ. Оцінка отриманих експериментальних тестових вібросигналів поверхні гучномовця свідчить про те, що спектри тестових сигналів, оброблені за допомогою методу Берга, мають явно виражені піки амплітуд, та не мають виражених шумових складових сигналу, тобто дозволяють придушити додаткові спектральні складові відмінні від основних гармонік. Тому доцільно проводити подальші дослідження з використання АР-аналізу при оцінюванні вібрацій за допомогою ЛВСФТ дифузійно-відбиваючих поверхонь енергетичного або іншого обладнання.

Застосування АР-методу Берга в фазових лазерних сенсорах дозволяє підвищити їх завадостійкість в порівнянні з раніше використовуваними алгоритмами (а саме ШПФ).

### Список використаних джерел

1. *Mulgrew B., Grant P., Thompson J.* Digital signal processing: concepts and applications, Macmillan press Ltd, 1999.
2. *Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M.* White noise in information signal models // *Applied Mathematics Letters.* – 1994. – Vol. 7. – № 3. – P. 93-95.
3. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов // Монография: пер. с англ. И. Г., под ред. Ю. К. Беляева – М.: Мир. – 1976. – 757 с.
4. *Борисенко А. Н.* Теория и практика компьютеризированных информационно-измерительных систем для управления и диагностики дизель-генераторов//Рукопись. Диссертация. – Институт электродинамики НАН Украины, – Киев. – 2010.
5. *Брагинец И. А., Зайцев Е.А.* Помехоустойчивость фазовых лазерных датчиков вибраций// *Техническая электродинамика.* – 2010. – №3. – с. 67-73.
6. *Брагинец И. А., Зайцев Е. А.* Лазерные фазовые датчики вибраций и перемещений в диапазоне частот от 15 до 1000 //Техническая электродинамика. Тематичний випуск, частина 2. – 2010. – с. 186-191.
7. *Брагинец І.О., Зайцев Є.О., Лісогор М.В., Синуца В.І.* Застосування імітаційного моделювання авторегресійних методів спектрального аналізу для вирішення задач вібродіагностики//Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – №37. – с. 124- 132.
8. *Грушин В. А.* Вибродиагностика технического состояния машинного оборудования методом обеляющего фильтра [Интернет ресурс]: //Автореферат – Нижний Новгород, 2006. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/vibrodiagnostika-tehnicheskogo-sostoyaniya-mashinnogo-oborudovaniya-metodom-obelyayushchego>
9. *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.
10. *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.
11. *Кей С. М., Марпл С. Л.* Современные методы спектрального анализа: Обзор. // *ТИИЭР.* – ноябрь 1981. – т.69. – №11. – С. 5-51.
12. *Ландсберг Г.С.* Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 848 с.
13. *Марпл С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения // Пер.с англ. – М.: Мир. – 1990. – 584 с.
14. *Марченко Б. Г., Мыслович М. В.* Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – Киев: Наукова думка, 1992. – 196 с
15. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов // *Прикладная математика.* – М.: Мир. – 1978. – 848 с.
16. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем // *Искусство и наука: Пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского.* – М.: Мир. – 1978. – 418 с.

Поступила в редакцию 06 ноября 2014 г.

УДК 621.376.2; 004.04

**Е.А. Зайцев**<sup>1</sup>, канд.техн.наук, **М. В. Лисогор**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail:zaitsev@i.ua

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

## Применение метода Берга для анализа вибросигналов полученных с помощью лазерных сенсоров

*Статья посвящена исследованию возможностей применения авторегрессионного метода Берга для оценки спектральной плотности мощности на основе данных имитационного моделирования и элементов программного обеспечения анализа спектра для задач вибродиагностики.*

*Проведен сравнительный анализ результатов параметрического спектрального анализа с результатами классического алгоритма быстрого преобразования Фурье на базе реальных данных, полученных при исследовании диффузно-отражающих объектов с помощью фазовых лазерных сенсоров. Проведены экспериментальные исследования с применением разработанного программного обеспечения для оценки спектральной плотности мощности реальных вибросигналов. Библ. 16, рис. 4.*

**Ключевые слова:** программное обеспечение, быстрое преобразование Фурье, спектральная плотность мощности, авторегрессионная модель, параметрический спектральный анализ, алгоритм Берга, вибродиагностика, имитационная модель, виртуальный спектроанализатор.

UDC 621.376.2; 004.04

**E.O. Zaitsev**<sup>1</sup>, Ph.D., **M.V. LisoHOR**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail:zaitsev@i.ua.

<sup>2</sup>National technical university of Ukraine «Kyiv politechnic institute»,

Polytechnichna st., 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

## Application of the method by Berg for the analysis of vibration signals which were obtained using laser sensors

*National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",*

*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 model has developed in the form of virtual spectrum analyzer to the basic method of parametric estimation of power spectral density by Berg.*

*A comparative analysis of the results of the parametric spectral analysis with the results of the classical fast 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. Bibl. 16, Fig. 4.*

**Keywords:** software, fast Fourier transform, power spectral density, AR model, parametric spectral analysis, algorithm Berg, vibrodiagnostics, simulation model, a virtual spectrum analyzer.

### References

1. *Mulgrew B., Grant P., Thompson J.* (1999), "Digital signal processing: concepts and applications", Macmillan press Ltd.

2. *Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M.* (1994), "White noise in information signal models". Applied Mathematics Letters. Vol. 7. No 3. Pp. 93-95.
3. *Anderson T. W.* (1976), "The analysis of time series". Monograph. P. 757. (Rus)
4. *Borysenko A. N.* (2010), "Theory and practice of computerized information systems for the management and diagnostics of diesel generators". Manuscript. Dissertation. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Kiev. (Rus)
5. *Brahynets I. A., Zaitsev E. A.* (2010), "Noise resistance of phase laser vibration sensors". Technical Electrodynamics. No. 3, Pp. 67-73. (Rus)
6. *Brahynets I. A., Zaitsev E. A.* (2010), "Laser Sensors phase displacements and vibrations in the frequency range 15 to 1000". Technical Electrodynamics. Special issue. Vol. 2. No. 3, Pp. 186-191. (Rus)
7. *Brahynets I. A., Zaitsev E. A., Lisohor M. V., Sinitsia V. I.* (2013), "The use of simulation techniques autoregressive spectral analysis to solve problems vibrodiagnostics". Transactions of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. No. 37, Pp. 124-132. (Ukr)
8. *Grushyn V. A.* (2006), "Vibrodiagnostika technical condition of machinery by method by whitewashes filter". Wireless network. Abstract. (Rus)
9. *Zvaritch V., Martchenko B.* (2011), "Autoregressive linear processes with periodic structures as models of information signals". Proceedings of the universities. Radioelectronics. No. 7, Pp. 25-30. (Rus)
10. *Zvaritch V., Martchenko B.* (1996), "Linear processes of autoregressive in problems vibrodiagnostics nodes electric cars". Technical diagnostics and nondestructive testing. No. 1, Pp. 45-54. (Rus)
11. *Kay S. M., Marple S. L.* (1981), "Spectrum analysis – a modern perspective". TIIEER. Vol. 69, No. 11, Pp. 5-51. (Rus)
12. *Landsberh H. S.* (2003), "Optics. Textbook. Benefit: For universities". FIZMATLIT. Vol. 6, P. 848. (Rus)
13. *Marple S. L.* (1990), "Digital spectral analysis with applications". (Rus)
14. *Martchenko B., Mislovitch M.* (1992), "Vibrodiagnostiks bearing assemblies of electrical machines". Naukova Dumka. – P. 196. (Rus)
15. *Rabiner L., Hould B.* (1978), "Theory and application of digital signal processing". Applied Mathematics. (Rus)
16. *Shannon R.* (1978), "Simulation modeling of systems". Art and Science. (Rus)