ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.314; 621.391 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).48-57

ВИКОРИСТАННЯ РІШЕНЬ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЛІНІЙНИХ ПРОЦЕСІВ АВТОРЕГРЕСІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОУСТАНОВОК

В.М. Зварич, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України, 03680, м. Київ, пр.-т Перемоги 56
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хаткевича, 20А

В роботі розглянуто деякі методи діагностування технічного стану енергетичного обладнання. Наведено порівняння різних методів вібродіагностики, що можуть бути використані при діагностуванні технічного стану генераторів вітроустановок. Розглянуто використання лінійних випадкових процесів для побудови систем діагностики генераторів вітроустановок. Представлено метод знаходження характеристичної функції породжуючого процесу для лінійного процесу авторегресії другого порядку AR(2), що має Гамма-розподіл. Властивості Пуасонівських спектрів стрибків використовуються для рішення такої проблеми. Вирішення такої задачі, базується на властивості характеристичної функції стаціонарного лінійного випадкового процесу авторегресії AR(2), $\xi_t + a_1\xi_{t-1} + a_2\xi_{t-2} = \varsigma_t$, $t \in Z$, *де* $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$ *параметри авторегресії;* $Z = \{\dots,-1,0,1,\dots\}$ *множина цілих чисел;* $\{\zeta_t, t \in Z\}$ *випадковий процес з дискретним часом та незалежними значеннями, що має безмежно подільний закон розподілу, який часто називають породжуючим процесом. Іноді таку задачу називають оберненою задачею. В статті відзначається що одновимірний логарифм характеристичної функції лінійного стаціонарного процесу авторегресії можна задати одновимірною характеристичною функцією в канонічному представленні Колмогорова,* $\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,1) = im_\xi u + \int_{-\infty}^{\infty}\{e^{iux} - 1 - iux\}\frac{dK_\xi(x)}{x^2}$, *де параметр* m_ξ *та спектральна функція стрибків* $K_\xi(x)$ *однозначно визначають характеристичну функцію. Логарифм характеристичної функції лінійного стаціонарного процесу авторегресії може бути також записана в такій формі:*

$$\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,t) = im_\varsigma u \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\phi(\tau) + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left(e^{iux\phi(\tau)} - 1 - iux\phi(\tau)\right)\frac{dK_\varsigma(x)}{x^2}$$

, де параметри m_ς *та* $K_\varsigma(x)$ *визначають характеристичну функцію породжуючого процесу* ς_t *а* $\phi(\tau)$ *є ядром лінійного випадкового процесу* ξ_t*. Параметри* m_ξ *та* m_ς*, та пуасонівського спектру стрибків* $K_\xi(x)$ $K_\varsigma(x)$ *взаємопов'язані наступним чином* $m_\xi = m_\varsigma \sum_{\tau=0}^{\infty}\phi(\tau)$,

$$K_\xi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\phi(x,y)dK_\varsigma(y).$$

$R_\phi(x,y)$ *є ядром перетворення яке є інваріантним до породжуючого* ς_t *і визначається за допомогою коефіцієнтів* $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$*. Властивості* $R_\phi(x,y)$ *використовуються для вирішення оберненої задачі. Показано приклад знаходження пуасонівських спектрів стрибків і характеристичної функції для лінійного процесу авторегресії другого порядку, що має Гамма-розподіл.*
Метод може бути використаний для вирішення оберненої задачі для авторегресійних процесів інших класів. Показано використання отриманих результатів для моделювання вібраційних сигналів генератора вітроустановки. Бібл. 17, рис. 5
Ключові слова: *лінійний процес авторегресії, характеристична функція, ядро перетворення, породжуючий процес, безмежно-подільний закон розподілу, Гамма -розподіл, вібродіагностика генераторів вітроустановок.*

USE OF SOLUTIONS OF THE REVERSE PROBLEM OF LINEAR AUTOREGRESSION PROCESSES FOR SIMULATION OF VIBRATION SIGNALS OF ROTATING NODES OF WIND GENERATORS

V. Zvarich, doctor of technical science

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
03680, 56 Peremohy av., Kyiv, Ukraine
Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, Ukraine

Difference methods of power equipment diagnostics are discussed. Comparison of different vibration methods for wind generator diagnostic is represented. Linear autoregressive processes for construction of wind generator expert systems is considered. Poisson jump spectra's properties are used for the solution of the problem. A method of Gammal AR(2) generative process characteristic function determination is discussed. The method is suggested for definition the characteristic function for linear autoregressive AR(2) processes with Gamma distribution of the generative process $\{\zeta_t, t \in Z\}$*, namely, autoregressive process AR(2)*

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

$\xi_t + a_1\xi_{t-1} + a_2\xi_{t-2} = \varsigma_t$, $t \in Z$, where $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$ are autoregressive parameters; $Z = \{...,-1,0,1,...\}$ is a set of integers; $\{\zeta_t, t \in Z\}$ is the random process with discrete time and independent values having an infinitely divisible distribution, the process is often called the generating process. Sometimes the problem is called inverse problem. It is noted that the logarithm of the one-dimensional characteristic function of the linear stationary autoregressive process may be determined in Kolmogorov canonical representation $\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,1) = im_\xi u + \int_{-\infty}^{\infty}\{e^{iux} - 1 - iux\}\frac{dK_\xi(x)}{x^2}$, in which the parameter m_ξ and spectral functions of jumps $K_\xi(x)$ define unequivocally the characteristic function. The logarithm of the characteristic function of the linear stationary autoregressive process may be written down also in the following form $\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,t) = im_\varsigma u \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\phi(\tau) + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left(e^{iux\phi(\tau)} - 1 - iux\phi(\tau)\right)\frac{dK_\varsigma(x)}{x^2}$ where the parameters m_ς and $K_\varsigma(x)$ define the characteristic function of the generative process ς_t while $\phi(\tau)$ is the kernel of the linear random process ξ_t. The parameters m_ξ and m_ς, and Poisson spectra of jumps $K_\xi(x)$ $K_\varsigma(x)$ are interrelated as follows $m_\xi = m_\varsigma\sum_{\tau=0}^{\infty}\phi(\tau)$, $K_\xi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\phi(x,y)dK_\varsigma(y)$ where $R_\phi(x,y)$ is so-called transform kernel, which is invariant with generative process ς_t and uniquely defined by the coefficients $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$. Properties of $R_\phi(x,y)$ are used for the inverse problem solution. Examples the peculiar features of determination of Poisson spectra of jump and characteristic function for the autoregressive AR(2) process are considered. Logarithm of characteristic function for linear AR(2) process with Gamma distribution was calculate.
The method may be used for a solution of the reversible problem for AR processes of others classes. An example of application of vibration signal simulation of wind power generator is considered. Ref. 17, fig. 5.
***Keywords:** linear processes of autoregression, characteristic function, kernel of transformation, generative process, infinitely divisible law of distribution, Gamma-distribution, vibrodiagnosis of rolling bearings.*

В.М. Зварич
V. Zvarich

Відомості про автора: докт. техн. наук., стар.наук.співр. Інституту відновлюваної енергетки НАН України, пров. наук. співр. Інституту електродинаміки НАН України.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» радіотехнічний факультет за спеціальністю «Радіотехніка».
Наукова сфера: відновлювана енергетика, обробка сигналів, експертні системи.
Публікації: 100, в тому числі 1 патент
ORCID: 0000-0002-1271-4954
Контакти: тел.: +38 044 239 6534
e-mail: zvaritch@nas.gov.ua

Author information: doctor of technical science, senior researcher of Renewable Energy Institute of NAS of Ukraine, leading researcher of Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine.
Education: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Radioengineering Faculty by specialty "Radioengineering".
Reasearch area: renewable energy, signal processing, expert systems.
Publications: 100 including 1 patent.
Contacts: tel.: +38 044 239 6534
e-mail: zvaritch@nas.gov.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

a - параметри авторегресії;
p - порядок авторегресії;
Z - множина цілих чисел;
t - час;
m_ξ - параметр, що визначає характеристичну функцію спостережуваного процесу ξ_t;
m_ς - параметр, що визначає характеристичну функцію породжуючого процесу ς_t;
$K_\xi(x)$ - спектральна функція стрибків в формулі А. Н. Колмогорова однозначно визначаюча характеристичесну функцію спостережуваного процесу ξ_t;
$K_\varsigma(x)$ -спектральна функція стрибків в формулі А.Н. Колмогорова однозначно визначаюча характеристичну функцію породжуючого процесу ς_t ;
$R_\phi(x,y)$ - ядро перетворення;
$U[.]$ -функція Хевісайда;
b -параметр характеристичної функції Гамма розподілу;
$f_\xi(u,t)$ - характеристична функція спостережуваного процесу ξ_t;
$f_\varsigma(u,t)$ - характеристична функція породжуючого процесу ς_t;
$r(t,n)$ - кореляційна функція процесса ξ_t;
i - знак уявної одиниці;
$M[.]$ - знак математичного сподівання.

Букви грецького алфавіту:

ξ_t - спостережуваний випадковий процес;
ς_t - породжуючий випадковий процес;
$\phi(\tau)$ - ядро лінійного випадкового процесу ξ_t;
θ - параметр характеристичної функції Гамма розподілу.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Вступ. Включення сучасних систем діагностування до складу вітроенергетичних установок може істотно підвищити надійність їх функціонування [13].

Системи технічної діагностики енергетичного обладнання досить різноманітні і базуються на різних методах (рис.1). Це - тепловий контроль і діагностика, контроль технічного стану на основі аналізу електричних і магнітних полів, вібродіагностика, акустична діагностика, діагностика на основі методів акустичної емісії тощо.

Відзначимо, що допуски на зміну величини струму і температури досить великі і суттєво перевищують ті зміни, які виникають при появі різних потенційно небезпечних дефектів, особливо на ранніх стадіях їх виявлення. Показники надійності роботи енергообладнання визначаються результатом спільного впливу як факторів, що визначають умови експлуатації, так і внутрішніх чинників, які описують властивості енергетичного обладнання. Поєднання таких факторів носить випадковий характер, тому застосування статистичних методів для вирішення таких завдань діагностування доцільно у багатьох практичних випадках.

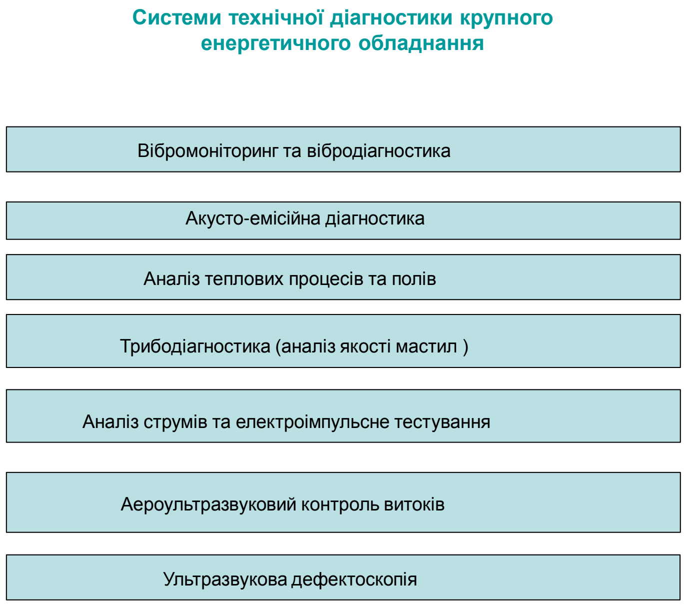

Рис. 1. Методи вібродіагностики енергетичного обладнання.

Fig. 1. Power equipment diagnosis methods.

Найбільш перспективними методами контролю і діагностики є неруйнівні методи, які зазвичай, реалізуються за допомогою спеціалізованих комп'ютерних систем.

Одними з найбільш перспективних систем діагностування обладнання є системи вібродіагностики, що дають можливість визначити дефекти на ранніх стадіях їх появи [1,6].

Рішення завдання побудови ефективної системи діагностування генераторів вітроустановки при використанні такого підходу проводять в декілька етапів:

Перший з них - побудова математичної моделі діагностичних сигналів.

Другий етап передбачає створення і вибір відповідного програмно-технічного забезпечення, на базі якого реалізовувалися ці системи.

Третій етап - розробка методів побудови вирішальних правил по діагностиці генераторів вітроустановки.

Необхідно також провести перевірку працездатності запропонованих методів.

На рис. 2 наведені деякі порівняльні характеристики основних методів вібродіагностики і запропонованого методу вібродіагностики, заснованого на використанні лінійних процесів авторегресії. На відміну від інших, запропонований метод авторегресії допускає аналіз вібросигналів в широкій смузі частот, працездатний при низьких частотах обертання, застосовується для негаусових безмежно-подільних розподілів діагностичних ознак або діагностичних сигналів.

Відзначимо, що, наприклад система вібродіагностики генераторів вітроустановки фірми Bently Nevada використовує в своєму складі платформу прикладних програм, розроблену спільно з компанією General Electric, і використовує для вібродіагностики метод обвідної.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Назва методу	Швидкість, об/хв	стетоскоп	Переваги	Недоліки	Особливості
Метод обвідної	>600 об/хв	Не обов'язково	Достатньо простий в реалізації, якщо відомі власні частоти об'єкту діагностування	Для ефективного результату необхідна вибірка 50-100 обертів	Має сенс для вузькосмугового гаусового процесу
Спектральній аналіз	Різноманітна	Доцільно	Достатньо добре розроблений	Можна використати не для всіх видів машин та типів дефектів	Широко використовується БПФ
Метод ударних імпульсів	>2000 об/хв	Доцільно	Хороші результати для високообертових машин	Непридатний для низкооборотных машин	Рабоча частота 32 кГц
Статистичний спектральний аналіз	Різноманітна	Не обов'язково	Застосовується для високообертових і низькообертових машин	Необхідно зробити вибір оптимального сгладжувального вікна	Роздільна здатність 1/(Δt×n), n-число відліків АКФ
Авторегресійний аналіз	>3 об/хв	Не обов'язково	Рекурентні алгоритми оцінки параметрів і порядка авторегресії	Фіксація частот квантування та фільтрації вібросигналу	Р –порядок AR; Р+1 число відліків АКФ

Рис. 2. Порівняльні характеристики методів вібродіагностики.

Fig. 2. Comparative characteristics of diagnostic methods.

Постановка задачі. У даній роботі для вирішення завдань діагностики енергетичного обладнання пропонується використовувати методи авторегресії, засновані на застосуванні лінійних процесів авторегресії для моделювання, зокрема, діагностичних сигналів, що виникають при роботі генераторів вітроустановок. Базуються такі моделі на різницевих рівняннях [1, 2, 7, 16, 17].

Доцільність такого підходу полягає в наступному. Сучасні системи моніторингу, контролю та діагностики, як правило, в своєму складі містять контролер, мікро-ЕОМ, ПК або промисловий комп'ютер і, отже АЦП. Тобто проводиться обробка дискретних сигналів. Первинні перетворювачі (датчики інформаційних сигналів) також розміщують в певних точках.

Моделі вібраційних сигналів. Застосування AR, MA, ARMA моделей або їх модифікацій має значні переваги в порівнянні з іншими математичними моделями вібраційних сигналів вузлів електротехнічного обладнання, оскільки такі моделі дають можливість швидко відновити реалізації вібраційних сигналів, використовуючи параметри таких процесів. Такі моделі застосовуються не тільки в задачах діагностування технічного стану генераторів вітроустановок, а й, наприклад, для оцінки і прогнозування швидкості вітру [15, 17]. Однак, завдання відновлення ускладнюється, якщо вібраційний сигнал має відмінний від нормального розподіл.

У даній статті розглядається можливість використання лінійних процесів авторегресії [1, 2, 16, 17] для побудови алгоритмів моделювання вібросигналів обертових вузлів генераторів вітроустановок, що надзвичайно важливо для побудови випробувальних стендів, а також тренажерів для підготовки обслуговуючого персоналу вітроагрегатів [10, 11, 13].

Основною особливістю лінійних процесів авторегресії є можливість їх використання для опису негаусових випадкових сигналів, що мають безмежно-подільні розподіли. Розглянемо визначення таких процесів, а також їх властивості, більш детально.

Лінійні процеси авторегресії задаються наступним різницевим рівнянням

$$\xi_t + \sum_{j=1}^{p} a_j \xi_{t-j} = \varsigma_t, \quad t \in Z, \qquad (1)$$

де $\{a_j, a_j \neq 0, j = \overline{1, p}\}$ -параметри авторегресії; Z - множина цілих чисел; p - порядок авторегресії; $\{\zeta_t, t \in Z\}$- деякий однорідний випадковий процес з дискретним часом і незалежними зна-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

ченнями, що має безмежно подільний закон розподілу $P\{\varsigma_0 = 0\} = 1$. Цей процес часто називають породжуючим процесом для ξ_t.

Передбачається, що виконується співвідношення:

$$\sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi^2(\tau) < \infty, \quad \varphi(\tau) \equiv 0 \quad \text{при } \tau < 0. \qquad (2)$$

Логарифм одновимірної характеристичної функції для лінійного стаціонарного процесу з дискретним часом в канонічній формі А.М. Колмогорова визначають наступним чином

$$\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,1) = i$$
$$= m_\xi u + \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ e^{iux} - 1 - iux \right\} \frac{dK_\xi(x)}{x^2}, \qquad (3)$$

в якій параметр m_ξ та спектральна функція стрибків А.М. Колмогорова $K_\xi(x)$ однозначно визначають характеристичну функцію [3, 4].

Логарифм характеристичної функції лінійного процесу с дискретним часом також записують і в такій формі

$$\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,t) = im_\varsigma u \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi(\tau) +$$
$$+ \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{iux\phi(\tau)} - 1 - iux\phi(\tau) \right) \frac{dK_\varsigma(x)}{x^2}, \qquad (4)$$

де параметри $m_\varsigma, K_\varsigma(x)$ визначають характеристичну функцію породжующого процесу ς_t, а $\varphi(\tau)$ - ядро лінійного випадкового процесу ξ_t. У співвідношеннях (3) і (4) $K_\xi(x), K_\varsigma(x)$ - спадні обмежені функції такі, що $K_\xi(-\infty) = 0$, $K_\varsigma(-\infty) = 0$.

Параметри m_ξ та m_ς і Пуасонівські спектри стрибків $K_\xi(x)$ и $K_\varsigma(x)$ пов'язані між собою наступним чином (в припущенні, що процес ξ_t стаціонарний, а ς_t - однорідний)

$$m_\xi = m_\varsigma \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau), \qquad (5)$$

$$K_\xi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\varphi(x,y) dK_\varsigma(y), \qquad (6)$$

де $R_\varphi(x,y)$ - ядро перетворення.

Властивості ядра $\varphi(\tau)$ важливі для розв'язання оберненої задачі - визначення характеристичної функції породжуючого процесу ς_t, якщо відома характеристична функція спостережуваного процесу ξ_t і ядро спостережуваного процесу $\varphi(\tau)$. Деякі результати досліджень можливості розв'язання оберненої задачі для лінійних випадкових процесів з неперервним часом наведені в [10]. Для стаціонарних процесів авторегресії першого порядку AR (1), що мають Гамма і від'ємний біноміальний розподіл, характеристичні функції наведені в [9, 12, 14].

Ядро перетворень $R_\varphi(x,y)$ для стаціонарних лінійних процесів з дискретним часом знаходять таким чином [16]

$$R_\varphi(x,y) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau) U[x - y\varphi(\tau)], \qquad (7)$$

де $\varphi(\tau)$ - ядро лінійного випадкового процесу з дискретним часом; $U[.]$ - функція Хевісайда.

Ядро перетворення $R_\varphi(x,y)$ однозначно пов'язане з ядром лінійного випадкового процесу $\varphi(\tau)$. Інтеграл (6) є інтеграл Лебега-Стілтьєса.

У даній роботі розглянуті особливості рішення для процесів оберненої задачі, тобто знаходження характеристичної функції породжуючого процесу, якщо спостерігається лінійний процес з дискретним часом і відома його характеристична функція. Для розв'язання оберненої задачі передбачається існування формули звернення для інтеграла (6).

Нехай лінійний процес авторегресії ξ_t має Гамма-розподіл з одновимірною характеристичною функцією [5]

$$f_\xi(u,t) = (1 - iu\theta)^{-b} \quad \forall \quad t \in Z; \ \theta > 0; \ b > 0. \qquad (8)$$

Випадковий процес ξ_t є строго стаціонарним і для нього виконується ергодична теорема, тобто

1) $M|\xi_t| < \infty$,

2) $\frac{1}{m^2} \sum_{t=0}^{m} \sum_{n=0}^{m} r(t,n) \to 0$ при $m \to \infty$,

$r(t,n) = \mathbf{M}[(\xi_t - \mathbf{M}\xi_t)(\xi_n - \mathbf{M}\xi_n)]$- кореляційна функція процесу ξ_t.

В цьому випадку пуасонівский спектр стрибків процесу у формулі А.М. Колмогорова визначається наступним чином

$$K_\xi(x) = b\int_0^x y \exp(-y/\theta) dy =$$
$$= \begin{cases} b\theta\left[\theta - (\theta + x)\exp(-x/\theta)\right] & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}, \qquad (9)$$

Звідси

$$dK_\xi(x) = bx\exp(-x/\theta)dx, \qquad x \geq 0. \qquad (10)$$

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Передбачається, що виконуються співвідношення $a_1, a_2 < 0$, $a_1^2 + 4a_2 < 0$, $|a_1 + a_2| < 1$, $|a_1 - a_2| < 1$, $-1 < |a_2| < 1$, $|a_1| < 1 - a_2$.

Ядро перетворення $R_\varphi(x, y)$ згідно (7) визначається наступним чином

$$R_\phi(x,y) = \begin{cases} \sum\limits_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2(\tau) & 0 \le \phi(\tau) y < x; \\ 0 & \phi(\tau) y > x; \quad x < 0 \quad y = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Існує зворотне ядро перетворення $R_\varphi^{-1}(x, y)$ згідно [14]

$$R^{-1}{}_\phi(x,y) = \begin{cases} \left[\sum\limits_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2(\tau)\right]^{-1} & 0 \le \phi(\tau) y < x; \\ 0 & \phi(\tau) y > x; \quad x < 0; \ y = 0 \ . \end{cases} \tag{12}$$

Пуасонівський спектр стрибків породжуючого процесу ς_t для розглянутого випадку визначається наступним співвідношенням [5]

$$K_\varsigma(y) = \begin{cases} b\left|\sum\limits_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau)\right|^{-1} \int\limits_{0_+}^{y} x \exp(-x/\theta) dx, & y > 0; \\ 0, & y = 0. \end{cases}$$

Звідси

$$K_\varsigma(y) = \begin{cases} b\left|\sum\limits_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau)\right|^{-1} \{\theta - (\theta + y)\exp(-y/\theta)\}, & y > 0; \\ 0 \ , & y = 0 \end{cases} \tag{13}$$

Тоді

$$dK_\varsigma(y) = \theta b\left|\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau)\right|^{-1} \{y \exp(-y/\theta)\} dy, \quad y > 0 \ , \tag{14}$$

і логарифм характеристичної функції породжуючого процесу визначається наступним чином

$$\ln f_\varsigma(u;t) = |t| \ln f_\varsigma(u;1) = i\theta b|t| \left|\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi(\tau)\right|^{-1} u + b\theta|t| \left[\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2(\tau)\right]^{-1} \int_0^\infty \{\exp(iyu) - 1 - iuy\} \frac{\exp(-y/\theta)}{y} dy \quad ,$$

$t \in Z$,де, $\theta > 0,\ b > 0,\ y > 0,\ |a_1| < 1 - a_2$.

Після інтегрування отримаєм

$$\ln f_\varsigma(u;t) = |t| \ln f_\varsigma(u;1) = i\theta b|t| \left|\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi(\tau)\right|^{-1} u + b\theta|t| \left[\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau)\right]^{-1} [iu(1-\theta) - \ln(1 - iu\theta)] \ . \ t \in Z , \tag{15}$$

де $\theta > 0,\ b > 0,\ y > 0$.

Характеристична функція процесу вібрації генераторів вітроустановок USW 56-100. Як приклад використання запропонованого підходу, розглянемо вібраційний сигнал обертового вузла підшипника кочення генератора вітроустановки USW 56-100 (рис.3.) з боку корпусу головного валу, встановленого на стенді для випробувань генераторів вітроустановок [2, 4]. Швидкість обертання головного валу 72 об / хв. Для досліджень вібраційних сигналів використовувався розроблений в ІЕД НАН України прототип системи діагностики генераторів вітроустановок, за допомогою якого були отримані оцінки параметрів авторегресії вібраційних сигналів, а також параметри їх розподілів [2].

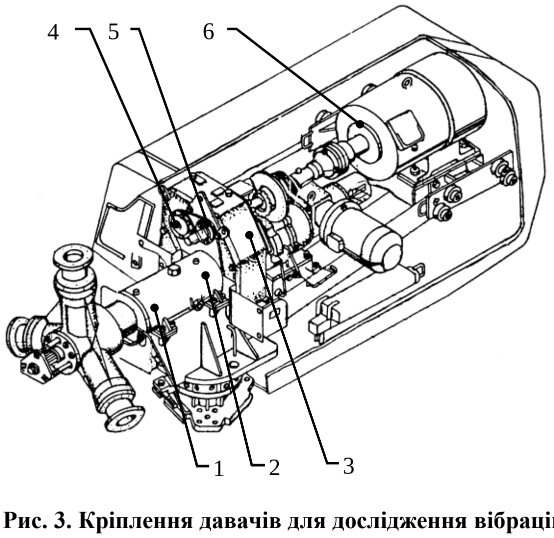

Рис. 3. Кріплення давачів для дослідження вібрацій генератора вітроустановки USW 56-100.

Fig. 3. Sensor mounts for USW 56-100 wind plant generator vibration research.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

У точці 1 вібраційний сигнал моделюється лінійним процесом авторегресії другого порядку з коефіцієнтами авторегресії $a_1 = 0.552$ і $a_2 = -0.0036$, тобто

$$\xi_t + 0.552\xi_{t-1} - 0.0036\xi_{t-2} = \varsigma_t . \qquad (16)$$

Процес ξ_t має Гамма-розподіл з параметрами $\theta > 0,\ b > 0$, одновимірна характеристична функція, якого задана співвідношенням (8). В даному випадку ядро лінійного випадкового процесу авторегресії є спадною позитивною функцією. Результати моделювання ядра представлені на рис. 4.

Методами математичного моделювання визначалися значення параметрів логарифма характеристичної функції (15) $\left[\sum_{\tau=0}^{n}\varphi(\tau)\right]^{-1}$ = 0.452 и $\left[\sum_{\tau=0}^{n}\varphi(\tau)^2\right]^{-1}$ = 0.694, при обсязі вибірки n = 1000. Тоді логарифм характеристичної функції породжуючого процесу ς_t в співвідношенні (15) визначається наступним чином

$$\ln f_\varsigma(u;t) = |t| \ln f_\varsigma(u;1) = 0.452 i|t|\theta b u + 0.694\theta b|t|\int_0^\infty \{\exp(iyu) - 1 - iuy\}\frac{\exp(-y/\theta)}{y}dy =$$
$$= b\theta|t|\{0.452iu + 0.694[iu(1-\theta) - \ln(1 - iu\theta)]\}. \qquad (17)$$

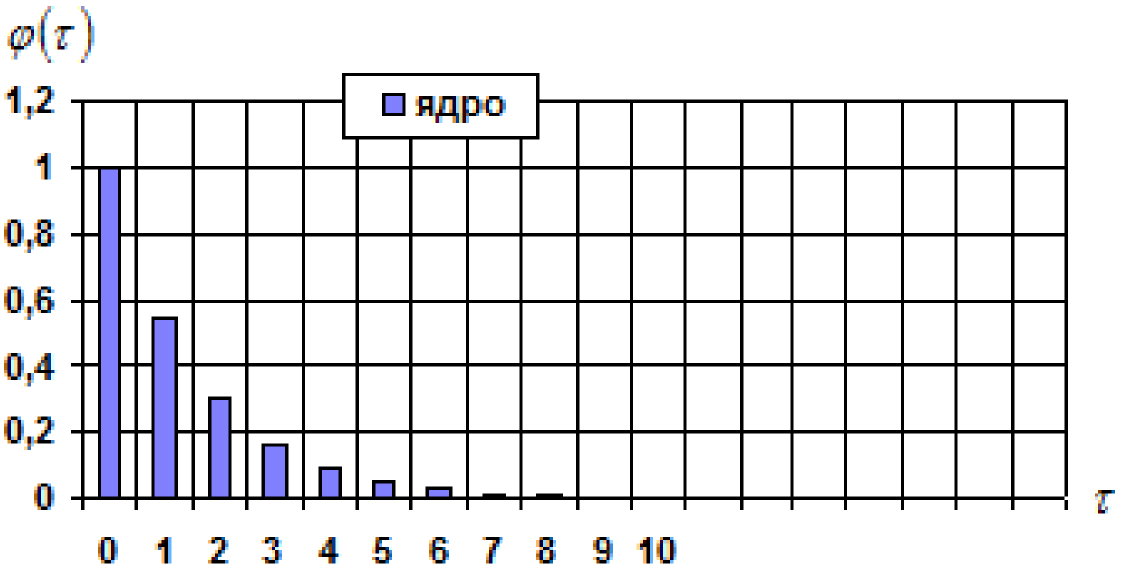

Рис. 4. Ядро лінійного процесу авторегресії AR(2) з параметрами $a_1 = 0.7688$ **та** $a_2 = -0.0036$.

Fig. 4. Kernel of linear autoregressive process AR(2) with parameters $a_1 = 0.7688$ **and** $a_2 = -0.0036$.

Однак, вирішити зворотну задачу для лінійних процесів авторегресії не завжди можна. У точці 2 вібраційний сигнал моделюється процесом авторегресії другого порядку з коефіцієнтами авторегресії $a_1 = 0.76875$, $a_2 = -0.2813$, тобто

$$\xi_t + 0.76875\xi_{t-1} - 0.2813\xi_{t-2} = \varsigma_t , \qquad (18)$$

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

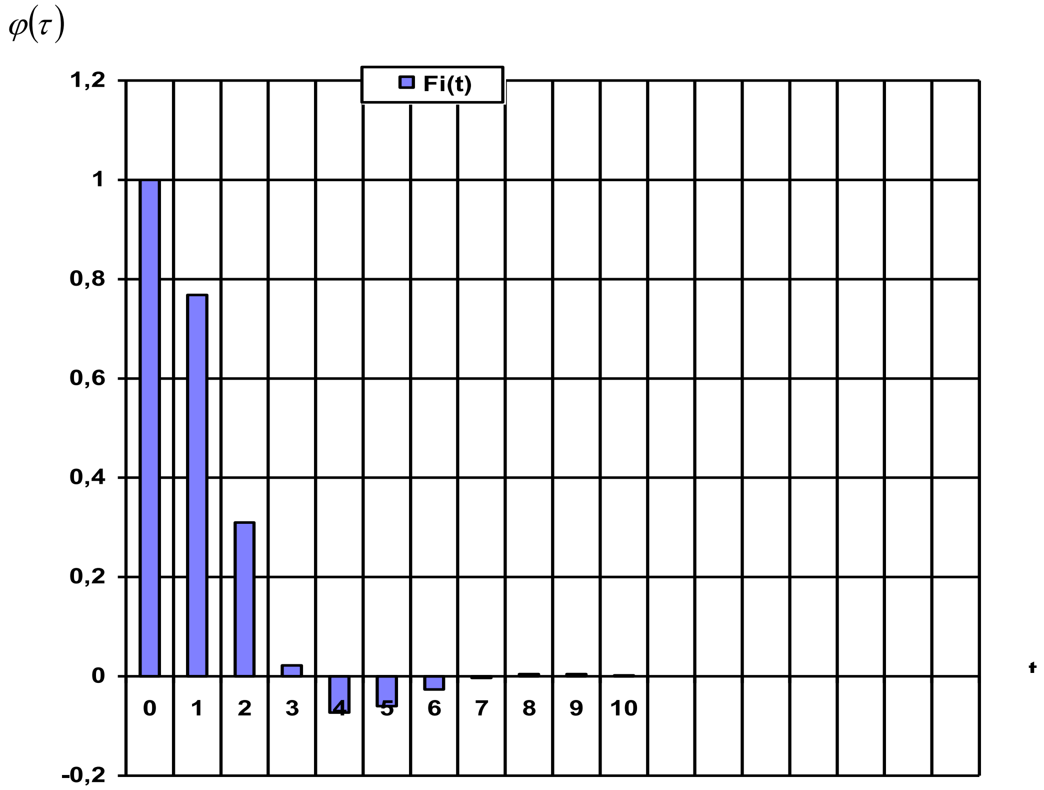

Рис. 5. Ядро лінійного процесу авторегресії AR(2) з параметрами $a_1 = 0.76875$ **та** $a_2 = -0.2813$.

Fig. 5. Kernel of linear autoregressive process AR(2) with parameters $a_1 = 0.76875$ **and** $a_2 = -0.2813$.

Ядро лінійного процесу авторегресії, яке показано на рис. 5, не є спадною позитивною функцією.

Тому рішення оберненої задачі для лінійного процесу авторегресії, що має таке ядро, не представляється можливим.

Якщо дослідження показали, що для лінійного процесу авторегресії, який має безмежно-подільний закон розподілу, за допомогою якого моделюється вібраційний процес, вирішується зворотна задача, то з наперед заданою вірогідністю (з якою оцінюються параметри авторегресії і параметри розподілу процесу) можна, використовуючи відповідні датчики випадкових чисел з відомими характеристиками розподілу, відновити реалізацію вібраційного процесу для подальшого використання [8].

Висновок. Запропонований метод дозволяє побудувати характеристичну функцію породжуючих процесів для лінійних стаціонарних процесів авторегресії не тільки другого порядку, що мають Гамма-розподіл. Представлений метод доцільно використовувати і для знаходжень породжуючих процесів для лінійних процесів авторегресії вищих порядків, а також для вібраційних сигналів генераторів вітроустановок, що мають інші безмежно-подільні розподіли, попередньо дослідивши властивості ядра $\varphi(\tau)$, яке повинно бути спадною позитивною функцією. Як показано в наведених в статті експериментальних дослідженнях, це не завжди можливо.

Стаття підготовлена в рамках виконання наукових проектів цільових програм Національної академії наук України «Ресурс-2», «Нова енергетика», «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

1. *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.

2. *Зварич В.Н.* Применение методов авторегрессии для построения систем вибродиагностики ветроагрегатов. Відновлювана енергетика. 2005. №1. С. 49-54.

3. *Зварич В.Н., Марченко Б.Г.* Метод нахождения характеристических функций порождающих процессов для линейных процессов авторегрессии. Изв. Вузов Радиоэлектроника. 1999. т. 42. № 7. С.64-71.

4. *Зварич В.Н.* Использование решений обратной задачи линейных процессов авторегрессии для моделирования вибрационных сигналов узлов электротехнического оборудования. Технічна електродинаміка. 2016. № 2. С. 83-89.

5. *Зварич В.Н., Марченко Б.Г.* Характеристическая функция порождающего процесса в модели стационарного линейного AR гамма процесса. Известия ВУЗов «Радиоэлектроника». 2002. Т. 45. № 8. С. 12-18. ISSN 0021-3470.

6. *Красильников А.И.* Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования. Киев. Полиграф-сервис. 2014. 112 с.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

7. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. Киев. Наукова думка. 1992. 196 с.

8. *Марченко Б.Г., Зварич В.Н., Бедный Н.С.* Линейные случайные процессы в некоторых задачах моделирования информационных сигналов. Электронное моделирование. 2001. Т. 23. № 1. С. 62-69.

9. *Alliot P.* Some theoretical results on Markov-switching autoregressive models with gamma innovations. C.R. Acad. Sci. Paris. 2006. Ser. I 343. Pp. 271-274.

10. *Bayar T.* Putting Wind to the Test. Power Engineering International. 2015. No. 12. Pp. 16-18.

11. *Hoelf D.* When Virtual meets Reality. Power Engineering International. 2016. No. 9. Pp. 26-27.

12. *Lawrance A.J.* The Innovation Distributions for Gamma Distributed Autoregressive Process.Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications. 1982. Vol. 9. Pp. 234-236.

13. *Manning L.* Bearing up to turbine testing. Power Engineering International. – 2014. - No 2. pp. 32-34.

14. *McKenzie Ed.* Innovation Distributions for Gamma and Negative Binomial Autoregressions. Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications. 1987. Vol. 14. Pp. 79-85.

15. *Torres G.L., Garia A., Blas M.D., Francisco A.D.* Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). Solar energy. Vol.79. 2005. Pp. 65-77.

16. *Zvaritch V., Glazkova E.* Application of Linear AR and ARMA Processes for Simulation of Power Equipment Diagnostic System Information Signals. Proceedings 2015 16 th International Conference on Computational problems of Electrical Engineering (CPEE). Lviv. Ukraine. 2015. Pp. 259-261.

17. *Zvaritch V., Glazkova E.* Some Singularities of Kernels of Linear AR and ARMA Processes and Their Applications to Simulation of Information Signals. Computational Problems of Electrical Engineering. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 71-74.

REFERENCES

1. *Zvaritch V.N., Marchenko B.G.* Lineynyye protsessy avtoregressii v zadachakh vibrodiagnostiki uzlov elektricheskikh mashin. [Linear processes of autoregression in problems of vibrodiagnostics of sections of electric drivers]. Technical Diagnostics and Nondestructive Testing. 1996. No. 1. Pp.45–54. [in Russian].

2. *Zvarich V.N.* Primeneniye metodov avtoregressii dlya postroyeniya sistem vibrodiagnostiki vetroagregatov. [Autoregression methods application for development of wind generators diagnostic systems]. Vidnovluvana energetika. 2005. No. 1. Pp. 49-54. [in Russian].

3. *Zvarich V.N., Marchenko B.G.* Metod nakhozhdeniya kharakteristicheskikh funktsiy porozhdayushchikh protsessov dlya lineynykh protsessov avtoregressii. [Method of finding of generating processes characteristic functions of autoregression linear processes]. Radioelectronics and Communication Systems. 1999. v. 42. No. 7. Pp. 64-71. [in Russian].

4. *Zvarich V.N.* Ispolzovaniye resheniy obratnoy zadachi lineynykh protsessov avtoregressii dlya modelirovaniya vibratsionnykh signalov uzlov elektrotekhnicheskogo oborudovaniya. [Application of invers problem solutions of the linear autoregressive processes for power equipment vibromonitoring]. Tekhnichna Elektrodynamika. 2016. No. 2. Pp. 83-89. [in Russian].

5. *Zarich V.N., Marchenko B.G.* Kharakteristicheskaya funktsiya porozhdayushchego protsessa v modeli statsionarnogo lineynogo AR gamma protsessa. [Generating process characteristic function in the model of stationary linear AR-gamma process]. University News "Electronics". 2002. v. 45. No. 8. Pp. 12-18. ISSN 0021-3470. [in Russian].

6. *Krasilnikov A.I.* Modeli shumovykh signalov v sistemakh diagnostiki teploenergeticheskogo oborudovaniya. [Models of noise type signals at the diagnostic systems of heat power engineering equipment]. Kiev. Polygraph-service. 2014. 112 p. [in Russian].

7. *Marchenko B.G., Myslovich M.V.* Vibrodiagnostika podshipnikovykh uzlov elektricheskikh mashin. [Vibration Diagnosis of rolling bearings of electric driver parts]. M. Kiev. Naukova dumka. 1992. 196 p. [in Russian].

8. *Marchenko B.G., Zvarich V.N., Bedny N.S.* Lineinye sluchainye protsessy v nekotorykh zadachakh modelirovaniya informatsionnykh signalov. [Linear random processes in the some problems of information signals simulation]. Electronic modeling. [Elektronnoe modelirovanie]. 2001. v. 23. No. 1. Pp. 62-69. [in Russian].

9. 13. *Alliot P.* Some theoretical results on Markov-switching autoregressive models with gamma innovations. C.R. Acad. Sci. Paris. 2006. Ser. I 343. Pp. 271-274. [in English].

10. *Bayar T.* Putting Wind to the Test. Power Engineering International. 2015. No. 12. Pp. 16-18. [in English].

11. 9. *Hoelf D.* When Virtual meets Reality. Power Engineering International. 2016. No. 9. Pp. 26-27. [in English].

12. 12. *Lawrance A.J.* The Innovation Distributions for Gamma Distributed Autoregressive Process.Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications. 1982. Vol. 9. Pp. 234-236. [in English].

13. *Manning L.* Bearing up to turbine testing. Power Engineering International. – 2014. - No 2. pp. 32-34. [in English].

14. 12. *McKenzie Ed.* Innovation Distributions for Gamma and Negative Binomial Autoregressions. Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications. 1987. Vol. 14. Pp. 79-85. [in English].

15. 8. *Torres G.L., Garia A., Blas M.D., Francisco A.D.* Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). Solar energy. Vol.79. 2005. Pp. 65-77. [in English].

16. *Zvaritch V., Glazkova E.* Application of Linear AR and ARMA Processes for Simulation of Power Equipment Diagnostic System Information Signals. Proceedings 2015 16 th International Conference on Computational problems of Electrical Engineering (CPEE). Lviv. Ukraine. 2015. Pp. 259-261. [in English].

17. *Zvaritch V., Glazkova E.* Some Singularities of Kernels of Linear AR and ARMA Processes and Their Applications to Simulation of Information Signals. Computational Problems of Electrical Engineering. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 71-74. [in English].

ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕСОВ АВТОРЕГРЕССИИ С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ УЗЛОВ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОУСТАНОВОК

В.Н. Зварич, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины, 03680, г. Киев, пр-т Победы 56
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, г. Киев, ул. Гната Хаткевича, 20А

В работе рассмотрены некоторые методы диагностирования технического состояния энергетического оборудования. Приведены сравнения различных методов вибродиагностики, которые могут быть использованы при диагностировании технического состояния генераторов ветроустановок. Рассмотрено использование линейных случайных процессов для построения систем диагностики генераторов ветроустановок. Представлен метод нахождения характеристической функции порождающего процесса для линейного процесса авторегрессии второго порядка AR(2), что имеет

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Гамма-распределение. Свойства пуассоновский спектров прыжков используются для решения этой проблемы. Решение такой задачи, которую часто называют обратной базируется на свойства характеристической функции стационарного линейного случайного процесса авторегрессии AR(2), $\xi_t + a_1\xi_{t-1} + a_2\xi_{t-2} = \varsigma_t$, $t \in Z$, *где* $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$ *параметры авторегрессии;* $Z = \{..., -1, 0, 1, ...\}$ *множество целых чисел;* $\{\zeta_t, t \in Z\}$ *случайный процесс с дискретным временем и независимыми значениями, имеет бесконечно делимый закон распределения, который часто называют порождающим процессом. Иногда такую задачу называют обратной задачей. В статье отмечается что одномерный логарифм характеристической функции линейного стационарного процесса авторегрессии можно задать одномерной характеристической функцией в каноническом представлении Колмогорова*

$$\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,1) = im_\xi u + \int_{-\infty}^{\infty}\left\{e^{iux} - 1 - iux\right\}\frac{dK_\xi(x)}{x^2},$$

где параметр m_ξ *и спектральная функция прыжков* $K_\xi(x)$ *однозначно определяют характеристическую функцию. Логарифм характеристической функции линейного стационарного процесса авторегрессии может быть также записана в следующей форме* $\ln f_\xi(u,t) = \ln f_\xi(u,t) =$

$$= im_\zeta u \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\phi(\tau) + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left(e^{iux\phi(\tau)} - 1 - iux\phi(\tau)\right)\frac{dK_\zeta(x)}{x^2}$$

где параметры m_ς *и* $K_\zeta(x)$ *определяют характеристическую функцию порождающего процесса* ς_t *а* $\phi(\tau)$ *является ядром линейного случайного процесса* ξ_t. *Параметры* m_ξ *и* m_ς, *и пуассоновский спектра прыжков* $K_\xi(x)$ *взаимосвязаны следующим образом* $m_\xi = m_\zeta \sum_{\tau=0}^{\infty}\phi(\tau)$, $K_\xi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\phi(x,y)dK_\varsigma(y)$. $R_\phi(x,y)$ *является ядром преобразования которое является инвариантным к порождающему* ς_t *и определяется с помощью коэффициентов* $\{a_1,\ a_2 \neq 0\}$. *Свойства* $R_\phi(x,y)$ *используются для решения обратной задачи. Показан пример нахождения пуассоновский спектров прыжков и характеристической функции для линейного процесса авто регрессии второго порядка, что имеет Гамма-распределение Метод может быть использован для решения обратной задачи для авторегрессионных процессов других классов. Показано использование полученных результатов для моделирования вибрационных сигналов генератора ветроустановки. Библ. 17, рис. 5*

Ключевые слова: *линейный процесс авторегрессии, характеристическая функция, ядро преобразования, порождающий процесс, безгранично делимый закон распределения, Гамма-распределение, вибродиагностика генераторов ветроустановок.*

Стаття надійшла до редакції 06.06.19
Остаточна версія 17.09.19