

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ АВТОРЕГРЕССИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ УЗЛОВ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ*

В.Н. Зварич^{1,2}

¹Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
д. 20А, ул. Г. Хоткевича, Киев, 02094, Украина

²Институт электродинамики НАН Украины
д. 56, просп. Перемоги, Киев, 03680, Украина
тел./факс: +38 (044) 206-28-09, e-mail: zvaritch@nas.gov.ua

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.034-043

Заключение совета рецензентов: 21.06.18 Заключение совета экспертов: 05.07.18 Принято к публикации: 19.07.18

Показаны особенности моделирования вибрационных сигналов вращающихся узлов ветрогенераторов. Обосновано применение вибродиагностики как одного из наиболее перспективных методов диагностирования ветрогенераторов. Доказана целесообразность использования статистического подхода для решения задач вибродиагностики вращающихся узлов ветрогенераторов. Отмечается, что построение эффективной системы вибродиагностики состоит из нескольких этапов: формирование математической модели вибраций диагностируемого узла с учетом особенностей его работы; создание или выбор аппаратного и программного обеспечения; разработка методов построения решающих правил по диагностике узлов ветрогенератора; экспериментальная проверка предложенных методов вибродиагностики. Впервые для моделирования таких процессов используются решения обратной задачи линейных процессов авторегрессии. Метод нахождения характеристической функции порождающего процесса для линейного процесса авторегрессии второго порядка AR(2) применяется для решения такой задачи, которую называют обратной задачей. Используются свойства характеристической функции стационарного линейного случайного процесса авторегрессии, которую можно представить как в канонической форме Колмогорова, так и в форме линейного случайного процесса с дискретным временем, а также ядра преобразования для такого процесса. Представлены примеры нахождения характеристической функции для линейного процесса авторегрессии второго порядка, имеющего гамма-распределение. Применяются свойства ядра преобразования, ядра линейного процесса авторегрессии, а также свойства пуассоновских спектров скачков. Показано, каким образом применяются полученные результаты для нахождения характеристической функции вибросигнала ветрогенератора с целью моделирования таких процессов. Приводятся особенности применения данного подхода для моделирования вибраций подшипника качения ветрогенератора USW 56-100 со стороны корпуса главного вала, установленного на стенде для испытаний ветрогенераторов. Экспериментальные исследования показали, что вибрации такого узла можно моделировать линейным процессом авторегрессии второго порядка имеющего гамма-распределение. Найдена характеристическая функция порождающего процесса для такого линейного процесса авторегрессии. Приведены примеры ядер вибрационных сигналов ветрогенератора при использовании линейной модели авторегрессии для случая, когда данным методом можно решить обратную задачу, и для случая, когда решить обратную задачу невозможно.

Ключевые слова: линейный процесс авторегрессии; характеристическая функция; ядро преобразования; порождающий процесс; безгранично делимый закон распределения; вибродиагностика ветрогенераторов.

*Зварич В.Н. Использование решений обратной задачи линейных процессов авторегрессии для моделирования вибрационных сигналов вращающихся узлов ветрогенераторов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:34-43.

APPLICATION OF THE INVERSE PROBLEM SOLUTIONS OF LINEAR AUTOREGRESSIVE PROCESSES FOR SIMULATION OF VIBRATION SIGNALS OF ROTOR PATS WIND POWER GENERATORS

V.N. Zvaritch

¹Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine
20A G. Hotkevych Str., Kyiv-94, 02094, Ukraine

²Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine
56 Peremogy Av., Kyiv-57, 03680, Ukraine
tel./fax: +38 044 206-28-09, e-mail: zvaritch@nas.gov.ua

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.034-043

Referred 21 June 2018 Received in revised form 5 July 2018 Accepted 19 July 2018

Peculiar properties of vibration signals simulation of wind generators rotation nodes are considered. The application of vibration diagnosis as one of the most perspective diagnostic method of wind generators is justified. Advisability of statistical method application for the wind generators vibration diagnostics is proved. Mentioned, that effective vibration expert system designing is composed from several stages. First – mathematical model of node vibration with consideration of operation features should be elaborated. Second – it is necessary to develop hardware and software. Third – it is necessary to develop methods of decisive rules for wind generator nodes diagnosis. Fourth – it is necessary to carry out experimental verification of developed vibration diagnostic methods. Solution of inverse problem for autoregressive processes for the first time to apply for the problem solution. Generative process characteristic function finding method for linear autoregressive processes second-order AR(2) is used for the problem solution. Properties of characteristic functions of stationary linear autoregressive processes (AR) are discussed. The characteristic function may be represented as in canonical Kolmogorof form and in linear random process with discrete time form. Properties of transformation kernel and kernel of linear random process for the processes are also considered. Examples of Gamma second-order autoregressive generating process characteristic function determination are represented. Poisson jump spectra's properties of characteristic function of the linear autoregressive processes are also used for the solution of the problem. An example of application of vibration signal simulation of wind power generator is considered. Application of the results for characteristic function vibration signals of wind generator for modeling of the signals is shown. Features of application of the approach for modeling of rolling bearing vibration of wind generator USW 56-100 in frame of basic shift in radial direction near bearing at the side of wheel hub are considered.

Rotation speed of wind wheel hub was equal 72 rpm. The experimental research was shown that vibration signals of the node may be simulated of second-order autoregressive process with Gamma distribution of generating process. Characteristic function of generating process for the autoregressive process was calculated. The article considers examples of kernel of wing generation vibration signals when determination of inverse problem takes place and kernel of wing generation vibration signals when solution of inverse problem is impossible.

Keywords: linear autoregressive process; characteristic function; kernel of transformation; generative process; infinitely-divisible distributions; vibration diagnosis of wind power generators.



Валерий Николаевич
Зварич
Valerij Zvaritch

Сведения об авторе: д-р. техн. наук. стар. науч. сотрудник ИВЭ НАН Украины, вед. науч. сотрудник Института электродинамики НАН Украины.

Образование: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», радиотехнический факультет по специальности «Радиотехника» (1982 г.).

Область научных интересов: возобновляемая энергетика; обработка сигналов; экспертные системы.

Публикации: 86, в том числе 1 патент.
ORCID: 0000-0002-1271-495

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Senior Researcher at the Institute of Renewable Energy at the National Academy of Sciences of Ukraine, Leading Researcher at the Institute of Electrodynamics at the National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute (Radioengineering), 1982.

Research interests: renewable energy; signal processing; expert systems.

Publications: 86, including 1 patent.



1. Введение

Включение современных систем диагностирования в состав ветроэнергетических установок (ВЭУ) может существенно повысить надежность их функционирования [1, 2].

Системы технической диагностики энергетического оборудования достаточно разнообразны и базируются на различных методах: тепловой контроль и диагностика; контроль технического состояния на основе анализа электрических и магнитных полей; вибродиагностика; акустическая диагностика; диагностика на основе методов акустической эмиссии и т.д. Следует отметить, что допуски силы тока и температуры достаточно велики и существенно превышают те значения, которые достигаются при появлении различных потенциально опасных дефектов, особенно на ранних стадиях. Показатели надежности работы энергооборудования устанавливаются в результате совместного влияния факторов, определяющих условия эксплуатации и описывающих свойства такого оборудования. Сочетание этих факторов носит случайный характер, поэтому статистические методы для решения задач диагностирования могут применяться во многих практических случаях.

Одними из наиболее перспективных систем диагностирования оборудования являются системы вибродиагностики, дающие возможность выявлять дефекты на ранней стадии [3–5].

Решение задачи построения эффективной системы диагностирования узлов ветрогенераторов (ВГ) при таком подходе проводят в несколько этапов:

- 1) построение математической модели диагностических сигналов;
- 2) создание и выбор соответствующего программно-технического обеспечения, на базе которого реализуются эти системы;
- 3) разработка методов построения решающих правил по диагностике ВГ.

Впервые в данной работе для решения задач диагностики узлов ВГ предлагается использовать методы, основанные на линейных процессах авторегрессии, которые применяются для моделирования, в частности, диагностических сигналов, возникающих при работе ВГ. Базируются такие модели на теории линейных случайных процессов и разностных уравнений [3, 5–13].

Целесообразность такого подхода заключается в следующем. Как правило, современные системы мониторинга, контроля и диагностики содержат контроллер, микро-ЭВМ, ПК или промышленный компьютер и, следовательно, аналогово-цифровой преобразователь, то есть обрабатываются дискретные сигналы. Первичные преобразователи (датчики информационных сигналов) также размещают в определенных точках.

AR, MA, ARMA модели или их модификации имеют преимущества по сравнению с другими математическими моделями вибрационных сигналов узлов электротехнического оборудования, поскольку позволяют быстро восстановить реализации вибрационных сигналов, используя параметры таких процессов. При этом модели AR применяются не только в задачах диагностирования технического состояния ветрогенераторов, но и, например, для оценки и прогнозирования скорости ветра [14]. Однако задача восстановления усложняется, если вибрационный сигнал имеет распределение, отличное от нормального.

В данной статье рассматривается возможность применения статистического подхода и использования линейных процессов авторегрессии [5–9, 13, 14] для построения алгоритмов моделирования вибросигналов вращающихся узлов ВГ, что чрезвычайно важно для проектирования таких энергетических установок, построения испытательных стендов, а также тренажеров для подготовки обслуживающего персонала ВГ [1, 4, 8, 15].

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
ϕ, τ	Ядро линейного случайного процесса ξ_t
θ	Параметр характеристической функции гамма-распределения
τ	Параметр сдвига
ξ_t	Наблюдаемый случайный процесс
ζ_t	Порождающий случайный процесс
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$a_1 \dots a_p$	Параметры авторегрессии
b	Параметр характеристической функции гамма-распределения
$f_{\xi} u, t$	Характеристическая функция наблюдаемого процесса ξ_t
$f_{\zeta} u, t$	Характеристическая функция порождающего процесса ζ_t
i	Знак мнимой единицы
$K_{\xi} x$	Спектральная функция скачков в формуле А.Н. Колмогорова, однозначно определяющая характеристическую функцию наблюдаемого процесса ξ_t



Продолжение списка обозначений

$K_{\zeta} x$	Спектральная функция скачков в формуле А.Н. Колмогорова, однозначно определяющая характеристическую функцию порождающего процесса ζ_t
M	Знак математического ожидания
m_{ξ}	Параметр, определяющий характеристическую функцию наблюдаемого процесса ξ_t
m_{ζ}	Параметр, определяющий характеристическую функцию порождающего процесса ζ_t
p	Порядок авторегрессии
$R_f x, y$	Ядро преобразования
$r t, n$	Корреляционная функция процесса ξ_t
t	Время
U	Функция Хевисайда
Z	Множество целых чисел
Аббревиатуры	
AR	Авторегрессия
ARMA	Авторегрессия скользящего среднего
ВГ	Ветрогенератор
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
МА	Скользящего среднего

2. Теоретический анализ

Основной особенностью линейных процессов авторегрессии является возможность их использования для описания негауссовых случайных сигналов, имеющих безгранично делимые распределения.

Линейные процессы авторегрессии задаются следующим разностным уравнением:

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

где $a_j, a_j \neq 0, j = \overline{1, p}$ – параметры авторегрессии, представляющие собой действительные числа; Z – множество целых чисел; p – порядок авторегрессии; $\zeta_t, t \in Z$ – некоторый однородный случайный процесс с дискретным временем и независимыми значениями, имеющий безгранично делимый закон распределения $P \zeta_0 = 0 = 1$. Этот процесс часто называют порождающим процессом для ξ_t .

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

где параметры $m_{\zeta}, K_{\zeta} x$ определяют характеристическую функцию порождающего процесса ζ_t , а $\phi \tau$ – ядро линейного случайного процесса ξ_t . В соотношениях (3) и (4) $K_{\xi} x, K_{\zeta} x$ являются неубывающими ограниченными функциями – такими, что $K_{\xi} -\infty = 0, K_{\zeta} -\infty = 0$.

Предполагается, что выполняется соотношение:

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

Логарифм одномерной характеристической функции для линейного стационарного процесса с дискретным временем в канонической форме Колмогорова определяют следующим образом:

$$\begin{aligned} \ln f_{\xi} u, t &= \ln f_{\zeta} u, 1 = \\ &= im_{\zeta} u + \int_{-\infty}^{\infty} e^{iux} - 1 - iux \frac{dK_{\zeta} x}{x^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь параметр m_{ζ} и спектральная функция скачков А.Н. Колмогорова $K_{\zeta} x$ однозначно определяют характеристическую функцию [16, 17–21].

Но логарифм характеристической функции линейного процесса с дискретным временем записывают и в другой форме [5, 6, 18–22]:

Параметры m_{ξ} и m_{ζ} и спектр скачков $K_{\xi} x$ и $K_{\zeta} x$ пуассоновского процесса связаны между собой следующим образом (в предположении, что процесс ξ_t является стационарным, а ζ_t – однородным):

$$m_{\xi} = m_{\zeta} \sum_{\tau=0}^{\infty} \phi \tau, \quad (5)$$

$$K_{\xi} x = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\phi} x, y dK_{\xi} y, \quad (6)$$

где, $R_{\phi} x, y$ – ядро преобразования.

Свойства ядра $\phi \tau$ важны для решения обратной задачи – определения характеристической функции порождающего процесса ζ_t , – если известна характеристическая функция наблюдаемого процесса ξ_t и ядро наблюдаемого процесса $\phi \tau$. Некоторые результаты исследований возможности решения обратной задачи для линейных случайных процессов с непрерывным временем приведены в [16, 17]. Для стационарных процессов авторегрессии первого порядка AR(1), имеющих гамма- и отрицательное биномиальное распределение [18–20].

Ядро преобразований $R_{\phi}(x, y)$ для стационарных линейных процессов с дискретным временем находят таким образом [16]:

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

где $\phi \tau$ – ядро линейного случайного процесса с дискретным временем; $U \cdot$ – функция Хевисайда.

Ядро преобразования $R_{\phi}(x, y)$ однозначно связано с ядром линейного случайного процесса $\phi \tau$. Интеграл (6) есть интеграл Лебега-Стилтьеса.

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

Отсюда

$$dK_{\xi} x = b x \exp -x/\theta dx, \quad x \geq 0. \quad (10)$$

Предполагается, что выполняются соотношения $a_1, a_2 < 0$, $a_1^2 + 4a_2 < 0$, $|a_1 + a_2| < 1$, $|a_1 - a_2| < 1$, $-1 < |a_2| < 1$, $|a_1| < 1 - a_2$.

Ядро преобразования $R_{\phi} x, y$ согласно (7) определяется следующим образом:

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

$$K_{\xi} y = \begin{cases} b \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right|^{-1} \int_0^y x \exp -x/\theta dx, & y > 0; \\ 0, & y = 0. \end{cases} \quad (13)$$

В данной работе рассмотрены особенности решения для таких процессов обратной задачи (то есть нахождения характеристической функции порождающего процесса, если наблюдается линейный процесс с дискретным временем и известна его характеристическая функция). Для решения обратной задачи предполагается существование формулы обращения для интеграла (6).

Пусть линейный процесс авторегрессии ξ_t имеет гамма-распределение с одномерной характеристической функцией [23]:

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

Случайный процесс ξ_t является строго стационарным и для него выполняется эргодическая теорема [21], то есть

$$1) M |\xi_t| < \infty, \\ 2) \frac{1}{m^2} \sum_{t=0}^m \sum_{n=0}^m r_{t,n} \rightarrow 0 \quad \text{при } m \rightarrow \infty,$$

$r_{t,n} = M[\xi_t - M\xi_t \quad \xi_n - M\xi_n]$ – корреляционная функция процесса ξ_t .

В этом случае пуассоновский спектр скачков процесса в формуле Колмогорова определяется следующим образом (9):

Обратное ядро преобразования

$$R_{\phi}^{-1} x, y = \begin{cases} \left[\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right]^{-1} & 0 \leq \phi \tau y < x; \\ 0 & \phi \tau y > x; \quad x < 0; \quad y = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Пуассоновский спектр скачков порождающего процесса ζ_t для рассматриваемого случая определяется следующим соотношением (13) [20]:



Отсюда

$$K_{\zeta} y = \begin{cases} b \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right|^{-1} \theta - \theta + y \exp -y/\theta, & y > 0; \\ 0, & y = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Тогда

$$dK_{\zeta} y = \theta b \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right|^{-1} y \exp -y/\theta dy, \quad y > 0, \quad (15)$$

и логарифм характеристической функции порождающего процесса определяется следующим образом:

$$\ln f_{\zeta} u; t = |t| \ln f_{\zeta} u; 1 = i\theta b |t| \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi \tau \right|^{-1} u + b\theta |t| \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right|^{-1} \int_0^{\infty} \exp iyu - 1 - iuy \frac{\exp -y/\theta}{y} dy, \quad (16)$$

$$t \in Z,$$

где $\theta > 0$, $b > 0$, $y > 0$, $|a_1| < 1 - a_2$.

После интегрирования получим

$$\ln f_{\zeta} u; t = |t| \ln f_{\zeta} u; 1 = i\theta b |t| \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi \tau \right|^{-1} u + b\theta |t| \left| \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi^2 \tau \right|^{-1} [iu - 1 - \theta - \ln 1 - iu\theta], \quad (17)$$

$$t \in Z,$$

где $\theta > 0$, $b > 0$, $y > 0$.

3. Методика эксперимента

В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим вибрационный сигнал ξ_t вращающего узла подшипника качения ВГ USW 56-100 (рис. 1) со стороны корпуса главного вала, установленного на стенде для испытаний ветрогенераторов [8, 22]. Скорость вращения главного вала составляет 72 об/мин. Для исследований вибрационных сигналов использовался разработанный в ИЭД НАН Украины прототип системы диагностики ВГ, с помощью которого были получены оценки параметров авторегрессии вибрационных сигналов, а также параметры их распределений [8].

В точке 1 вибрационный сигнал моделируется линейным процессом авторегрессии второго порядка с коэффициентами авторегрессии $a_1 = 0,552$ и $a_2 = -0,0036$, то есть

$$\xi_t + 0,552\xi_{t-1} - 0,0036\xi_{t-2} = \zeta_t. \quad (18)$$

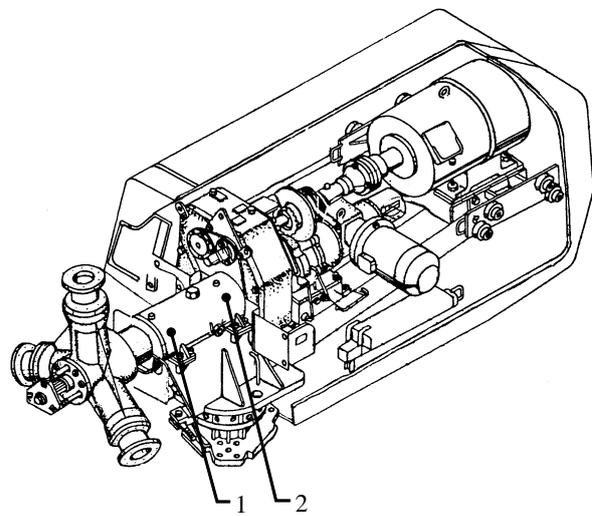


Рис. 1 – Крепление датчиков для исследования вибраций ВГ USW 56-100: точка 1 – акселерометр размещен в радиальном направлении по отношению к валу возле подшипника со стороны ступицы ветроколеса; точка 2 – акселерометр размещен в радиальном направлении по отношению к валу возле подшипника со стороны трансмиссии

Fig. 1 – Clamping of accelerometers for USW 56-100 wind generator vibration signals research: 1 – point accelerometer is set on the basic shift in radial direction near bearing at the side of wind wheel hub; point 2 – accelerometer is set on the basic shift in radial direction near bearing at the side of transmission

Процесс ξ_t имеет гамма распределение с параметрами $\theta > 0$, $b > 0$, одномерная характеристическая функция которого задана соотношением (8). В рассматриваемом случае ядро линейного случайного

процесса авторегрессии ϕ_τ является убывающей положительной функцией. Результаты моделирования ядра представлены на рис. 2.

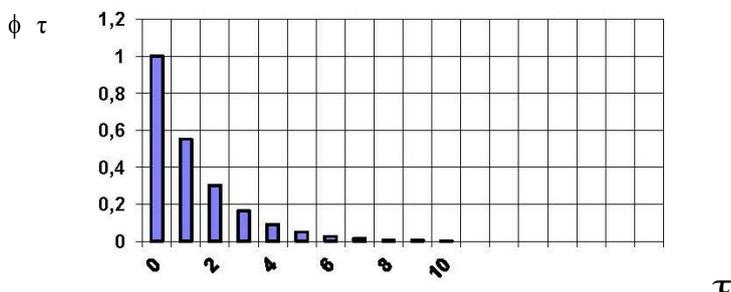


Рис. 2 – Ядро ϕ_τ линейного процесса авторегрессии AR(2) с параметрами $a_1 = 0,552$ и $a_2 = -0,0036$

Fig. 2 – The kernel ϕ_τ of the linear autoregressive process AR(2) with parameters $a_1 = 0.552$ and $a_2 = -0.0036$

Методами математического моделирования определялись значения параметров логарифма характеристической функции (17) $\left[\sum_{\tau=0}^n \phi_\tau \right]^{-1} = 0,452$ и

$\left[\sum_{\tau=0}^n \phi_\tau^2 \right]^{-1} = 0,694$ при объеме выборки $n = 1\ 000$. Тогда логарифм характеристической функции порождающего процесса ζ_t процесса авторегрессии (16) определяется следующим образом:

$$\ln f_{\zeta_t}(u; t) = |t| \ln f_{\zeta_t}(u; 1) = 0,452|t| \ln [1 - a_1 u - a_2 u^2] + 0,694|t| \int_0^\infty \exp(iyu - 1 - iuy) \frac{\exp -y/\theta}{y} dy =$$

$$= b\theta |t| [0,452iu + 0,694 [iu(1 - \theta) - \ln(1 - iu\theta)]] . \tag{19}$$

Однако обратную задачу для линейных процессов авторегрессии не всегда можно решить. В точке 2 вибрационный сигнал моделируется процессом авторегрессии второго порядка с коэффициентами авторегрессии $a_1 = 0,76875$ $a_2 = -0,2813$, то есть

Ядро линейного процесса авторегрессии показано на рис. 3 и не является убывающей положительной функцией.

В связи с этим решение обратной задачи для линейного процесса авторегрессии, имеющего такое ядро, не представляется возможным.

$$\xi_t + 0,76875\xi_{t-1} - 0,2813\xi_{t-2} = \zeta_t, \tag{20}$$

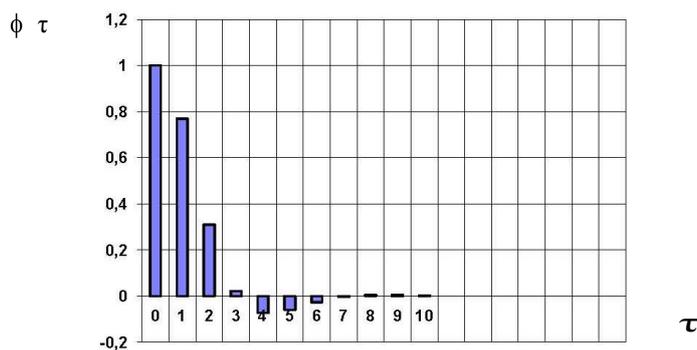


Рис. 3 – Ядро ϕ_τ линейного процесса авторегрессии AR(2) с параметрами $a_1 = 0,76875$ и $a_2 = -0,2813$

Fig. 3 – The kernel ϕ_τ of the linear autoregressive process AR(2) with parameters $a_1 = 0,76875$ and $a_2 = -0,2813$

Если исследования показывают, что для линейного процесса авторегрессии, имеющего безгранично-делимое распределение, с помощью которого моделируется вибрационный процесс, решается обратная задача, то с заранее заданной вероятностью (с которой оцениваются параметры авторегрессии и параметры распределения процесса), можно, используя соответствующие датчики случайных чисел с из-

вестными характеристиками распределения, восстановить реализацию вибрационного процесса для последующего использования [26].

4. Заключение

В отличие от методов нахождения характеристических функций порождающего процесса AR(1), из-



ложенных в [18, 19], предложенный метод позволяет построить характеристическую функцию порождающих процессов для линейных стационарных процессов авторегрессии не только первого и второго порядка, имеющих гамма-распределение, но и более высоких порядков. Такой метод целесообразно применять и для нахождения порождающих процессов для линейных процессов авторегрессии более высоких порядков, а также для вибрационных сигналов ветрогенераторов, имеющих другие безгранично-делимые распределения, предварительно исследовав свойства ядра $\phi(\tau)$, которое должно быть убывающей положительной функцией. Как показано в приведенных в статье экспериментальных исследованиях, это не всегда возможно.

Данный метод, по сравнению с традиционными спектральными методами на основании преобразования Фурье, позволяет более точно проводить моделирование вибрационных процессов с учетом центральных моментов высоких порядков и диагностику на ранних этапах возникновения неисправностей.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения научных проектов целевых программ Национальной академии наук Украины «Ресурс-2» и «Об'єднання-3» и других программ.

Acknowledgments

The article was prepared as a part of implementation of research projects of target programs of the National Academy of Sciences of Ukraine "Resurs-2" and "Ob'ednannya-3", and other programs.

Список литературы

- [1] Manning, L. Bearing up to turbine testing / L. Manning // Power Engineering International. – 2014. – No. 2. – P. 32–34.
- [2] Babak, V. Optimization of Signal Features under Object's Dynamic Test / V. Babak, S. Filonenko, I. Kornienko-Miftakhova, A. Ponomarenko // Aviation, – 2008 – Vol.12. – No. 1. – P. 10– 17.
- [3] Gyzhko, Y.I. To use of spectral windows in analysis of vibration signals / Y.I. Gyzhko, M.V. Myslovych, R.M. Sysak // Przegląd Electrotechniczny. – 2013. – Vol.89. – Iss. 2A. – P. 294–296.
- [4] Bayar, T. Putting Wind to the Test. / T. Bayar // Power Engineering International. – 2015. – No. 12. – P. 16–18.
- [5] Зварич, В.Н. Линейные процессы авторегрессии в задачах вибродиагностики узлов электрических машин / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – № 1. – С. 45–54.
- [6] Зварич, В.Н. Линейные процессы авторегрессии в задачах вибродиагностики / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко // Проблемы прочности и надежности машин. – 1994. – № 3. – С. 96–106.
- [7] Марченко, Б.Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. / Б.Г. Марченко, М.В. Мыслович. – Киев: Наукова думка. 1992. – 196 с.
- [8] Зварич, В.Н. Применение методов авторегрессии для построения систем вибродиагностики ветроагрегатов / В.Н. Зварич // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 1. – С. 49–54.
- [9] Zvaritch, V. Application of Linear AR and ARMA Processes for Simulation of Power Equipment Diagnostic System Information Signals / V. Zvaritch, E. Glazkova // Proceedings 2015 16 th International Conference on Computational problems of Electrical Engineering (CPEE) Lviv, Ukraine, September 2–5, 2015. – P. 259–261.
- [10] Zvaritch, V. White Noise in Information Signals Models / V. Zvaritch, M. Myslovitch, B. Martchenko. // Applied Mathematics Letters. – 1994. – Vol. 7. – No. 3. – P. 93–95.
- [11] Zvaritch, V. The Model of Random Periodic Information Signals on the White Noise Bases. / V. Zvaritch, M. Myslovitch, B. Martchenko. // Applied Mathematics Letters. – 1995. – Vol.8. – No. 3. – P. 87–89.
- [12] Marchenko, N. Vibration diagnostics of wind-driven power units with usage of statistical expert systems / N. Marchenko, M. Myslovich, R. Sysak // Przegląd Electrotechniczny. – 2005. – Vol.89. – Issue 2A. – P.294–296.
- [13] Zvaritch, V. Some Singularities of Kernels of Linear AR and ARMA Processes and Their Applications to Simulation of Information Signals. / V. Zvaritch V. Glazkova E. // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 5. – No. 1. – P. 71–74.
- [14] Torres, G.L. Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain) / G.L. Torres, A. Garia, M.D. Blas, A.D. Francisco // Solar energy. – 2005. – Vol.79. – No.1. – P. 65–77.
- [15] Hoelf, D. When Virtual meets Reality. / D. Hoelf // Power Engineering International. – 2016. – No. 9. – P. 26–27.
- [16] Красильников, А.И. Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования / А.И. Красильников. – Киев: Полиграф-сервис, 2014. – 112 с.
- [17] Красильников, А.И. Класс негауссовских распределений с нулевыми коэффициентами асимметрии и эксцесса. / А.И. Красильников // Изв. Вузов Радиоэлектроника. – 2013. – Т.56. – № 6. – С. 56–63.
- [18] Lawrance, A.J. The Innovation Distributions for Gamma Distributed Autoregressive Process / A.J. Lawrance // Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications. – 1982.– Vol. 9.– P. 234–236.
- [19] McKenzie, Ed. Innovation Distributions for Gamma and Negative Binomial Autoregressions / Ed. McKenzie // Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications.– 1987.–Vol. 14.– P. 79–85.



[20] Alliot, P. Some theoretical results on Markov-switching autoregressive models with gamma innovations / P. Alliot // C.R. Acad. Sci. Paris. – Ser. I 343 – P.271–274.

[21] Зварич, В.Н. Метод нахождения характеристических функций порождающих процессов для линейных процессов авторегрессии / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко// Изв. Вузov Радиoeлектроника.– 1999. – Т. 42. – № 7. – С. 64–71.

[22] Зварич, В.Н. Использование решений обратной задачи линейных процессов авторегрессии для моделирования вибрационных сигналов узлов электротехнического оборудования / В.Н. Зварич // Технічна електродинаміка – 2016. – № 2. – С. 83–89.

[23] Зварич, В.Н. Характеристическая функция порождающего процесса в модели стационарного линейного AR гамма процесса / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко// Изв. вузов Радиoeлектроника. – 2002. – Т.45. – № 8. – С. 12–18.

[24] Зварич, В.Н. Линейные случайные процессы в некоторых задачах моделирования информационных сигналов / Б.Г. Марченко, В.Н. Зварич Н.С. Бедный // Электронное моделирование. – 2001. – Т.23. – №1. – С. 62–69.

[25] Зварич, В.Н. Особенности нахождения характеристической функции порождающего процесса в модели стационарного линейного AR(2) процесса с отрицательным биномиальным распределением / В.Н. Зварич// Изв. ВУЗов Радиoeлектроника. – 2016. – Т.59. – № 12. – С. 50–57.

[26] Головкин, В.М. Имитационная модель для анализа параметров автономных ветроэлектрических установок с асинхронным генератором / М. Головкин [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» –2017. – Т.16. – № 4. – С. 42–51.

References

[1] Manning L. Bearing up to turbine testing. *Power Engineering International (PEI)*, 2014;(2):32–34 (in Eng.).

[2] Babak V., Filonenko S., Kornienko-Miftakhova I., Ponomarenko A. *Optimization of Signal Features under Object's Dynamic Test, Aviation*, 2008;12(1):10–17 (in Eng.).

[3] Gyzhko Y.I., Myslovich M.V., Sysak R.M. To use of spectral windows in analysis of vibration signals. *Przeglad Electrotechniczny*, 2013;89(2A):294–296 (in Eng.).

[4] Bayar T. Putting Wind to the Test. *Power Engineering International*, 2015;(12):16–18 (in Eng.).

[5] Zvarich V.N., Marchenko B.G. Linear processes of autoregression in vibrodiagnostics problems (Lineinye protsessy avtoregressii v zadachakh vibrodiagnostiki). *Problemy Prochnosti i Nadezhnosti Mashin*, 1994;(3):96–106 (in Russ.).

[6] Zvaritch V.N., Marchenko B.G. Linear processes of autoregression in problems of vibrodiagnostics of

sections of electric drivers. *Technical Diagnostics and Nondestructive Testing*, 1996;8(1):45–54 (in Eng.).

[7] Marchenko B.G., Myslovich M.V. Vibration Diagnosis of rolling bearings of electric driver parts (Vibrodiagnostika podshipnikovykh uzlov elektricheskikh mashin.). Moscow – Kiev: Naukova dumka Publ., 1992; 196 p. (in Russ.).

[8] Zvarich V.N. Autoregression methods application for development of wind generators diagnostic systems (Primenenie metodov avtoregressii dlya postroeniya sistem vibrodiagnostiki vetroagregatov). *Renewable Power Engineering (Vozobnovlyayemaya energetika)*, 2005;(1):49–54 (in Russ.).

[9] 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, September 2–5, 2015; 259–261 (in Eng.).

[10] Zvaritch V., Myslovitch M., Martchenko B. White Noise in Information Signals Models. *Applied Mathematics Letters*, 1994;7(3):93–95 (in Eng.).

[11] Zvaritch V., Myslovitch M., Martchenko B. The Model of Random Periodic Information Signals on the White Noise Bases. *Applied Mathematics Letters*, 1995;8(3):87–89 (in Eng.).

[12] Marchenko N., Myslovich M., Sysak R. Vibration diagnostics of wind-driven power units with usage of statistical expert systems. *Przeglad Electrotechniczny*, 2005;89(2A):294–296 (in Eng.).

[13] 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;5(1):71–74 (in Eng.).

[14] 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*, 2005;79(1):65–77 (in Eng.).

[15] Hoelf D. When Virtual meets Reality. *Power Engineering International*, 2016;(9):26–27 (in Eng.).

[16] Krasilnikov A.I. Models of noise type signals at the diagnostic systems of heat power engineering equipment (Modeli shumovykh signalov v sistemakh diagnostiki teploenergeticheskogo oborudovaniya). Kiev: Polygraph-service, 2014; 112 p.(in Russ.).

[17] Krasilnikov A.I. Class of non-Gaussian distributions with zero skewness and curtosis. *Radioelectronics and Communication Systems*, 2013;56(6):312–320 (in Eng.).

[18] Lawrance A.J. The Innovation Distributions for Gamma Distributed Autoregressive Process, *Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications*, 1982;9:234–236 (in Eng.).

[19] McKenzie Ed. Innovation Distributions for Gamma and Negative Binomial Autoregressions, *Scandinavian Journal of Statistics. Theory and Applications*, 1987;14:79–85 (in Eng.).



[20] Alliot P. Some theoretical results on Markov-switching autoregressive models with gamma innovations. *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. I* 343; pp. 271–274 (in Eng.).

[21] Zvarich V.N., Marchenko B.G. Method of finding of generating processes characteristic functions of autoregression linear processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, 1999;42(7):64–71 (in Eng.).

[22] Zvarich V.N. Application of invers problem solutions of the linear autoregressive processes for power equipment vibromonitoring (Ispol'zovanie reshenii obratnoi zadachi lineinykh protsessov avtoregressii dlya modelirovaniya vibratsionnykh signalov uzlov elektrotekhnicheskogo oborudovaniya). *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016;(2):83–89 (in Russ.).

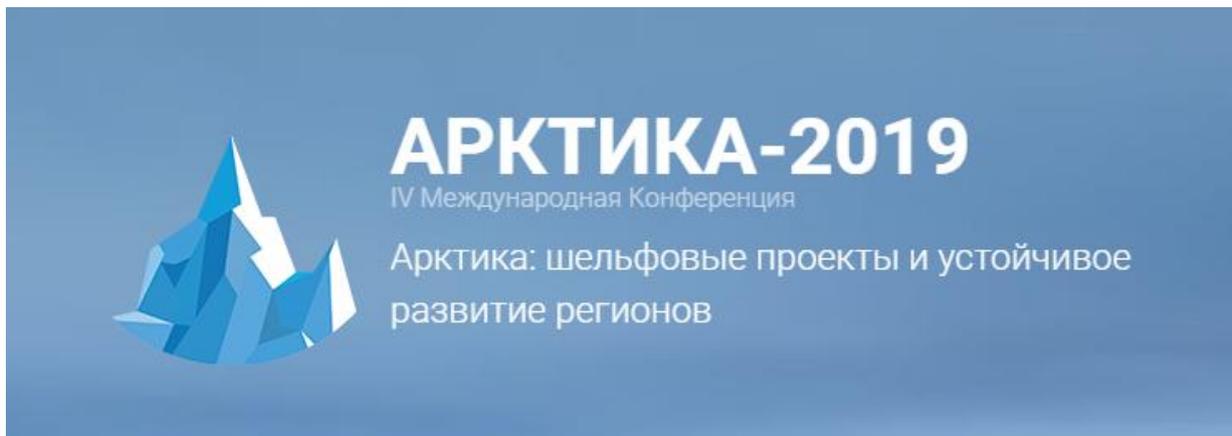
[23] Zarich V.N., Marchenko B.G. Generating process characteristic function in the model of stationary linear AR-gamma process. *Radioelectronics and Communication Systems*, 2002;45(8):7–11 (in Eng.).

[24] Zvarich V.N., Marchenko B.G., Bedny N.S. Linear random processes in the some problems of information signals simulation (Lineinye sluchainye protsessy v nekotorykh zadachakh modelirovaniya informatsionnykh signalov). *Electronic modeling (Elektronnoe modelirovanie)*, 2001;23(1):62–69 (in Russ.).

[25] Zvarich V.N. Peculiarities of finding characteristic functions of generating process in the model of stationary linear AR(2) process with negative binomial distribution. *Radioelectronics and Communication Systems*, 2016;59(12):567–573 (in Eng.).

[26] Golovko V.M., Kohanevich V.P., Shihaylov M.O., Sandoval K., Donets A.M. Simulation model of autonomous electric wind units with asynchronous generator for analysis of parameters (Imitatsionnaya model' dlya analiza parametrov avtonomnykh vetroelektricheskikh ustanovok s asinkhronnym generatorom). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;16(4):42–51 (in Russ.).

Транслитерация по BSI



ГАУ ВО «Волгоградский областной бизнес-инкубатор» информирует: 20–21 февраля 2019 года в г. Москве состоится IV Международная конференция «Арктика: шельфовые проекты и устойчивое развитие регионов» («Арктика-2019»).

Цели мероприятия:

- содействовать устойчивому социально-экономическому развитию и освоению Арктики;
- стимулировать научно-техническую и инновационную деятельность в регионе;
- создать благоприятные условия для привлечения инвестиций в проекты развития Арктической зоны Российской Федерации.

Ежегодно в конференции принимают участие представители Федерального Собрания Российской Федерации, федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов РФ, крупнейших российских и зарубежных компаний нефтегазовой отрасли и смежных с ней отраслей, представители бизнеса, а также делегаты от научных, исследовательских и проектных институтов и организаций.

<http://vinkub.ru/info/news/iv-international-conference-arctic-2019/>