

inertial and other loading in the blade, in accordance determines the lifetime of the blade and wind turbine as a whole.

Today the mathematical models of the orientation systems of the rotor in the direction of air flow, taking into account a number of parameters and system performance orientation of the rotor. It is necessary to take into account the continuous improvement of designs of wind turbines rotor orientation, which requires amending the already proven mathematical models of wind turbines rotor orientation, and some assumptions in making mathematical models can dramatically change the picture of the physical process.

In this paper an improved mathematical model based orientation rotor gyroscopic torque that occurs during orientation of the rotor in the direction of air flow. This mathematical model allows to obtain an equation for calculating the velocity of the orientation of the rotor depending on the wind speeds, the angle of deflection of the rotor from the direction of air flow and a number of system design parameters orientation of the rotor, which in turn allows to identify energy losses and gyroscopic loads on structural elements of wind turbines in process orientation rotor.

Стаття надійшла до редакції 23.05.17

Остаточна версія 23.08.17

УДК 621.519.2

**П.Ф.Васько**<sup>1</sup>, докт.техн.наук, **А.П.Вербовий**<sup>2</sup>, канд.техн.наук, **С.Т.Пазич**<sup>3</sup> (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### Реалізація стохастичної двопараметричної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики

*Розроблено реалізацію стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для використання в сучасних математичних пакетах. Моделювання поривів швидкості вітру здійснено шляхом генерування двох послідовностей випадкових величин. Розподіл амплітуд поривів підпорядкований нормальному закону, а тривалості поривів – закону Пуассона. Бібл. 24, табл. 2, рис. 5.*

**Ключові слова:** вітрогенератор, вітер, випадкова величина, модель, порив вітру, швидкість вітру.

Orcid: <sup>1</sup>0000-0001-8807-7173; <sup>2</sup>0000-0003-2838-6032; <sup>3</sup>0000-0002-6310-9842

**Вступ.** При розв'язанні науково-технічних задач, пов'язаних із проектуванням, дослідженням робочих режимів, оптимізацією параметрів, техніко-економічним обґрунтуванням використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) різного призначення широкого вжитку набуло математичне моделювання процесів перетворення енергії вітрового потоку в механічну енергію обертового руху, теплову та електричну енергію. Дослідження режимів роботи складових частин ВЕУ та установки в цілому потребує застосування адекватних моделей зміни швидкості вітру в часі відповідно до постановки задачі. Динаміка механічних процесів ВЕУ моделюється нелінійним диференціальним рівнянням руху обертових частин [1, 2]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(v(t), \omega, \beta) - \sum M_c(\omega), \quad (1)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання валу вітрогенератора;  $J$  – сумарний момент інерції всіх обертових мас, приведений до валу вітрогенератора;  $t$  – поточний час;  $v(t)$  – залежність швидкості вітру від часу;  $\beta$  – кут повороту лопаті вітрогенератора;  $M(v(t), \omega, \beta)$  – момент, що розвиває вітрогенератор;  $\sum M_c(\omega)$  – сумарний момент опору від сил тертя і навантаження.

Момент, що розвиває вітрогенератор, істотно залежить від швидкості вітру, тому точність, з якою задається  $v(t)$ , впливає на результати мо-

делювання режимів роботи як вітротурбіни, так і всієї електромеханічної системи ВЕУ [3, 4]. При розробленні систем автоматичного керування ВЕУ для опису турбулентної складової швидкості вітру  $v(t)$  використовують моделі спектральної щільності  $S(f)$ , найбільш відомими серед яких є функції Давенпорта та Кармана [5, 6], а також спектральна модель Каймала, що рекомендована міжнародним стандартом [7] для визначення механічних навантажень елементів конструкції на етапі проектування. Відомі також пропозиції використання для моделювання швидкості вітру гармонічних рядів [8, 9] та широтно-імпульсних моделей [10], але вони не знайшли широкого застосування у зв'язку з невизначеністю функціональних залежностей між амплітудою і частотою пульсацій швидкості вітру, довільний вибір яких може призвести до суперечливих результатів.

Для визначення енергетичних показників ВЕУ з урахуванням динаміки вітрового потоку можуть бути застосовані і стохастичні моделі поздовжньої складової швидкості вітру [11, 12]. В даній публікації розглянута реалізація стохастичної моделі, розробленої в [12] для нормованого 10-ти хвилинного проміжку часу, засобами Simulink прикладного пакету MATLAB.

**Теоретичне обґрунтування.** Будемо розглядати швидкість вітру як випадкову величину, яка з достатньою точністю моделюється рівнянням [13, 14]:

$$v(t) = v_{cp} + v'(t) = v_{cp} + \tau^{-1} \int_0^{\tau} v(t) dt + v'(t), \quad (2)$$

де  $v(t)$ ,  $v_{cp}$  – миттєве і середнє значення швидкості вітру;  $\tau$  – інтервал осереднення швидкості вітру;  $v'(t)$  – пориви швидкості вітру відносно середнього значення (рис. 1).

При моделюванні поривів швидкості вітру практичний інтерес являє собою 10-хвилинний інтервал часу  $\tau$ , тривалість якого забезпечує отримання достовірних значень  $v_{cp}$  [15]. У рівнянні (2) складова  $v'(t)$  є випадковою величиною, тому для моделювання зміни швидкості ві-

ру достатньо ймовірної моделі пульсацій з урахуванням результатів фактичних спостережень на інтервалі осереднення.

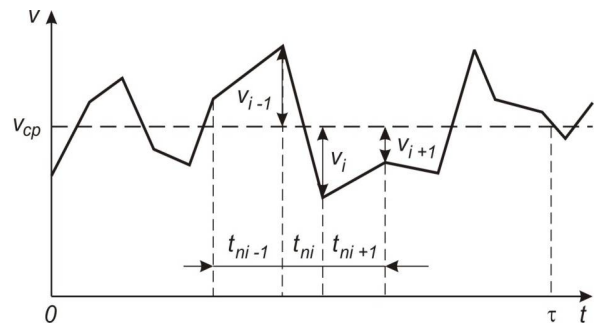


Рис. 1. Параметри поривів швидкості вітру.

Пориви швидкості вітру характеризуються двома випадковими величинами – амплітудою  $V_i$  і тривалістю  $t_{ni}$  (рис. 1). Амплітуда поривів підпорядковується нормальному закону (Гаусса) розподілу випадкових величин [16, 17]. Нормальний закон розподілу займає центральне місце серед розподілів неперервних випадкових величин. Неперервною називають випадкову величину, яка може приймати всі значення з деякого кінцевого або нескінченного проміжку. Згідно нормальному закону розподілення математичне сподівання  $v'(t)$  у рівнянні (2) дорівнює нулю. Середнє квадратичне відхилення амплітуди пориву швидкості вітру  $\sigma_v$  представимо у такому вигляді:

$$\sigma_v = v_{cp} (K_n - 1) / \{-2 \ln[(2\pi)^{1/2} \tau_m / \tau]\}^{1/2}, \quad (3)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт поривчастості, рівний відношенню максимальної швидкості вітру до його середнього значення;  $\tau_m$  – інтервал осереднення максимальної швидкості вітру. Чисельне значення  $K_n$  можна визначити за виразом [18]:

$$K_n = 1 + \frac{1,42 + 0,3013 \ln((990 / v_{cp} \tau_m) - 4)}{\ln(h/z)}, \quad (4)$$

де  $h$  – висота над поверхнею землі;  $z$  – шорсткість підстилаючої поверхні.

Нормальний закон, як і інші розподіли випадкових величин, не є фіксованим рівнянням залежності однієї змінної від іншої. Фіксується

тільки характер цієї залежності. Ймовірність того, що випадкова величина виявиться меншою від деякого значення  $x$ , визначається функцією:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_v^2}} dx. \quad (5)$$

Визначення закону розподілення тривалості поривів вітру було здійснено на основі експериментальних даних, отриманих протягом року на науково-дослідному полігоні з використання енергії відновлюваних джерел [19]. На рис. 2 наведено фрагмент осцилограми зміни швидкості вітру, з якого видно, що пульсуюча складова швидкості вітру  $v'(t)$  характеризується широким частотним спектром [20]. Але в конструкціях вітротурбін наявні значні обертові маси, які фільтрують високочастотні складові і дають можливість знехтувати ними в подальшому аналізі. Практично це може бути здійснено шляхом визначення мінімальної тривалості пориву вітру  $t_{n\min}$ , яка підлягає реєстрації і наступній обробці. За результатами числових розрахунків нестационарного механічного процесу за рівнянням (1) для різних ВЕУ було встановлено, що фільтрувальні властивості інерції обертових мас мають місце, коли значення  $t_{n\min}$  в декілька разів менше від інерційної сталої часу, значення якої знаходиться в діапазоні (4÷8) с в залежності від потужності установки. Тому обробка експериментальних даних у функції часу здійснювалася з кроком 1 с, що відповідає значенню  $t_{n\min} = 1$  с. Тому моделювання тривалості поривів проводилося за наступних обмежень:

$$t_n \geq 1 \text{ с}, \quad \tau = 600 \text{ с}, \quad \tau_m = t_{n\min} = 1 \text{ с}. \quad (6)$$

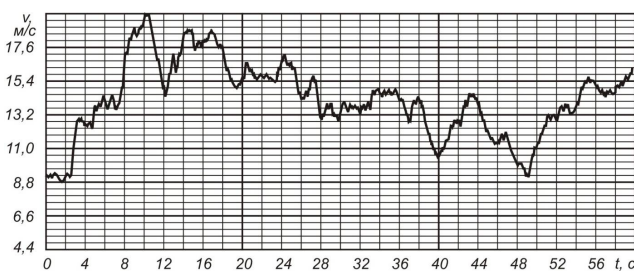


Рис. 2. Фрагмент осцилограми зміни швидкості вітру.

Проведений статистичний аналіз даних, отриманих із врахуванням обмежень (6), не виявив залежності між середньою тривалістю поривів і середньою швидкістю вітру на 10-хвилинних інтервалах. Виконані дослідження дозволили отримати розподілення дискретних значень, яке може бути описане законом розподілу випадкових величин Пуассона. При розгляді малої ймовірних подій, що мають місце у великій серії незалежних випробувань деяке (кінцеве) число раз, ймовірність появи цих подій обчислюється за формулою:

$$P(k) = \sum_{k=0}^{\varepsilon} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad (7)$$

де  $\lambda$  – математичне очікування;  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\varepsilon$  – ймовірність того, що якась випадкова величина прийме це значення.

Моделювання пульсацій швидкості вітру на 10-хвилинному інтервалі будемо здійснювати за допомогою двох послідовностей випадкових величин. Амплітуду поривів швидкості вітру будемо моделювати за допомогою генератора випадкових величин, розподілених за нормальним законом, а тривалість поривів – за законом Пуассона із заданими середніми характеристиками, чисельно рівними середнім статистичним значенням.

З точки зору практичного використання доцільно реалізувати модель пульсацій швидкості вітру в сучасних математичних програмних пакетах, що дозволить легко інтегрувати її в склад досліджуваної електромеханічної системи ВЕУ. Одним із таких засобів є Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем [21–24]. Він дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати моделі. Simulink повністю інтегрований з прикладним пакетом MATLAB, забезпечуючи доступ до широкого спектру інструментів аналізу і проектування. Тому динамічна модель швидкості вітру була реалізована в програмному пакеті Simulink.

**Практична реалізація.** Для виконання обчислень необхідно створити два масиви даних.

Програмна реалізація моделі здійснювалася в два етапи. На першому етапі розраховувалися значення амплітуд пульсацій швидкості вітру та їх тривалість, а на другому етапі здійснювався синтез.

Для моделювання амплітуд швидкості вітру використовуємо блок *Constant* з розділу *Sources* (джерела сигналів) програмного пакету Simulink. У вікні налаштувань блоку вводимо функцію генератора випадкових величин *normrnd* (нормальний закон розподілення) пакету MATLAB (розділ *Statistics Toolbox*) з параметрами:  $MU = 10$  (математичне очікування);  $SIGMA = 2$  (середньоквадратичне відхилення);  $R = [150 : 1]$  (розмір вихідної матриці або вектора). За допомогою середньоквадратичного відхилення можна змінювати діапазон амплітуд швидкості вітру. З блоку *Constant* та за допомогою блоку *To Workspace* з розділу *Sinks* (приймачі сигналів) заносимо розраховані амплітуди швидкості вітру до робочого простору програмного пакету Simulink та в таблицю 1.

Таблиця 1. Амплітуди пульсацій швидкості вітру

	$v_1 - v_{10}$	$v_{11} - v_{20}$	$v_{21} - v_{100}$	$v_{101} - v_{110}$	$v_{111} - v_{120}$
$v_i$	11,94	8,38	...	11,57	9,37
	12,64	11,32	...	9,70	8,59
	12,35	9,99	...	9,11	10,49
	8,71	10,89	...	12,43	6,91
	10,75	12,32	...	8,52	7,33
	11,55	10,82	...	11,37	13,43
	8,17	8,66	...	9,13	9,88
	10,34	11,28	...	11,26	14,47
	11,30	9,72	...	11,44	9,59
	7,81	8,61	...	8,59	10,29

Щільність випадковості для знайдених значень амплітуд швидкості вітру розраховується згідно виразу:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_v^2}} \quad (8)$$

За виразом (8) розрахована щільність випадковості для знайдених значень амплітуд швидкості вітру і побудована гістограма (рис. 3). Ймовірність того, що випадкова величина виявиться близько до центру, набагато вища, ніж те, що во-

на сильно відхилилась від середини.

Основи, тобто інтервали, в усіх ділянок рівні, але помітно відрізняються їх висоти. Крайні ділянки віддалені від центру та мають істотно меншу висоту, ніж центральна. Отже відрізняються і площі, тобто ймовірності влучення в позначені інтервали. На гістограмі число 5 на осі абсцис відповідає середній швидкості вітру  $v_{cp}(t) = 10$  м/с, а 1-10 відповідно  $\approx 5-15$  м/с. Функція щільності характеризує кожне значення безперервної випадкової величини окремо, а не цілий діапазон, як це має місце для функції розподілу за нормальним законом.

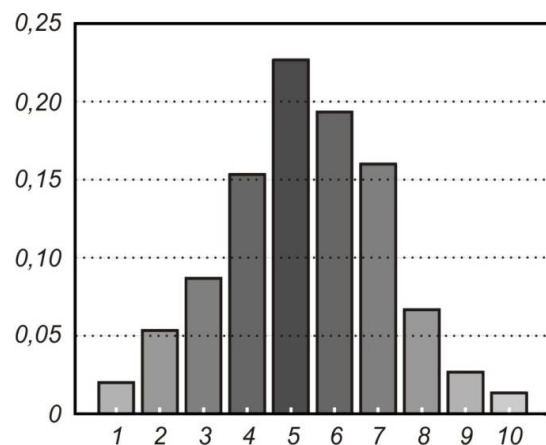


Рис. 3. Гістограма щільності випадковості амплітуд швидкості вітру.

Для моделювання інтервалів пульсацій швидкості вітру також використовуємо блок *Constant*. У якості генератора випадкових величин вибираємо функцію *poissrnd* (розподілення Пуассона). Заносимо розраховані інтервали в таблицю 2. Надалі для розрахунків потрібний поточний час, а не окремі інтервали. Для цього з виходу блоку *Constant* сигнал з'єднуємо з блоком *MATLAB Fcn* розділу *User-Defined Functions* (функції, визначені користувачем). У вікні налаштувань блоку *MATLAB Fcn* вводимо команду *cumsum*, яка підсумовує і повертає всі проміжні результати розрахованих раніше інтервалів пульсацій швидкості вітру. Розраховані і підсумовані результати за допомогою блоку *To Workspace* заносимо до робочого простору.

Таблиця 2. Інтервали пульсацій швидкості вітру

$t_i$	$t_1 - t_{10}$	$t_{11} - t_{20}$	$t_{21} - t_{100}$	$t_{101} - t_{110}$	$t_{111} - t_{120}$
	2	4	...	3	5
	4	8	...	5	6
	5	4	...	3	3
	6	7	...	3	2
	8	4	...	7	5
	6	5	...	5	9
	4	2	...	7	5
	4	7	...	3	6
	3	5	...	4	6
	6	6	...	5	3

Для синтезу розрахованих амплітуд і підсумованих інтервалів пульсацій швидкості вітру використовуємо блок *Repeating Sequence* розділу *Sources*. У вікні налаштувань вводимо розраховані дані з робочого простору. Для виводу результатів моделювання на екран (рис. 4) з виходу блоку *Repeating Sequence* сигнал з'єднуємо з блоком *Scope* розділу *Sinks* (приймачі сигналів). Збільшений графік зміни швидкості вітру на інтервалі від 325 с до 385 с показаний на рис. 5. При моделюванні динамічної складової швидкості вітру необхідно враховувати ще одну додаткову умову. Вона полягає в тому, що відношення пориву вітру  $\Delta v_i$  до його тривалості  $\Delta t_i$  повинне бути не більше 2, тобто  $0 < \Delta v_i / \Delta t_i < 2$ . Для

перевірки цієї умови при моделюванні амплітуд швидкості вітру необхідно зробити розрахунок  $\Delta v_i = v_i - v_{i-1}$ . З виходу блоку *Constant* (генерування амплітуд) сигнал за допомогою блоку *Merge* розділу *SignalRouting* (блоки маршрутизації сигналів) об'єднуємо з нульовим вектором у єдиний сигнал. На виході розмірність вектора збільшилась і його необхідно привести до однакової розмірності з вектором інтервалів часу. Для цього використовуємо блок *Selector* з того розділу, що і блок *Merge*. У вікні налаштувань вибираємо необхідну розмірність, у даному випадку елементи вектора з 2 по 151 ([2 151]). Далі беремо різницю отриманих векторів. Результатом можуть бути як позитивні, так і негативні значення, тому за допомогою блоку *Abs* розділу *Math Operations* (блоки математичних операцій) беремо модуль вихідного вектора. За допомогою блоку *Product* з попереднього розділу ділимо отриманий вектор на вектор інтервалів часу і отримаємо  $\Delta v_i / \Delta t_i$ . За допомогою операцій, наведених вище, будуємо залежність  $(\Delta v_i / \Delta t_i)(t)$ , яка показана на рис. 4. З графіка видно, що він не перевищує позначки 2 і задовольняє умові  $0 < \Delta v_i / \Delta t_i < 2$ .

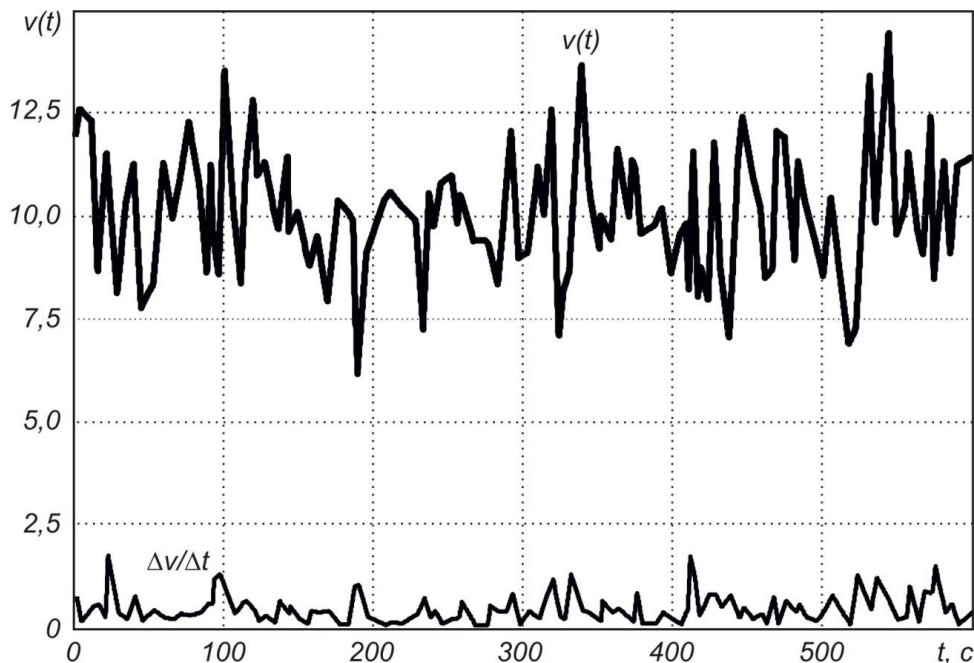


Рис. 4. Графіки зміни швидкості вітру  $v(t)$  і відношення  $(\Delta v_i / \Delta t_i)(t)$  на 10-хвилинному інтервалі.

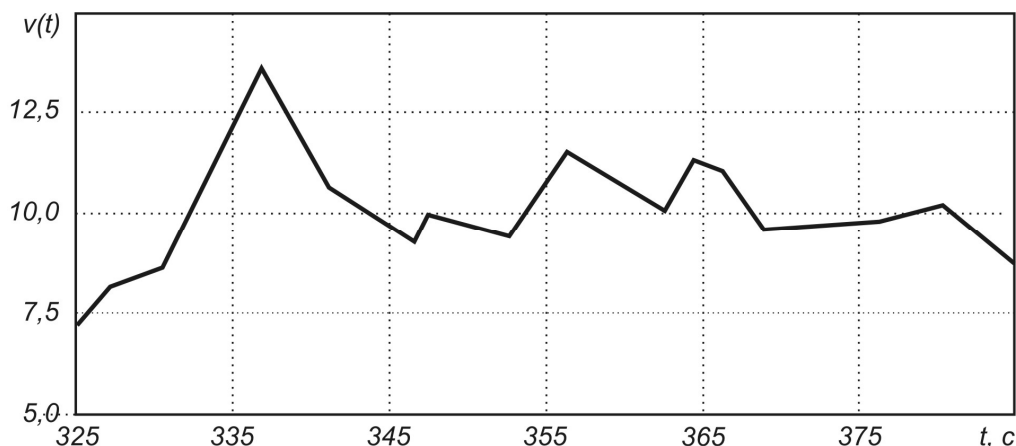


Рис. 5. Залежність  $v(t)$  на інтервалі однієї хвилини.

**Висновки.** Розроблено алгоритм реалізації стохастичної двопараметричної моделі поздовжньої складової швидкості вітру на 10-ти хвилинному інтервалі часу для задач вітроенергетики. Моделювання поривів швидкості вітру здійснено шляхом генерування двох послідовностей випадкових величин. Розподіл амплітуд поривів підпорядкований нормальному закону, а тривалості поривів – закону Пуассона. Модель призначена для визначення енергетичних показників ВЕУ та розроблення систем енергоефективного керування з урахуванням динаміки вітрового потоку.

1. *Фатеев Е.М.* Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Гос.изд.сельхоз. лит., 1957. – 536 с.

2. *Харитонов В.П.* Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

3. *Coles SG, Walshaw D.* Directional Modeling of Extreme Wind Speeds. Applied Statistics–Journal of the Royal Statistical Society Series C 1994;43(1): P.139–157.

4. *Anthony Papavasiliou, Shmuel S. Oren, Ignacio Aravena.* Stochastic Modeling of Multi-area Wind Power Production. In Tung X. Bui, Ralph H. Sprague Jr., editors, 48th Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2015, Kauai, Hawaii, USA, January 5–8, 2015. pages 2616–2626, IEEE, 2015.

5. *Обухов С.Г., Плотников И.А., Сарсикеев Е.Ж.* Динамическая модель продольной составляющей скорости ветра // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5.; URL:<https://science-education.ru/ru/article/view?id=10644>.

6. Руководство по расчету зданий и сооружений на действия ветра. – М.: Стройиздат, 1978. – 216 с.

7. IEC 61400–1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.

8. *Харитонов В.П.* Работа электронасосной ветроустановки при порывистом ветре // Докл. 1 Всесоюз. науч.-техн. конф. по возобновляемым источникам энергии. Вып. 2. Ветроэнергетика. М.: Энергия, 1972. С. 43–48.

9. *Anderson P.M., Bose Anjan.* Stability simulation of wind turbine systems // IEEE Trans. PAS. 1983. V. 102. №12. P. 3791–3795.

10. *Kentfield J.A.* Modification, due to gusting, of the performance characteristics of wind-turbines // 21<sup>st</sup> Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. San Diego. Calif., Aug. 25029. 1986. V. 2. Washington: D. C. 1986. P. 1247–1252.

11. *F. Bouffard and F. D. Galiana.* “Stochastic security for operations planning with significant wind power generation,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 306–316, May 2008.

12. *Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Пекур П.П.* Стохастическое моделирование параметров ветра для задач ветроэнергетики. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт №2. М.: 1990. С. 109–115.

13. *Панчев С.* Случайные функции и турбулентность. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 448 с.

14. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. (Механика турбулентности). Ч. 2. М.: Наука, 1967. – 720 с.

15. *Борисенко М.М., Соколова С.И., Корнюшин О.Г.* Исследование климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 1987. 50 с.

16. *Борисенко М.М.* Об исследованиях максимальных порывов ветра в нижних слоях атмосферы. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 1973. 30 с.

17. *Андреев И.Д.* Порывистость ветра внутри часового интервала // Вопросы ветроэнергетики. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5–10.

18. *Бызова И.Л., Волковицкая З.И., Мазурин Н.Ф. и др.* Статистические характеристики скорости ветра применительно к ветровым нагрузкам. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 1983. 52 с.

19. *Денисенко Г.И.* Возобновляемые источники энергии. Киев: Вища шк., 1983. 168 с.

20. С.В. Казанський, П.П. Пекур. Особливості оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів на вітроелектричних станціях // Відновлювана енергетика. – 2017. – №2. – С. 49–55.

21. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений [Текст]/И.В.Черных.– М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2004, 496 с.

22. Потемкин В. Введение в MATLAB. – М.: Диалог–МИФИ, 2000

23. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. – М.: Солон-Пресс, 2003.

24. A. Papavasiliou, S. S. Oren, and R. P. O'Neill, "Reserve requirements for wind power integration: A scenario-based stochastic programming framework," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2197–2206, November 2011.

#### REFERENCES

1. Fateev E. M. Windmills and wind turbines. Moscow: GOS.ed.agricultural. lit., 1957.– 536 p.

2. Haritonov V.P. Autonomous wind power installation. – М.: GNU VIESH, 2006. – 280 p.

3. Coles SG, Walshaw D. Directional Modeling of Extreme Wind Speeds. Applied Statistics–Journal of the Royal Statistical Society Series C 1994; 43(1): P.139–157.

4. Anthony Papavasiliou, Shmuel S. Oren, Ignacio Aravena. Stochastic Modeling of Multi-area Wind Power Production. In Tung X. Bui, Ralph H. Sprague Jr., editors, 48th Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2015, Kauai, Hawaii, USA, January 5–8, 2015. pages 2616–2626, IEEE, 2015.

5. Obuhov S.G., Plotnikov I.A., Sarsikeev E.G. The dynamic model of wind speed axial component // Modern problems of science and education. – 2013. – №5. P. 137–141.

6. Guide for calculation of buildings and constructions on action of the wind. – М.: Stroyizdat, 1978. – 216 p.

7. IEC 61400–1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.

8. Haritonov V.P. The work of the electropump of wind turbines in gusty wind // Dokl. 1 all–Union. Scientific.–Tech. Conf. on renewable sources of energy. Vol. 2. Wind energy. М.: Energy, 1972. P. 43–48.

9. Anderson P.M., Bose Anjan. Stability simulation of wind turbine systems // IEEE Trans. PAS. 1983. V. 102. №12. P. 3791–3795.

10. Kentfield J.A. Modification, due to gusting, of the performance characteristics of wind–turbines // 21<sup>st</sup> Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. San Diego. Calif., Aug. 25029. 1986. V. 2. Washington: D. C. 1986. P. 1247–1252.

11. F. Bouffard and F. D. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 306–316, May 2008.

12. G.I. Denisenko, P.F. Vasko, P.P. Pekur. Stochastic modelling of wind for wind energy. News of Academy of Sciences of the USSR. Energy and transport No. 2. М.: 1990. P. 109–115.

13. Panchev S., Random functions and turbulence. Leningrad : Gidrometeoizdat. 1967. 448 p.

14. Monin A. S., Yaglom A. M. Statistical fluid mechanics. (Mechanics of turbulence). Part 2. М. : Nauka, 1967. 720 p.

15. Borisenko, M. M., Sokolova S. I., Korniyushin O. G. Research of the climatic characteristics of wind energy resources. Obninsk: VNIIGMI–MCD, 1987. 50 p.

16. Borisenko M. M, About research maximum wind gusts in the lower atmosphere. Obninsk: VNIIGMI–MCD, 1973. 30 p.

17. Andreev I. D. Impetuosity of the wind inside the time interval of the wind. М.: Izd–vo of Academy of Sciences of the USSR, 1959. P. 5–10.

18. Byzova I. L., Volkovitsky Z. I., Mazurin N. F. etc. Statistical characteristics of wind speed in relation to wind loads. Obninsk: VNIIGMI–MCD, 1983. 52 p

19. Denisenko G. I. Renewable energy sources. Kiev: High School, 1983. 168 p.

20. S. V. Kazanskiy, P. P. Pekur. Features of evaluation of load capacity of power transformers at wind power plants // Renewable energy. – 2017. – No. 2. – P.49–55.

21. Chernykh I. V. SIMULINK: the authoring environment engineering applications [Text]/I. V. Chernykh.– Moscow: DIALOG – MIFI, 2004, 496 p.

22. Potemkin V. Introduction to MATLAB. – Moscow: Dialog–MIFI, 2000.

23. V.P. Dyakonov MATLAB 6/6.1/6.5 + 4/5 SIMULINK in mathematics and modeling. –М.: Solon–Press, 2003.

24. A. Papavasiliou, S. S. Oren, and R. P. O'Neill, "Reserve requirements for wind power integration: A scenario-based stochastic programming framework," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2197–2206, November 2011.

**П.Ф.Васько**, докт.техн.наук, **А.П.Вербовой**, канд.техн.наук, **С.Т.Пазыч** (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

**Реализация стохастической двухпараметрической модели продольной составляющей скорости ветра для задач ветроэнергетики**

*Разработана реализация стохастической модели продольной составляющей скорости ветра для использования в современных математических пакетах. Моделирование порывов скорости ветра осуществлено путем формирования двух последовательностей случайных величин. Распределение амплитуд порывов подчинено нормальному закону, а продолжительности порывов – закону Пуассона. Библ. 24, табл. 2, рис. 5.*

**Ключевые слова:** ветротурбина, ветер, случайная величина, модель, порыв ветра, скорость ветра.

**Vasko P., Verbovyj A., Pazych C.** (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

**Realization of a stochastic two-parameter model of the longitudinal component of the wind speed for wind energy problems**

*The implementation of a stochastic model of the longitudinal component of wind speed for use in modern mathematical packages is developed. Modeling of gusts of wind speed is carried out by forming two sequences of random variables. The*

distribution of the gust amplitudes is subject to the normal law, and the duration of the gusts is subject to Poisson's law. References 24, table 2, figures 5.

**Keywords:** wind turbine, wind, random variable, model, gust of wind, wind speed.

#### SYNOPSIS

For adequately study modes of wind turbine must apply qualitative dynamic model of wind speed. When working wind turbine with changing wind speed over time plays an important role as the primary link energy. Instantaneous wind speed have significantly impact on the work wind turbine. the work of automatic control systems, management Mode of operation units etc.

Modeling fluctuations of wind speed at 10-minute interval was carried out by two sequences of random variables. The amplitude of the fluctuations in wind speed is modeled by a genera-

tor of random variables distributed by the normal law. Intervals fluctuations – for Poisson law with desired medium characteristics numerically equal to the average of statistical significance.

The dynamic model of wind velocity fluctuations was implemented in the software package Simulink.

To perform calculations created two data sets. Software implementation model was carried out in two stages. In the first phase fluctuations amplitude values calculated wind speed and duration, and the second stage was carried out synthesis.

The proposed stochastic model of longitudinal component of the wind speed is realized by means of modern applications and is not a complicated structure can be used as part of the models of wind turbines in their design, research and optimization of dynamic mode parameters. Selected methods for generating random variables most relevant to the real process of changing wind speed. The model satisfies the accuracy of forecasting wind speeds at 10 minutes interval.

Стаття надійшла до редакції 22.06.17

Остаточна версія 28.08.17

# ХV МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВІСТІ-2017

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ, ЕНЕРГЕТИЧНЕ УСТАТКУВАННЯ, ЕЛЕКТРИЧНІ ПІДСТАНЦІЇ, КАБЕЛІ, ПРОВІДИ,  
ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, ПРОМИСЛОВА СВІЛОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КВПІА

## ХV МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ: СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ





МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
Україна, 02002  
Київ, Броварський пр-т, 15  
М "Лівобережна"  
тел./факс: (044) 201-11-57  
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр  
www.tech-expo.com.ua

**ОРГАНІЗАТОР:**  
Міжнародний виставковий центр

**ЗА ПІДТРИМКИ**  
Міністерства енергетики  
та вугільної промисловості України

Технічний партнер: *Reant Media*

# 7-9

## Листопада