

УДК 621.311.24

Ю.П.Матесенко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, Д.О.Годун<sup>2</sup> (НТУУ "КПІ ім. І.Сікорського", Київ)

## Підходи до дослідження надійності роботи вітроелектростанції

В статті запропоновано підходи до дослідження надійності вітроелектростанції на основі існуючих методів оцінки надійності. Бібл. 4, табл. 1, рис. 5.

**Ключові слова:** вітроелектростанція, надійність, інтенсивність відмов, марковські процеси, електропостачання.

Orcid: <sup>1</sup>0000-0002-2699-0888, <sup>2</sup>0000-0002-8272-1324.

**Вступ.** Питання енергетичної безпеки гостро постає перед нашою державою. Одним із шляхів до підвищення енергетичної безпеки є встановлення нових станцій, які використовують альтернативні джерела енергії. Для надійного електропостачання необхідно, щоб усі елементи електроустановок, включаючи генератори, трансформатори, засоби автоматики, захисту та розподілення працювали безперебійно. Кожен елемент електроустановки вносить свій вклад у надійність електропостачання [1].

Оцінка надійності вітроенергетичних установок (ВЕУ) необхідна для більш точного визначення виробітку електроенергії на вітроелектростанціях (ВЕС). Досвід експлуатації показує, що ВЕУ виробляє менше розрахункової кількості електроенергії по причині відмови її основних вузлів. Відмова вузлів вітроустановки, як правило, відбувається під час її експлуатації. Для визначення збитку від ненадійності обладнання необхідно знати статистичні дані по відмовах і часу відновлення елементів і, власне, самої ВЕУ.

**Постановка завдання.** Навести найбільш доцільні підходи до дослідження надійності ВЕС шляхом аналізу надійності схеми електричних з'єднань та енергообладнання. Також розглянути основні проблеми підключення вітроелектростанції до мережі та вплив на якість електропостачання споживачів.

Для вирішення цих проблем потрібно перш за все виділити три головних напрямки дослідження, а саме:

1. Аналіз надійності ВЕУ вітроелектростанції.

2. Оцінка надійності структурної схеми вітроелектростанції.

3. Дослідження надійності електропостачання ВЕС у мережу.

**Результати.** Розрахункову схему для оцінки надійності ВЕУ можна представити у вигляді послідовно з'єднаних елементів, які мають одиничні показники надійності, такі як інтенсивність відмов  $\lambda_i$  та час відновлення  $\tau_i$ : лопаті, редуктор, генератор, привід генератора, поворотний прилад, контролер, механічні гальма, кріплення лопатей, сенсори, силова електроніка, допоміжне обладнання. Простішою технічною системою згідно теорії надійності є послідовне з'єднання елементів, відмова якої настає тоді, коли відмовить будь-який елемент цієї системи.

Розрахункову схему для оцінки надійності ВЕУ можна представити у вигляді одинадцяти послідовно з'єднаних елементів. Для прикладу скористаємось даними до розробленого данською компанією вітрогенератора Vestas-V52. Середня інтенсивність відмов і час відновлення кожного елемента ВЕУ Vestas-V52 зарубіжного виробництва представлені в таблиці 1. Показники надійності послідовного з'єднання елементів розраховуються за формулами, наведеними нижче.

Інтенсивність відмов однієї вітроустановки буде визначатися за формулою:

$$\lambda_{BEV} = \sum_{i=1}^{11} \lambda_i.$$

Середній час відновлення ВЕУ з урахуванням інтенсивності відмов кожного елемента:

$$\tau_e = \frac{1}{\lambda_{BEV}} \sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i.$$

Загальна інтенсивність відмов усіх елементів ВЕУ Vestas-V52 буде дорівнювати:

$\lambda_{BEV} = 1,75$  /рік. При об'єднанні кількох ВЕУ у вітропарку параметри надійності розраховуються для всього вітропарку з урахуванням інтенсивності відмов і відновлення кожної вітроустановки.

Таблиця 1. Середня інтенсивність відмов і час відновлення Vestas-V52

Назва елемента	Інтенсивність відмов $\lambda_{эi}$	Час відновлення $\tau_{эi}$
Лопаті	0,12	5,5
Редуктор	0,09	8
Генератор	0,09	9,5
Привід генератора	0,17	1,9
Поворотний прилад	0,14	3,9
Контролер	0,14	2,7
Механічні гальма	0,1	3,8
Кріплення лопатей	0,09	4,5
Сенсори	0,19	2,1
Силова електроніка	0,5	2,5
Допоміжні споруди	0,12	4,8

Враховуючи розрахунки надійності ВЕУ, зроблених в Україні, інтенсивність відмов ВЕУ вітчизняного виробництва дорівнює інтенсивності відмов ВЕУ ТГ-750, яка визначається даними досліджень "ПКТБ "Конкорд" заводу і становить  $\lambda_{BEV} = 4,4$  /рік, що суттєво відрізняється від аналога зарубіжного виробництва.

Для побудови моделі надійності парку ВЕУ з урахуванням погодних умов використовується метод простору станів (марковські процеси – майбутній стан процесу залежить лише від поточного стану, але не залежить від минулого за

умови, коли поточний стан процесу відомий) [4, с. 287-288].

Для вирішення завдань надійності систем із числом можливих станів більше двох складають матрицю станів, розкриваючи яку отримують систему диференціальних рівнянь, що описують зв'язок між імовірністю перебування системи в кожному з можливих станів. Розв'язком цієї системи є графік залежності розподілу ймовірностей від часу.

Вітропарк, що складається з двох ВЕУ, в будь-який момент часу може знаходитися в одному з п'яти станів:

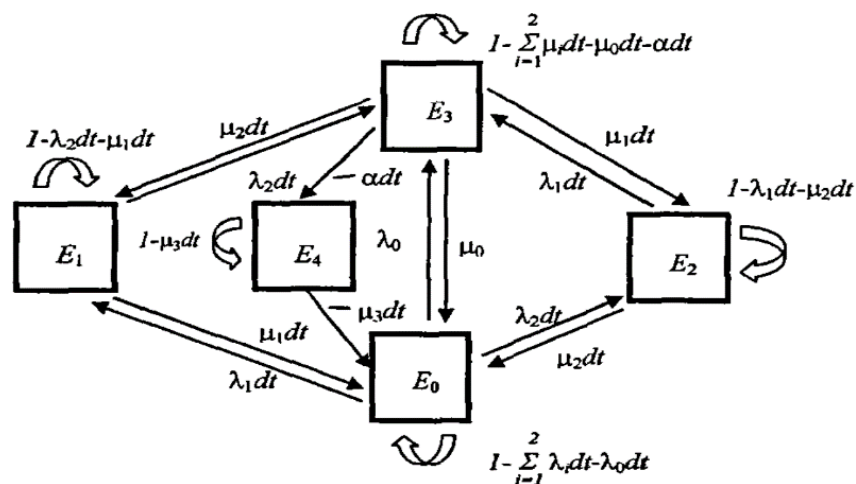


Рис. 1. Граф станів вітропарку з урахуванням погодних умов: E<sub>0</sub> – обидві ВЕУ працюєздатні; E<sub>1</sub> – ВЕУ 1 в аварійному стані; E<sub>2</sub> – ВЕУ 2 в аварійному стані; E<sub>3</sub> – обидві ВЕУ непрацюєздатні; E<sub>4</sub> – умови для відновлення обох ВЕУ.

Усі можливі переходи з одного стану в інший зображені на рис. 1.

$\lambda_i$  – інтенсивність відмов ВЕУ для кожної ВЕУ ( $i = 1, 2$ );

$\mu_i$  – інтенсивність відновлень ВЕУ для кожної ВЕУ ( $i = 1, 2$ );

$\mu_3$  – інтенсивність відновлення одночасно двох ВЕУ;

$\alpha$  – коефіцієнт, який характеризує наявність ремонтного персоналу і запасних вузлів;

$\mu_0 \lambda_0$  – інтенсивність за нормальної та несприятливої погоди, визначається швидкістю вітру.

Для двох паралельно з'єднаних ВЕУ інтенсивність відмов, середній час відновлення та інтенсивність відновлення буде таким:

$$\lambda_{BEU} = \lambda_1 \lambda_2 (\tau_{\theta 1} + \tau_{\theta 2}),$$

$$T_{\theta} = \frac{\tau_{\theta 1} \tau_{\theta 2}}{\tau_{\theta 1} + \tau_{\theta 2}}, \quad \mu = \frac{1}{T_{\theta}}.$$

Математична модель такої системи являє собою систему диференціальних рівнянь першого порядку [2, с.177-181]:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \lambda_0)P_0(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\mu_i + P_4(t)\mu_3,$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + P_3(t)\mu_2 + P_0(t)\lambda_1,$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + P_3(t)\mu_1 + P_0(t)\lambda_2,$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -(\sum_{i=1}^2 \mu_i + \mu_0 + \alpha)P_3(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\lambda_{(3-i)} + P_0(t)\lambda_0,$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = \mu_3 P_4(t) + P_3(t)\alpha.$$

За допомогою середовища *PTC Windchill Quality Solutions* є можливість побудувати граф станів, а також виконати розрахунок надійності на основі отриманої схеми. На графіках, наведених нижче (рис. 2, 3), можна прослідкувати характер зміни параметрів заданої схеми з часом, а також зміну ймовірності стану на один із розглянутих вище в тому ж проміжку часу.

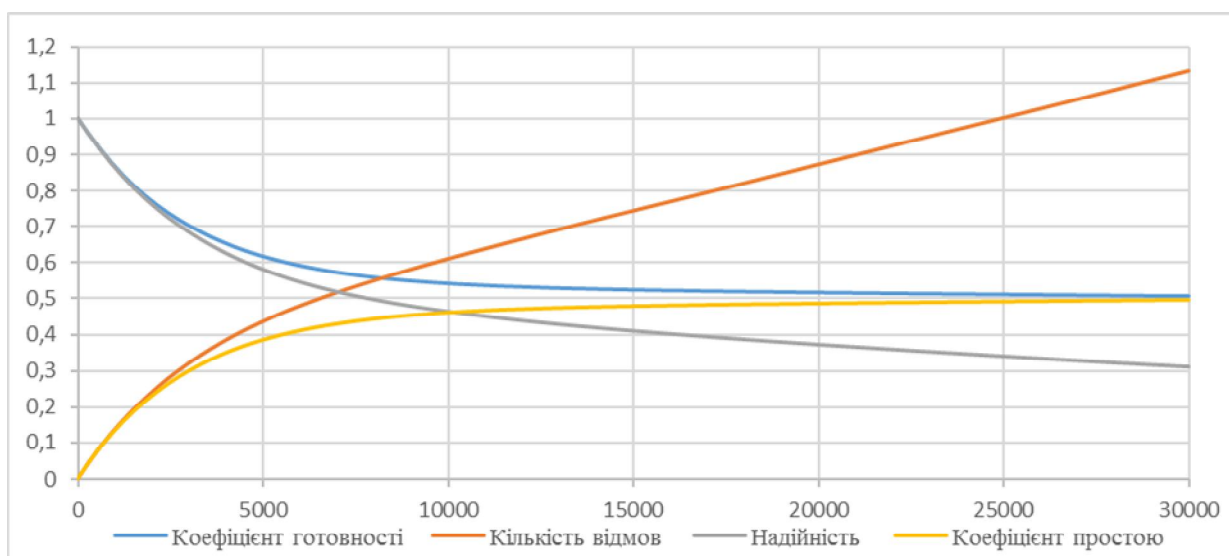


Рис 2. Графіки залежності параметрів надійності від часу.

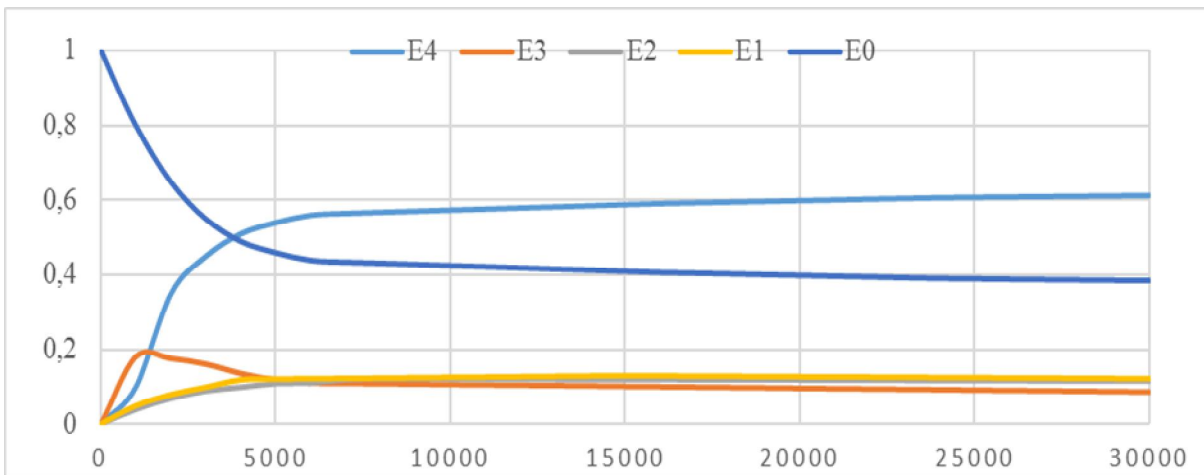


Рис. 3. Графіки зміни ймовірності стану системи вітропарку.

З останнього графіка видно, що ймовірність стану  $E_1$  більша, ніж  $E_2$ . З цього випливає, що установка, аварійний стан якої був зазначений  $E_2$ , буде надійнішою, оскільки ймовірність аварійного стану

менша. Відповідно коефіцієнт готовності, що характеризує ймовірність того, що об'єкт опиниться у працездатному стані в довільний момент часу, у вітропарку з Vestas-V52 буде більший.

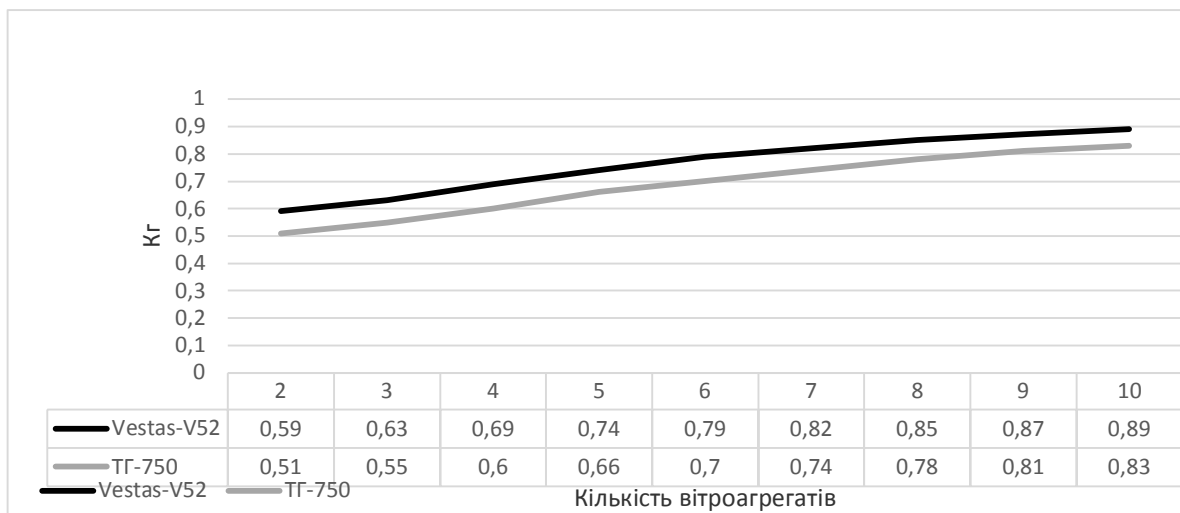


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта готовності ВЕУ від їх кількості.

З графіка (рис. 4) видно, що залежність коефіцієнта готовності  $K_g$  від вітроустановки має нелінійний характер. При розрахунку надійності вітропарку з кількістю ВЕС більше 10 доцільно скористатися методом агрегування і розглянути вітропарк як систему паралельно працюючих вітропарків, що складаються з 8-10 ВЕУ кожен.

Необхідно також розглянути питання приєднання ВЕС до енергосистеми, яке на сьогоднішній день є одним із головних, оскільки при сумісній роботі з мережею основними проблемами

залишаються надійність постачання електроенергії та нестабільність виробленої потужності.

Перш за все, завжди повинен підтримуватись баланс виробленої та споживаної потужності. При цьому середня величина навантаження має не тільки щоденні та сезонні коливання, але й випадкові коливання через непередбачені випадкові навантаження. Для покриття непередбачених навантажень зазвичай використовують більш маневрені станції ГЕС, ГАЕС та ТЕС, які приймають участь у регулюванні. Але енергія

відновлюваних джерел, зокрема ВЕС, може ускладнити регулювання споживання та генерації електроенергії через нестабільність вироблення. Також важливим фактором є те, що надійність електропостачання в розподільних мережах зменшується зі зменшенням рівня напруги. Для ліній напругою 35 кВ перерви в електропостачанні становлять не більше декількох хвилин на рік, а для ліній 0,4 кВ, особливо в сільській місцевості, час перерви в електропостачанні може становити до декількох годин.

Методи отримання змінної напруги постійної частоти при змінній частоті обертання валу вітрогенератора в загальному випадку зводяться до диференціальних і недиференціальних груп.

Диференціальні методи реалізуються в системах ВЕУ з синхронними генераторами за допомогою механічних пристроїв, що забезпечують отримання постійної частоти обертання генераторів (редуктори зі змінним передавальним відношенням, пристрої з гідравлічною передачею потужності), а також за допомогою електричних пристроїв, що компенсують зміну частоти обер-

тання за допомогою живлення обмотки збудження напругою з частотою, рівною різниці частоти обертання ротора генератора і частоти напруги енергосистеми, на яку працює генератор.

Недиференціальні методи можуть бути реалізовані через статичні пристрої зміни частоти за схемою перетворення: змінна напруга – постійна напруга – змінна напруга. Складність практичної реалізації таких схем полягає в необхідності мати в системі ланку (в силовому колі або в системі управління вітрогенератором), що забезпечує узгодження частоти і рівня напруги ВЕУ з цими ж параметрами в точці підключення до енергосистеми [3, с. 275-278].

Існує декілька схем підключення ВЕУ до системи електропостачання (СЕС), основні відмінності яких стосуються конструкції і типу генераторів, а також наявності і типу перетворювальних пристроїв. На рис. 5 показано схеми прямого підключення до енергосистеми ВЕУ з синхронним генератором (рис. 5а) та асинхронним (рис. 5б) генератором із короткозамкненим ротором, підключеними до вітрогенератора через мультиплікатор (редуктор) п.

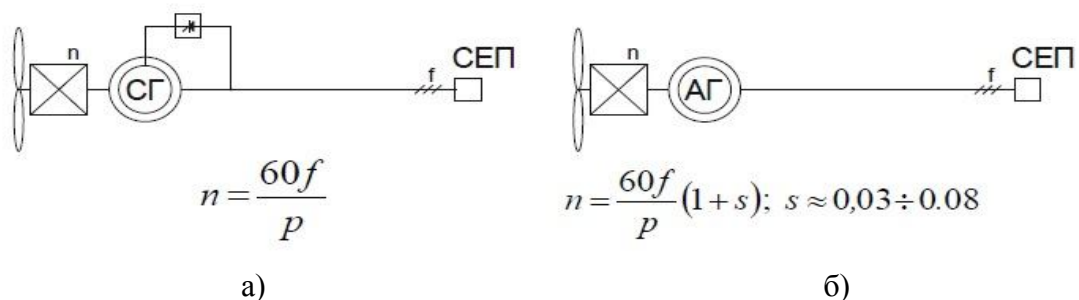


Рис. 5. Підключення до мережі ВЕУ з синхронним (а) і асинхронним (б) генератором.

Для реалізації таких схем паралельної роботи ВЕУ з мережею енергосистеми необхідною умовою є постійне підтримання синхронної швидкості обертання ротора синхронного генератора і надсинхронної швидкості – для асинхронного генератора.

У разі паралельної роботи декількох ВЕУ з синхронними генераторами частота обертання валів генераторів може підтримуватися стабільною шляхом наступних можливих варіантів підключення:

- кожен генератор має власний пристрій синхронізації;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою у групах, а потім відбувається синхронізація груп із мережею;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою в групі, потім синхронізуються групи, а з мережею синхронізація відбувається на головній підвищувальній підстанції.

Очевидно, що перший варіант найбільш повно відповідає експлуатаційним вимогам і дозволяє встановлювати мінімальну кількість синхронізуючих пристроїв. У цьому випадку будь-який із генераторів може підключатися до мережі незалежно від інших.

Застосування асинхронних генераторів дозволяє виключити з головної схеми ВЕС синхронізуючі пристрої. Однак у цьому випадку власнику ВЕС доводиться розплачуватися з мережевою компанією за реактивну потужність, споживану установками з мережі [4, с. 279-283].

**Висновки.** Представлено найбільш доцільні підходи до дослідження надійності вітроагрегатів та ВЕС у цілому. Наведені основні елементи для розрахунку інтенсивності відмов та середнього часу відновлення вітроагрегату ВЕС. Далі був наданий підхід до побудови моделі надійності вітропарку на основі отриманих даних у попередньому розрахунку. В завершенні цієї роботи були розглянуті основні проблеми інтеграції ВЕС із мережею, а також вплив встановленого обладнання на якість постачання електроенергії.

1. В.П. Калявин. Надежность и диагностика элементов электроустановок / В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков
2. С. М. Аполлонский. Надежность и эффективность электрических аппаратов / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – Санкт-Петербург, Москва, Краснодар: Издательство «Лань», 2011.
3. Mazaher Haji Bashi M. Markovian approach applied to reliability modeling of a wind farm / M. Haji Bashi, A. Ebrahimi. // TUBITAK. – 2014. – №22. – С. 287–293.
4. Г. Півняк. Основи вітроенергетики / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015.

#### REFERENCES

1. VP Kalyavin. Reliability and diagnostics of electrical components / VP Kalyavin, LM Fishermen
2. SM Apollonsky. The reliability and efficiency of electrical devices / SM Apollonsky, YV Kyklev. - St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, "Lan" Publisher 2011.
3. Mazaher Haji Bashi M. Markovian approach applied to reliability modeling of a wind farm / M. Haji Bashi, A. Ebrahimi. // TUBITAK. – 2014. – №22. – С. 287–293.
4. G. Pivnyak. Basics of vitroenergetiki / Pivnyak G., F. Shkrabets, N. Neuberger, J. Tsiplenkov. - Dnipropetrovsk: NSU 2015.

**Ю.П.Матеенко**, канд.техн.наук, **Д.О.Годун** (НТУУ "КПИ им. И.Сикорского", Киев)

#### Подходы к исследованиям надежности работы ветроэлектростанции

*В статье рассмотрена основная проблема энергетической безопасности, пути к ее повышению, среди которых на первом плане установление новых станций, использующих альтернативные источники энергии.*

*Актуальность выбранной темы обосновывается тем, что, несмотря на доступность и экологическую чистоту ветровой энергии, ветроэлектростанции имеют как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. Преимущества очевидны: в первую очередь, экологичность и мобильность установки. А к недостаткам можно отнести неровный выход энергии, сильный шум, стоимость и надежность поставок.*

*Оценка надежности ветроэнергетических установок необходима для более точного определения выработки электроэнергии на ветроэлектростанциях. Для определения ущерба от ненадежности оборудования необходимо знать статистические данные по отказам и времени восстановления элементов и собственно самой установки.*

*С этой целью определены наиболее целесообразные методы по исследованию надежности ВЭС путем анализа надежности схемы электрических соединений и энергооборудования. Также рассмотрены основные проблемы подключения ветроэлектростанции к сети и влияние на качество электроснабжения потребителей. Библ. 4, табл. 1, рис. 5.*

**Ключевые слова:** ветроэлектростанция, надежность, интенсивность отказов, марковские процессы, электроснабжение.

**Mateyenko Y., Godun D.** (NTUU "Igor Sikorsky KPI")

#### Approaches to study the reliability of wind power station

*The article considers the main problem of energy security and ways to improve it, including establishment of new plants that use alternative energy sources.*

*The relevance of the topic chosen is justified by the fact that despite the availability of environmental cleanliness and wind energy, wind farms are a number of advantages and some disadvantages. The advantages are obvious: mobility and ecological compatibility. And disadvantages include uneven output energy, loud noise, cost and reliability of supply.*

*Evaluation of reliability of wind turbines needed for more accurate determination of wind farm power generation in order to determine the loss of unreliable equipment necessary to know the statistics on failure and recovery time of the elements and proper installation.*

*To this end, by the most appropriate methods to research the reliability of wind farm schemes by analyzing the reliability of electrical connections and power equipment. Also was considered the main problems of connecting wind farms to the grid and impact on quality of power supply. References 4, table 1, figures 5.*

**Keywords:** wind power, reliability, failure rate, markov processes, power supply.

## SYNOPSIS

Evaluation of reliability of wind turbines needed for more accurate determination of wind farm power generation in order to determine the loss of unreliable equipment necessary to know the statistics on failure and recovery time of the elements and proper installation. To this end, by the most appropriate methods to research the reliability of wind farm schemes by analyzing the reliability of electrical connections and power equipment.

To solve the problems we must first distinguish three main areas of research, including:

1. Analysis of the reliability of wind power turbines.
2. Evaluation of reliability block diagram of the wind farm.
3. Research the reliability of power wind farms to the grid.

The design scheme of wind turbines reliability can be provided as easier system for technical reliability theory, which is a series connection of elements whose rejection occurs when refuse any element of this system. Turbine Vestas-V52 was tak-

en as an example in the article. For wind turbines made calculation parameters such as the failure rate, the average recovery time and intensity of recovery. A comparison of sample domestic production TG-750.

The data obtained in the preceding paragraph were used for constructing Markov model state in PTC Windchill Quality Solutions environment and creating a mathematical model of the state system to find depending between state probability of system, which consists of two wind turbines and time. Slight advantage of foreign wind turbine was revealed. It was built the dependence between coefficient of readiness and amount of wind turbines.

The last point considered question of joining wind turbine to the grid, which today is one of the main, since the collaboration with a network of major challenges remain security of supply of electricity and instability generated power. The methods of obtaining an alternating voltage of wind farms were analyzed and defined the impact on quality of electricity supply and reliability of installed equipment.

Стаття надійшла до редакції 12.10.16

Остаточна версія 26.11.16

**XV МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА  
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ-2017**

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

**XV 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

**7-9**  
**Листопада**

ОРГАНІЗАТОР:  
Міжнародний виставковий центр

ЗА ПІДТРИМКИ  
Міністерства енергетики  
та вугільної промисловості України

Технічний партнер: *Рені Медіа*