

УДК 621.311.24

Михайленко О.Ю.

Криворізький національний університет

Карабут Н.О.

Криворізький національний університет

Щокін В.П.

Криворізький національний університет

Мельник О.Є.

Криворізький національний університет

Кузьменко А.С.

Криворізький національний університет

СТРУКТУРНА ТА ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто питання побудови статистичних моделей вітрових умов мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу за результатами вимірювань. Отриманий математичний опис може бути застосований для визначення очікуваного рівня вироблення електроенергії під час розміщення локальної вітроелектростанції поруч з житловим масивом. Для проведення порівняльного аналізу використовувалися широко апробовані розподіли Вейбулла, Релея, Райса, Накагамі, обернений розподіл Гаусса, нормальний, логнормальний та гамма-розподіли. Результати досліджень дали змогу встановити, що для більшості зон вимірювання найкращу точність має розподіл Вейбулла, найгіршу – розподіл Релея. Статистичні моделі на базі розподілів Райса, Накагамі та нормального розподілу також можуть бути застосовані для опису вітрових умов мікрорайону в задачах, що не вимагають високої точності.

Ключові слова: вітроенергетичний потенціал, швидкість вітру, статистична модель, щільність розподілу ймовірностей, апроксимація, ідентифікація.

Постановка проблеми. У сучасних умовах значної енергоємності процесів, що забезпечують функціонування промислових підприємств, об'єктів комунальної інфраструктури та побутового сектору, гостро постає проблема постійного зростання цін на електроенергію. Однією з основних причин такого підвищення є обмежений характер запасів видобувних паливно-енергетичних ресурсів. Їх подальше інтенсивне скорочення приводить лише до збільшення вартості електроенергії, яка вироблена з їх використанням. Впровадження альтернативних джерел енергії дасть змогу якщо не повністю замінити традиційні енергоресурси, то знизити обсяги їх видобутку.

Нині серед електростанцій, що використовують відновлювальні джерела енергії, велике поширення отримали геліо- та вітроелектростанції. Ефективність їх роботи суттєво залежить від метеорологічних та екологічних умов місцевості, у якій вони розташовуються. Так, рівень ви-

роблення електроенергії фотоелектричними перетворювачами є низьким під час їх розміщення в областях з високим рівнем захмареності протягом року. Також суттєвим фактором, що впливає на ефективність, є значна запиленість, що характерна для промислових міст та мегаполісів. Вітроелектростанції більш придатні для застосування в місцевості, де спостерігаються високі швидкості вітру. Проте з огляду на наявність обертових частин та високий рівень ультразвуку, що створює вітрогенератор, вітроелектростанції розміщують за межами міст та селищ. Це приводить до необхідності побудови відповідної електричної мережі для інтеграції такої станції у структуру наявних систем електропостачання. Також за такого віддалення генеруючого обладнання виникають втрати під час передачі.

Для усунення зазначених недоліків доцільно застосувати вітроенергетичні установки (ВЕУ) потужністю до 20 кВт, які можна розміщувати по

системі глибокого вводу в безпосередній близькості до об'єкта електропостачання. Проте визначення ефективності впровадження локальної вітроелектростанції є можливим лише під час здійснення попереднього оцінювання вітрових умов місцевості. При цьому спиратись на дані окремих наявних метеостанцій недоцільно внаслідок їх розташування за межами міст, тому що характер забудови значно впливає на швидкість вітру навіть на незначних територіях [1].

Стаття присвячена дослідженню питання оцінювання вітрових умов місцевості, що придатна до розміщення локальної електростанції з вітроенергетичними установками низької потужності, призначеної для живлення побутових споживачів мікрорайону міста, шляхом вимірювання та визначення структури й параметрів статистичних моделей розподілу швидкостей вітру за ймовірністю виникнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно для оцінювання вітрового потенціалу місцевості використовуються статистичні моделі розподілу ймовірностей виникнення швидкості вітру певного значення. Це обумовлюється можливістю їх побудови на базі упорядкованих даних про результати вимірювань метеорологічних умов.

Нині у вітроенергетиці для визначення очікуваного рівня вироблення електроенергії широко застосовується дво- [2–6] або трипараметричний [7; 8] розподіл Вейбулла, який демонструє високу точність апроксимації гістограм швидкостей вітру, отриманих експериментальним шляхом. При цьому достатня якість наближення досягається за використання розподілу з двома параметрами, а саме форми та масштабу [9], що значно спрощує процес ідентифікації моделі.

Незважаючи на загальноприйняте застосування розподілу Вейбулла, результати досліджень вітрових умов різної місцевості демонструють, що іноді можна застосовувати розподіли Релея [8; 10], Райса [8; 10], Релея-Райса [9; 10], нормальний [8], логнормальний [7; 8], гамма-розподіли [7; 8], а також їх модифіковані комбінації [11–13].

На якість побудованої моделі суттєво впливає метод визначення її параметрів. Більшість досліджень присвячена оцінюванню ефективності параметричної ідентифікації моделі Вейбулла [14–16]. У роботі [16] проведено порівняльний аналіз застосування основних емпіричних та обчислювальних методів визначення параметрів цього розподілу. Авторами використано критерії $MAPE$, $MABE$, $RMSE$ та R^2 для оцінювання точності апроксимації. В результаті встановлено, що

за недостатньої відповідності вимірних даних теоретичному розподілу, яка притаманна реальним умовам, вищу якість має модель, параметри якої визначені з використанням методу максимальної правдоподібності.

Постановка завдання. Мета статті полягає у визначенні структури та параметрів статистичної моделі, яка дає змогу з найкращою точністю апроксимувати емпіричний розподіл ймовірності виникнення швидкості вітру певного значення в умовах міських територій, на прикладі окремого мікрорайону м. Кривого Рогу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати географічне розташування мікрорайонів м. Кривого Рогу, визначити найбільш придатний до розміщення локальної вітроелектростанції;

2) визначити точки ймовірного встановлення ВЕУ на прилеглих до мікрорайону територіях, провести вимірювання швидкості вітру в термін і з періодичністю, яких достатньо для отримання репрезентативної вибірки;

3) визначити структури статистичних моделей на базі теоретичних розподілів ймовірності, які будуть використані для апроксимації емпіричних даних, встановити метод оцінювання їх параметрів, провести параметричну ідентифікацію моделей;

4) виконати порівняльний аналіз отриманих моделей, визначити найбільш придатні до практичного застосування для оцінювання вітроенергетичного потенціалу місцевості.

Виклад основного матеріалу дослідження. На початковому етапі досліджень необхідно було здійснити вибір об'єкта м. Кривого Рогу з найбільш перспективними умовами для розташування локальної вітроелектростанції.

Проведений аналіз картографічних даних, наведених на рис. 1, показав, що, незважаючи на віддаленість мікрорайонів один від одного, достатні для встановлення комплексу вітроенергетичних установок прилегли території мають тільки мікрорайони Сонячний, Східний-2, 3 та Індустріальний. Для остаточного визначення об'єкта розраховано питому потужність споживачів мікрорайону на квадратний кілометр площі потенційного розміщення електростанції. Встановлено, що для Індустріального мікрорайону цей показник є найнижчим, складаючи $2,36 \text{ Вт/м}^2$, що зумовлене меншою кількістю споживачів житлового масиву та більшою площею прилеглих територій. Для мікрорайонів Східний-2, 3 та Сонячний питома потужність склала $25,27 \text{ Вт/м}^2$ та $88,29 \text{ Вт/м}^2$ відповідно.

Питомий рівень вироблення електроенергії ВЕУ залишається на обмеженому рівні, тому як об'єкт доцільно розглядати мікрорайон Індустріальний.

Прилеглу до мікрорайону територію було умовно розділено на три зони (рис. 2), такі як західний майданчик площею 1,84 км², східний майданчик площею 1,23 км² та схили відпрацьованого кар'єру площею 0,19 км². Західний та східний майданчики розділені лінією швидкісного трамваю та об'їзною дорогою. Більш вдале розташування має західний майданчик. На півночі він безпосередньо межує зі спорудами мікрорайону. Окрім цих багатоповерхових будинків, елементом захищеності є схили кар'єру в південно-західній частині майданчику.

Також слід відзначити, що західний майданчик має найбільшу площу. Особливостями території є увігнута форма рельєфу та наявність у її складі землі сільськогосподарського (с/г) призначення. За класифікацією Мілевського [1] розглянуте місце розташування має клас відкритості 6.

Східний майданчик менший за площею, ніж західний, та перебуває серед елементів захищеності. На півночі, сході та півдні від нього розташовані промислові споруди Криворізької вовнопрядильної фабрики та ТОВ «Криворізький ремонтно-механічний завод». Проте для цієї території характерна плоска форма рельєфу, тому за шкалою Мілевського вона має клас відкритості 5.

Найвищий клас відкритості 14 мають вершини вироблення кар'єру, що обумовлюється відсутністю на їх висоті елементів захищеності та випуклою формою рельєфу. Проте обмежена площа дає змогу розмістити на ній до 7 ВЕУ.

Для оцінювання вітроенергетичного потенціалу вибрано 18 точок ймовірного встановлення ВЕУ (рис. 3) залежно від рельєфу місцевості та віддалення завод. У них проведено серію вимірювань швидкості вітру. Вимірювання здійснювалися цифровими анемометрами, розміщеними на п'ятиметровій щоглі, протягом 2018 року від 4 до 6 разів на день. У результаті для кожної точки отримано вибірки з 1 856 елементів кожна для швидкості вітру. Загальний обсяг отриманих даних склав 33 408 значень.

Отримані дані було розділено на три частини за точками вимірювання швидкості вітру, що належать до східного та західного майданчиків. При цьому площа останнього розглядалася з урахуванням території с/г призначення та без неї. Окремо досліджувалась вибірка, що відповідає всій території можливого розміщення ВЕУ, яка об'єднує всі дані сукупності.

Підготовка до побудови статистичних моделей розподілу швидкостей вітру здійснювалася шляхом групування даних окремо в чотирьох наборах із застосуванням способу нормування, придатного до апроксимації теоретичною щільністю розподілу ймовірностей. Для забезпечення умови дотримання одиничної суми площ прямокутників,

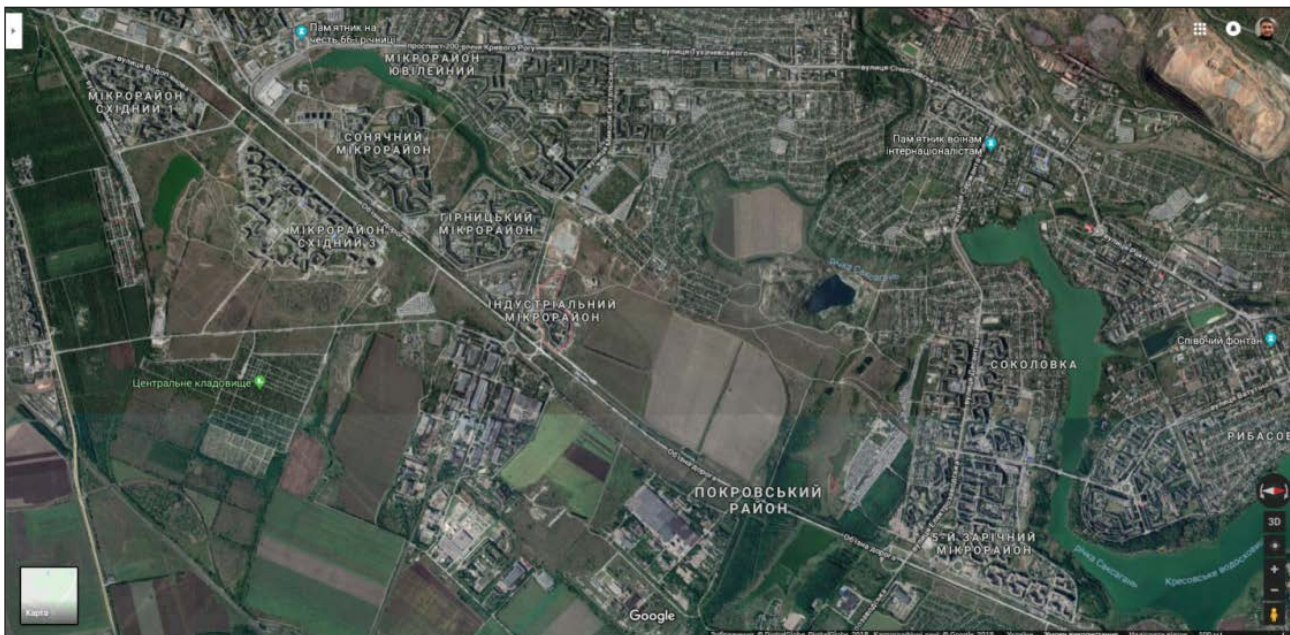


Рис. 1. Географічне розташування мікрорайонів міста Кривого Рогу з урахуванням забудови прилеглих територій [17]



Рис. 2. Придатні для розміщення локальної вітроелектростанції майданчики біля мікрорайону Індустріальний



Рис. 3. Точки проведення вимірювань швидкості та напрямку вітру

у які згруповані дані емпіричної гістограми розподілу швидкостей вітру за ймовірністю вимкнення, використано вираз:

$$p_i = \frac{1}{N} \cdot \frac{n_{vi}}{b_i}, \quad (1)$$

де p_i – ймовірність виникнення швидкості вітру в межах інтервалу групування; n_{vi} – кількість елементів вибірки, що потрапили в межі інтервалу групування; b_i – ширина інтервалу групування; N – загальне число елементів у вибірці.

Для дослідження можливості апроксимації емпіричних розподілів теоретичними було запропоновано розглянути розподіли Вейбулла, Релея, Райса, Накагамі, нормальний, логнормальний, гамма-розподіл та обернений Гауссів. Розподіл Релея є однопараметричним, усі інші – двопараметричними. Параметрична ідентифікація відповідних статистичних моделей здійснювалась методом максимальної правдоподібності.

Адекватність отриманих моделей встановлювалась спочатку із застосуванням критерію узгодження Пірсона (критерій χ^2), який дає змогу перевірити статистичну гіпотезу відповідності швидкості вітру як випадкової величини теоретичному закону розподілу ймовірностей. Для цього здійснювався розрахунок виразу критерію:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(p_i - \hat{p}_i)^2}{\hat{p}_i}, \quad (2)$$

де p_i – значення ймовірності емпіричного розподілу; \hat{p}_i – значення ймовірності теоретичного розподілу.

Обчислення проводилися для точок, що відповідають точкам початку інтервалів групування емпіричного розподілу. Оцінювання здійснювалось для рівнів значущості $p = 0,05$ і $p = 0,01$.

З огляду на критику методів перевірки статистичних гіпотез, що використовують p -значення, додатково перевірка ступеня точності опису результатів вимірювання статистичними моделями здійснювалась шляхом розрахунку коефіцієнта детермінації R^2 та коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки $CV(RMSE)$. Останній показник використовується замість більш вживаної квадратичної похибки $RMSE$, тому дає змогу оцінити ступінь відхилення емпіричних даних від модельних у відсотковому співвідношенні. Вирази для розрахунків вищезгаданих показників такі:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})^2} \right), \quad (3)$$

де \bar{p} – середнє значення ймовірності вітру обчислене за даними емпіричного розподілу;

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2}{\bar{p}}}. \quad (4)$$

Обчислювальні експерименти проводилися для таких трьох інтервалів групування емпіричних даних про швидкість вітру: 0,3 м/с (26 інтервалів); 0,6 м/с (14 інтервалів); 0,9 м/с (9 інтервалів).

Графічне представлення емпіричних розподілів за різних інтервалів групування та статистичні

моделі, що апроксимують їх, з параметрами, що забезпечують максимізацію функції правдоподібності, наведені на рис. 4–6.

Результати обчислення критерія Пірсона для чотирьох різних майданчиків та трьох інтервалів групування швидкостей зведені у табл. 1–3.

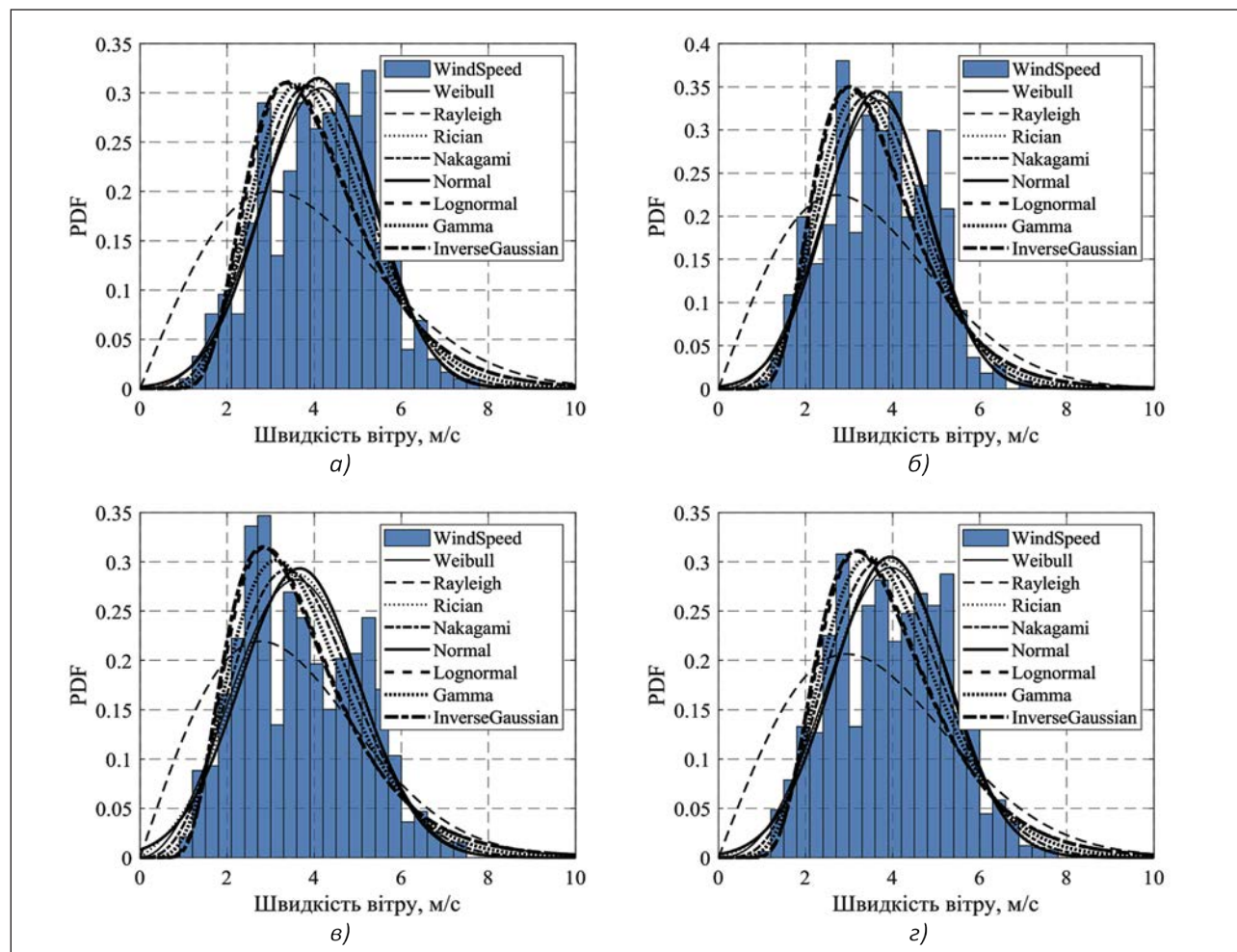


Рис. 4. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,3 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

Таблиця 1

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерія Пірсона при інтервалі групування 0,3 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | Західний майданчик без території с/г | Східний майданчик | Загальна площа |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|
| Вейбулл | 1,81 | 3,05 | 5,34 | 2,88 |
| Релей | 92,13 | 75,56 | 47,1 | 72,91 |
| Райс | 2,46 | 3,64 | 6,68 | 3,7 |
| Накагамі | 4,08 | 3,03 | 3,56 | 2,94 |
| Нормальний | 2,58 | 3,99 | 7,88 | 4,23 |
| Логнормальний | 17,29 | 7,96 | 5,1 | 9,52 |
| Гамма | 8,37 | 4,49 | 3,11 | 4,82 |
| Обернений Гаусса | 20,77 | 9,07 | 6,09 | 11,06 |

При інтервалі 0,3 м/с (табл. 1) та $p = 0,01$ нульові гіпотези про відповідність теоретичного розподілу емпіричному були відхилені для розподілу Релея за всіма чотирма майданчиками. Також

перевірку критерієм не пройшли статистичні моделі логнормального розподілу та оберненого розподілу Гаусса. Аналогічні результати отримані під час застосування рівня значущості 0,05.

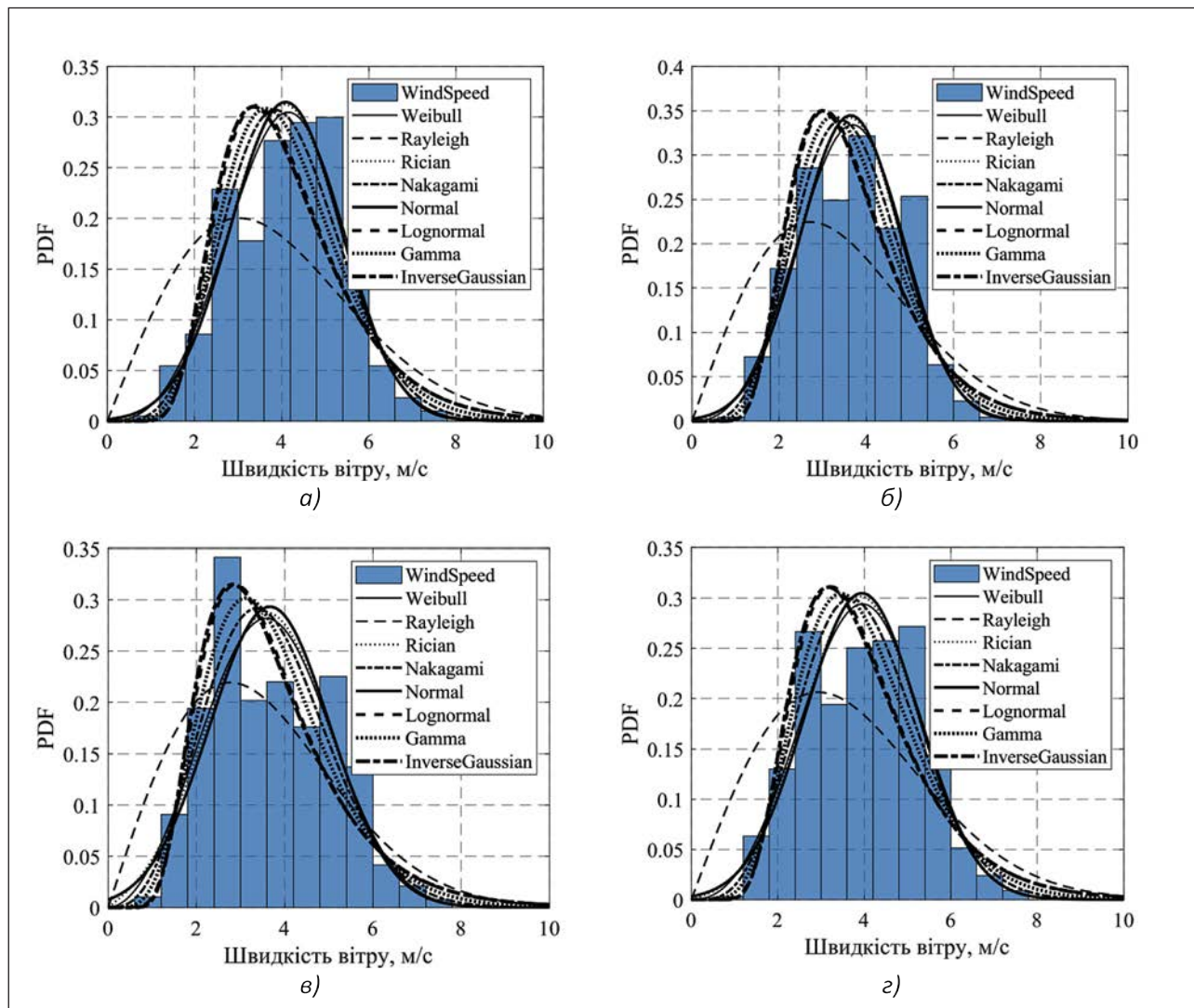


Рис. 5. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,6 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

Таблиця 2

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерія Пірсона при інтервалі групування 0,6 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | Західний майданчик без території с/г | Східний майданчик | Загальна площа |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|
| Вейбулл | 1,67 | 1,62 | 3,6 | 2,04 |
| Релей | 47,17 | 38,65 | 25,6 | 38,09 |
| Райс | 1,55 | 1,92 | 4,46 | 2,54 |
| Накагамі | 2,16 | 1,16 | 2,31 | 1,76 |
| Нормальний | 1,67 | 2,19 | 5,24 | 2,91 |
| Логнормальний | 8,92 | 3,16 | 2,2 | 4,32 |
| Гамма | 4,26 | 1,6 | 1,64 | 2,4 |
| Обернений Гаусса | 10,98 | 3,73 | 2,63 | 4,96 |

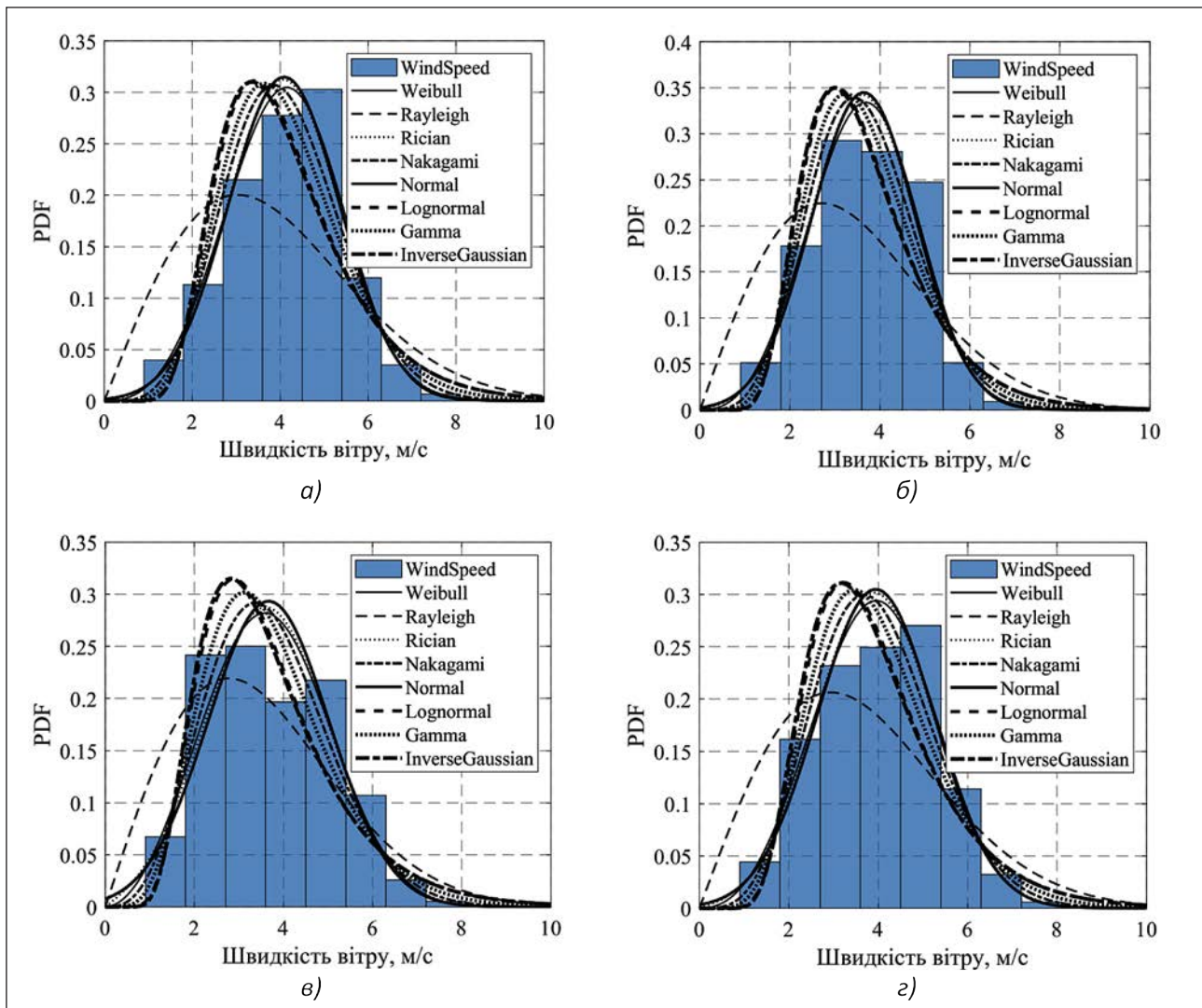


Рис. 6. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,9 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

При інтервалі 0,6 м/с (табл. 2) та $p = 0,05$ тест Пірсона виключив ідентичні шість моделей, які наведені для попередньої серії. Використання рівня значущості 0,01 привело до відхилення моделей гамма-розподілу для західного майданчику з територією с/г призначення, розподілу Райса та нормального розподілу для східного майданчику, логнормального розподілу та оберненого розподілу Гауса для загальної площі.

При інтервалі 0,9 м/с (табл. 3) та $p = 0,05$ перевірку критерієм не пройшли модель розподілу Релея для всіх чотирьох майданчиків, моделі логнормального розподілу та оберненого розподілу Гауса для західного майданчику в обох випадках та загальної площі, а також модель гамма-розподілу для західного майданчику із с/г територією. Застосування рівня значущості 0,01 привело до відхилення моделі гамма-розподілу для західного

майданчику без с/г територій та загальної площі, а для східного майданчику – моделей нормального розподілу та оберненого розподілу Гауса.

Отже, найгірші показники під час проходження тесту Пірсона продемонстрував розподіл Релея. Найнижчі значення критерія має розподіл Вейбулла незалежно від величини інтервалу та від досліджуваного майданчику. Окрім нього, для апроксимації емпіричного розподілу можуть бути застосовані розподіли Накагамі та Райса, а також нормальний розподіл. Особливо слід відзначити стабільність розподілу Накагамі. З огляду на те, що обчислені значення критерія для нього здебільшого перевищують значення, визначені для розподілу Райса та нормального розподілу на відповідних майданчиках, вони жодного разу не перевищили граничні значення та не привели до відхилення моделі. Аналогічну стійкість продемонстрував розподіл Вейбулла.

Таблиця 3

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерію Пірсона при інтервалі групування 0,9 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | Західний майданчик без території с/г | Східний майданчик | Загальна площа |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|
| Вейбулл | 0,39 | 0,47 | 13,31 | 0,47 |
| Релей | 29,66 | 24,32 | 13,24 | 22,56 |
| Райс | 0,51 | 0,54 | 1,58 | 0,62 |
| Накагамі | 1,61 | 0,84 | 0,98 | 0,79 |
| Нормальний | 0,44 | 0,54 | 1,86 | 0,67 |
| Логнормальний | 6,4 | 3,15 | 1,54 | 3,35 |
| Гамма | 3,4 | 1,66 | 0,98 | 1,66 |
| Обернений Гаусса | 7,15 | 3,56 | 1,76 | 3,8 |

Таблиця 4

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,3 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | | Західний майданчик без території с/г | | Східний майданчик | | Загальна площа | |
|------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² |
| Вейбулл | 6,97 | 0,8404 | 8,12 | 0,7604 | 8,16 | 0,6641 | 6,89 | 0,8247 |
| Релей | 13,37 | 0,412 | 13,31 | 0,3557 | 10,23 | 0,4729 | 11,59 | 0,5038 |
| Райс | 7,47 | 0,8162 | 8,47 | 0,7391 | 8,39 | 0,6455 | 11,59 | 0,5038 |
| Накагамі | 8,4 | 0,7681 | 8,95 | 0,7086 | 8,13 | 0,6671 | 7,26 | 0,8054 |
| Нормальний | 7,39 | 0,8208 | 8,46 | 0,7398 | 8,65 | 0,6229 | 7,27 | 0,8046 |
| Логнормальний | 10,91 | 0,6085 | 10,98 | 0,5617 | 8,82 | 0,6084 | 9,79 | 0,6462 |
| Гамма | 9,54 | 0,7004 | 9,82 | 0,6492 | 8,27 | 0,6555 | 8,64 | 0,7242 |
| Обернений Гаусса | 11,22 | 0,5862 | 11,18 | 0,5452 | 8,97 | 0,5944 | 10 | 0,6305 |

Таблиця 5

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,6 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | | Західний майданчик без території с/г | | Східний майданчик | | Загальна площа | |
|------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² |
| Вейбулл | 10,29 | 0,8337 | 10,46 | 0,791 | 10,86 | 0,7338 | 9,87 | 0,829 |
| Релей | 19,65 | 0,3931 | 18,87 | 0,3195 | 15,36 | 0,467 | 17,27 | 0,4766 |
| Райс | 11,19 | 0,8032 | 10,99 | 0,7693 | 11,09 | 0,7226 | 10,46 | 0,808 |
| Накагамі | 12,65 | 0,7485 | 11,76 | 0,7359 | 10,86 | 0,7337 | 11,31 | 0,7756 |
| Нормальний | 11,05 | 0,8082 | 10,95 | 0,7707 | 11,31 | 0,7112 | 10,44 | 0,8089 |
| Логнормальний | 16,32 | 0,5814 | 14,83 | 0,5796 | 12,44 | 0,6507 | 14,36 | 0,6382 |
| Гамма | 14,36 | 0,676 | 13,08 | 0,6732 | 11,29 | 0,7124 | 12,66 | 0,7187 |
| Обернений Гаусса | 16,77 | 0,5583 | 15,19 | 0,5591 | 12,81 | 0,6294 | 14,71 | 0,6205 |

Таблиця 6

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,9 м/с

| Вид розподілу | Західний майданчик з територією с/г | | Західний майданчик без території с/г | | Східний майданчик | | Загальна площа | |
|------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² | CV RMSE | R ² |
| Вейбулл | 14,06 | 0,7772 | 15,07 | 0,6763 | 11,85 | 0,7497 | 12,73 | 0,7881 |
| Релей | 24,19 | 0,3314 | 23,78 | 0,194 | 16,71 | 0,5018 | 20,82 | 0,4327 |
| Райс | 15,15 | 0,7378 | 15,82 | 0,6433 | 11,99 | 0,7434 | 13,4 | 0,7649 |
| Накагамі | 17,31 | 0,6575 | 17,59 | 0,559 | 12,72 | 0,7116 | 15,09 | 0,7021 |
| Нормальний | 14,19 | 0,746 | 15,63 | 0,6519 | 12,12 | 0,7381 | 13,24 | 0,7704 |
| Логнормальний | 22,27 | 0,4337 | 22,23 | 0,296 | 16,29 | 0,5265 | 19,59 | 0,4977 |
| Гамма | 19,63 | 0,56 | 19,72 | 0,446 | 14,17 | 0,642 | 17,16 | 0,6146 |
| Обернений Гаусса | 22,88 | 0,402 | 22,71 | 0,2651 | 16,87 | 0,4924 | 20,09 | 0,4719 |

На наступному етапі досліджень виконано оцінювання якості отриманих моделей з використанням коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки та коефіцієнта детермінації (табл. 4–6). Встановлено, що найгіршу точність під час моделювання емпіричних даних швидкості вітру має розподіл Релея. Кращі показники продемонстрували обернений розподіл Гаусса, логнормальний та гамма-розподіли, а також розподіл Накагамі.

Найбільш придатними до практичного застосування є розподіли Вейбулла й Райса, а також нормальний розподіл. При цьому слід відзначити, що два останніх показали приблизно однакову точність. Проте аналіз даних дав змогу визначити особливість, що під час збільшення інтервалу групування якість опису експериментальних даних нормальним розподілом підвищується. Так, для західного майданчику без с/г території при інтервалі 0,3 м/с варіація похибки та коефіцієнт детермінації були приблизно однаковими: $CV(RMSE) = 8,46\%$, $R^2 = 0,7398$ для нормального розподілу та $CV(RMSE) = 8,47\%$, $R^2 = 0,7391$ для розподілу Райса. Під час зміни інтервалу до значення 0,9 м/с показники якості отримали такі значення: $CV(RMSE) = 15,63\%$, $R^2 = 0,6519$ та $CV(RMSE) = 15,82\%$, $R^2 = 0,6433$ відповідно, тобто якість апроксимації даних нормальним розподілом підвищилась. У результаті лише під час моделювання вітрових умов східного майданчику кращу точність має розподіл Райса на всіх трьох досліджених інтервалах групування.

Здебільшого найвищу якість має модель на базі розподілу Вейбулла. Лише для східного майданчику при інтервалах 0,3 м/с та 0,6 м/с вищі показники точності продемонстрував розподіл Накагамі. Причому для інтервалу 0,6 м/с при рівних значеннях $CV(RMSE)$ і R^2 цей факт можна встановити шляхом порівняння величини критерія Пірсона для зазначених теоретичних розподілів.

Результати обчислювальних експериментів також дали змогу встановити особливість, що іноді застосування критерія Пірсона демонструє більшу узгодженість теоретичного розподілу з емпіричним для моделі, яка має гірші показники якості апроксимації порівняно з іншими. Так, під час математичного опису розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру на західному майданчику без с/г території з використанням моделі Райса критерій Пірсона склав $\chi^2=2,46$ при значеннях $CV(RMSE) = 7,47\%$, $R^2 = 0,8162$, а під час застосування нормального розподілу – $\chi^2=2,58$ при значеннях $CV(RMSE) = 7,39\%$, $R^2 = 0,8202$.

Аналіз впливу інтервалу групування швидкостей вітру на якість отриманих статистичних моделей показав, що під час збільшення значення інтервалу точність апроксимації знижується. Також зазначимо, що розподіл моделей за якістю на трьох розглянутих інтервалах групування має відмінності для окремих майданчиків.

Висновки. У статті проведено дослідження ефективності застосування статистичних моделей на базі теоретичних розподілів під час апроксимації емпіричного розподілу ймовірності виникнення швидкості вітру певного значення в умовах мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу. Дані про вітрові умови отримані шляхом вимірювання в місцях потенційного розміщення вітроенергетичних установок, на майданчиках з різним класом відкритості, що розташовані у безпосередній близькості до житлового масиву. Таке розміщення локальної вітроелектростанції дасть змогу реалізувати переваги глибокого вводу.

Отримані результати демонструють, що кращу точність апроксимації має розподіл Вейбулла. Нижчу якість показали розподіли Райса, Накагамі та нормальний розподіл, проте їх похибка (особливо при маленьких інтервалах групування) суттєво не відрізняється від розподілу Вейбулла. В одному випадку при інтервалі групування 0,3 м/с найвищу якість продемонстрував розподіл Накагамі. Придатними до застосування у задачах, що не вимагають високої точності, є логнормальний та гамма-розподіли, а також обернений розподіл Гаусса. Найгіршою виявилась модель на базі однопараметричного розподілу Релея, яка має найвищу варіацію похибки, найнижчий коефіцієнт детермінації, а також була відхилена під час перевірки критерієм Пірсона в усіх досліджених випадках.

Для оцінювання якості моделі доцільно виконувати розрахунок одного з двох критеріїв: або коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки, або коефіцієнта детермінації, тому що розрахунок обох одночасно є надлишковим, оскільки вони показують однаковий результат, а також проводити перевірку відповідності теоретичних розподілів емпіричному за допомогою критерія Пірсона. Це дасть змогу знизити обчислювальне навантаження під час вибору придатної до моделювання структури розподілу.

Подальші дослідження спрямовані на оцінювання ефективності застосування вітроенергетичних установок низької потужності у розглянутих вітрових умовах під час покриття потреб побутових споживачів.

Список літератури:

1. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
2. Modelling the variability of the wind energy resource on monthly and seasonal timescales / B. Alonzo, H.-K. Ringkjøb, B. Jourdir, P. Drobinski, R. Plougonven, P. Tankov. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. P. 1434–1446.
3. Weibull Wind-Speed Distribution Parameters Derived from a Combination of Wind-Lidar and Tall-Mast Measurements Over Land, Coastal and Marine Sites. S.-E. Gryning, R.R. Floors, A. Pena, E. Batchvarova, B. Brummer. *Boundary-Layer Meteorology*. 2016. Vol. 159. P. 329–348.
4. Kidmo D.K., Danwe R., Doka S.Y., Djongyang N. Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull Methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Revue des Energies Renouvelables*. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 105–125.
5. Sedghi M., Hannani S.K., Boroushaki M. Estimation of Weibull parameters for wind energy application in Iran's cities. *Wind and Structures*. 2015. Vol. 21. No. 2. P. 203–221.
6. Parajuli A. A Statistical Analysis of Wind Speed and Power Density Based on Weibull and Rayleigh Models of Jumla, Nepal. *Energy and Power Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 271–282.
7. Pobocikova I., Sedliackova Z., Michalkova M. Application of four probability distributions for wind speed modeling. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 713–718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.123>.
8. Morgan E.C., Lackner M., Vogel R.M., Baise L.G. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. No 1. P. 15–26.
9. Drobinski P., Coulais C., Jourdir D. Surface Wind-Speed Statistics Modelling: Alternatives to the Weibull Distribution and Performance Evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*. 2015. Vol. 157. No 1. P. 97–123.
10. Drobinski P., Coulais C. Is the Weibull distribution really suited for wind statistics modeling and wind power evaluation? URL: <https://arxiv.org/abs/1211.3853>.
11. Monahan A.H. Idealized models of the joint probability distribution of wind speeds. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2018. Vol. 25. P. 335–353.
12. Kantar Y.M., Usta I., Yenilmez I., Arik I. A Study on Estimation of Wind Speed Distribution by Using the Modified Weibull Distribution. *International Journal of Informatics Technologies*. 2016. Vol. 9. No 2. P. 63–70.
13. Cakmakyapan S., Ozel G. The Poisson Gamma distribution for wind speed data. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1726.
14. Azad A.K., Rasul M.G., Yusaf T. Statistical Diagnosis of the Best Weibull Methods for Wind Power Assessment for Agricultural Applications. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 3056–3085.
15. Kang D., Ko K., Huh J. Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea. *Energies*. 2018. Vol. 11. P. 356.
16. Teyabeen A.A., Akkari F.R., Jwaid A.E. Comparison of Seven Numerical Methods For Estimating Weibull Parameters For Wind Energy Applications. *2017 UKSim-AMSS 19th International Conference on Computer Modelling & Simulation (UKSim)*. 2017. P. 173–178.
17. Мікспорайони м. Кривого Рогу / Google Maps. URL: <https://goo.gl/maps/4uCqGMAS782>.

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

В статье рассмотрены вопросы построения статистических моделей ветровых условий микрорайона Индустриальный г. Кривого Рога по результатам измерений. Полученное математическое описание может быть применено для определения ожидаемого уровня выработки электроэнергии при размещении локальной ветроэлектростанции рядом с жилым массивом. Для проведения сравнительного анализа использовались широко апробированные распределения Вейбулла, Рэлея, Райса, Накагами, обратное распределение Гаусса, нормальное, логнормальное и гамма-распределения. Результаты исследований позволили установить, что для большинства зон измерения самую лучшую точность имеет распределение Вейбулла, самую худшую – распределение Рэлея. Статистические модели на базе распределений Райса, Накагами и нормального распределения также могут быть применены для описания ветровых условий микрорайона в задачах, не требующих высокой точности.

Ключевые слова: ветроэнергетический потенциал, скорость ветра, статистическая модель, плотность распределения вероятностей, аппроксимация, идентификация.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE WIND SPEED DISTRIBUTION STATISTICAL MODEL IN URBAN AREAS

The article presents the results of modeling the wind speed distribution in Industrial micro district area of Kryvyi Rih. Statistical models approximate measurement data. The resulting mathematical description can be used to determine the expected level of local wind power plant electricity generation. Weibull, Rayleigh, Rice,

Nakagami distributions, Gaussian inverse distribution, normal, lognormal and gamma distributions were used for comparative study. Probability density functions parameters were estimated using maximum likelihood method for three wind speed grouping intervals. Differences between empirical and theoretical distributions were determined by the Pearson's chi-squared test, the coefficient of variation of the mean square error CV(RMSE) and the coefficient of determination R^2 . The research results showed that the Weibull distribution has the best accuracy of wind speed data approximation. The worst one has the one-parameter Rayleigh distribution. Statistical models based on the Rice, Nakagami and normal distribution distributions can also be used to describe the wind speed distribution in tasks with low requirements.

Key words: *wind energy potential, wind speed, statistic model, probability density function, approximation, identification.*