

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.Є. ПУХОВА**

**ТЕРЕХОВ ВОЛОДИМИР ЄВГЕНОВИЧ**



УДК 004.942 : 621.548 : 620.928

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОТУРБІН В УМОВАХ  
ОБМЕЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України та ПрАТ “Вітряний парк Очаківський”.

Науковий керівник      доктор технічних наук, старший дослідник  
**Куцан Юлій Григорович,**  
Інститут проблем моделювання в  
енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
в.о. заступника директора з науково-технічної роботи

Офіційні опоненти:      доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Васько Петро Федосійович,**  
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,  
завідувач відділу гідроенергетики;

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Верлань Андрій Анатолійович,**  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,  
професор кафедри автоматизації проектування  
енергетичних процесів та систем.

Захист відбудеться «16» вересня 2021 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01 Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

Автореферат розісланий « 9 » серпня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01



В.В. Душеба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Світова енергетика – галузь промисловості, що стрімко розвивається, темпи річного приросту якої сягали 30 %. Розвинені країни світу давно усвідомили безперспективність розвитку електростанцій на традиційному паливі і активно інвестують у технології використання відновлюваних джерел енергії. Україна не залишилась у стороні від цієї тенденції і сьогодні, незважаючи на майже сорокарічне відставання в цьому напрямку, активно сприяє розвитку вітроенергетики.

Починаючи з 2010 року, з прийняттям закону про “зелений” тариф, в Україні розпочалося активне будівництво вітрових електричних станцій (ВЕС), особливістю функціонування яких є нерівномірність вітрового навантаження генеруючого устаткування і, як наслідок, нерівномірність потужності генерації електроенергії. Тому експлуатація ВЕС у складі об’єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України потребує інтенсивного використання потужності наявного регулюючого та маневрового устаткування і часто призводить до необхідності введення обмежень на потужність генерації ВЕС. На сьогоднішній день більша частина генеруючих активів та електромереж ОЕС зношена та неефективна, а баланс потужності енергосистеми характеризується дефіцитом як маневрених, так і регулюючих потужностей. Більшість ВЕС України розташована в районі Північного Причорномор’я, яке характеризується недостатньою кількістю магістральних мереж, порівняно з промисловими районами країни, що змушує приєднувати ВЕС до малопотужних ліній і передавати електричну енергію на межі їх пропускної здатності. За таких обставин безперешкодна генерація електричної енергії ВЕС не гарантується, а тривалість дії та частота обмежень потужності генерації має тенденцію до збільшення.

Визначення збитків від обмеження потужності генерації ВЕС та вжиття заходів щодо мінімізації таких збитків є вкрай актуальною науково-прикладною задачею.

Отже, постає задача визначення прогнозних втрат обсягів виробітку електроенергії ВЕС, обумовлених величиною встановленого обмеження потужності генерації станції, в залежності від технічних характеристик кожної вітроелектричної установки (ВЕУ) у її складі та особливостей вертикальної характеристики вітрового потенціалу місцевості, на якій розташована така установка.

Дія обмеження, в залежності від причин її виникнення, може тривати від кількох годин, наприклад, оперативні диспетчерські команди НЕК “Укренерго”, до кількох місяців – ремонт (реконструкція) повітряних ліній та підстанцій, під час проведення яких неможливо забезпечити передачу встановленої потужності ВЕС у повному обсязі через тимчасові схеми приєднання, або навіть років – коли видача встановленої потужності ВЕС неможлива через проблеми, вирішення яких потребує суттєвих часових та матеріальних витрат, наприклад – проведення реконструкції або будівництва повітряних ліній та підстанцій.

Задача визначення фактичних втрат від накладеного обмеження на ВЕС зводиться до обчислення різниці між теоретичним виробітком ВЕС без накладеного обмеження та фактичним виробітком за лічильниками електричної енергії.

Теоретичний виробіток визначається шляхом відповідного розрахунку за характеристиками потужності складових ВЕУ та фактичних даних з їх бортових анемометрів у вигляді середньої швидкості вітру за певний часовий проміжок, який визначається відповідними налаштуваннями системи керування і становить, як правило, 5 – 10 хв.

Задача визначення прогнозних теоретичних втрат на певний часовий період за відомого значення накладеного обмеження потребує визначення прогнозного виробітку ВЕС без врахування та, відповідно, з врахуванням даного обмеження, в залежності від технічних характеристик кожної моделі ВЕУ та особливостей вертикальної зміни вітрового потенціалу конкретної місцевості.

Задача визначення прогнозованого виробітку ВЕС ускладнюється відсутністю у вільному доступі точних характеристик потужності ВЕУ через сучасну тенденцію їх приховування виробниками з огляду на існуючу конкуренцію. В існуючі характеристики потужності завідомо вноситься похибка невизначеності шляхом їх представлення у вигляді таблиць з широким інтервалом дискретності або графіків потужності невеликого масштабу, а сучасна тенденція заміни характеристики ВЕУ на прогнозований річний виробіток ВЕУ за експериментальних умов вимірювання унеможливорює точне визначення характеристики потужності.

На сьогодні, за відсутності спеціалізованого програмно-апаратного комплексу керування ВЕС, розподіл накладеного обмеження на складові ВЕУ визначається оператором ВЕС на власний розсуд. Оператор застосовує, наприклад, рівномірний розподіл обмеження потужності генерації ВЕС між ВЕУ або розподіл за номінальною потужністю ВЕУ, що призводить до збільшення втрат обсягу генерації електроенергії.

Тому задача розробки математичних моделей ВЕУ, що функціонують в умовах обмеження потужності генерації ВЕС, які дозволяють з достатньою для практики точністю визначати об'єм виробітку електричної енергії в заданих вітрових умовах, є актуальним завданням дослідження.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України у відповідність стратегічним пріоритетам розвитку держави в рамках Національного проекту “Енергія природи”; відповідно з планами наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики (ВФТПЕ) НАН України та цільової програми наукових досліджень “Фундаментальні дослідження процесів перетворення та використання енергії” по темам: “Інформаційно-аналітична система моніторингу енергоефективності при генеруванні, передачі та споживанні електричної енергії”, шифр “Енергія”, державний реєстраційний № 0104U000903; “Розвиток теорії, розробка нових методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання енергетичних і енергоємних об'єктів, систем і установок”, шифр “Модель”, державний реєстраційний № 0107U001945; “Розвиток теорії, розробка методів і засобів контролю та діагностики нелінійних динамічних систем стосовно до силових енергетичних установок”, шифр “Пошук”, державний реєстраційний № 0116U005649, відповідно з постановою Бюро ВФТЕ НАН України від 05.07.2016р. №11 та рішення Експертної ради з питань оцінювання тем фундаментальних науково-дослідних робіт при НАН України від 07.12.2016р. №5.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є визначення впливу типорозміру ВЕУ та величини накладеного обмеження потужності генерації на об'єм виробітку електричної енергії в заданих вітрових умовах згідно шляхом розроблення відповідних математичних моделей.

*Об'єкт дослідження* – процес генерації електричної енергії ВЕС, яка укомплектована ВЕУ мультимегаватного класу різних типорозмірів.

*Предмет дослідження* – залежність потужності генерації електричної енергії ВЕС від типорозміру складових ВЕУ та величини накладеного обмеження.

*Завдання дослідження.* Для досягнення мети роботи вирішувалися наступні основні задачі:

1. Визначити особливості роботи ВЕС в умовах обмеження потужності генерації, дослідити вплив встановленого обмеження та основних технічних параметрів ВЕУ на генерацію електроенергії ВЕС, провести аналіз відомих математичних моделей ВЕУ (ВЕС), визначити їх переваги та недоліки відносно теми дисертаційної роботи.

2. Визначити основні параметри ВЕУ, що істотно впливають на її характеристику потужності та розробити відповідну математичну модель.

3. За результатами синхронних висотних вітрових вимірювань дослідити залежність розподілу швидкостей вітру від висоти приземного шару атмосфери, провести аналіз відомих підходів визначення вітрового потенціалу на довільній висоті та удосконалити їх під потреби математичної моделі процесу генерації електричної енергії ВЕУ (ВЕС).

4. Розробити математичну модель ВЕУ та ВЕС, яка враховуватиме вплив величини накладеного обмеження та основних параметрів ВЕУ в заданих вітрових умовах.

5. Розробити модель раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, яка враховує особливості вітрового потенціалу конкретної місцевості та основні параметри ВЕУ.

6. Провести співставлення теоретичних результатів з фактичними результатами роботи ВЕС України та проведеними обчислювальними експериментами.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано: ймовірнісно-статистичні методи опрацювання масивів експлуатаційних та даних вимірювань, абстрагування – для визначення основних факторів впливу на генерацію ВЕС, математичне моделювання, порівняльний аналіз, кореляційний та регресійний аналізи.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному.

*Вперше розроблено:*

– математичну модель ВЕУ, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє розрахувати характеристику потужності ВЕУ за двома основними її параметрами – номінальною потужністю генератора та діаметром вітроколеса;

– статичну математичну модель ВЕУ, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує зв'язок між потужністю генерації установки, накладеним обмеженням на потужність її генерації та технічними параметрами ВЕУ, такими, як номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса, що дозволяє визначати обсяги генерації електроенергії в заданих вітрових умовах функціонування ВЕУ;

– метод раціонального розподілу встановленого обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину обмежень потужності для складових ВЕУ.

На відміну від існуючих методів розподілу обмеження потужності, такий метод враховує особливості вітрового потенціалу конкретної місцевості та технічні параметри кожної ВЕУ, що дозволяє мінімізувати втрати від накладеного обмеження.

Удосконалено процедуру визначення розподілу швидкостей вітру на різних висотах приземного шару атмосфери за результатами синхронних висотних вимірювань вітрових параметрів з використанням існуючих параметрів у вигляді ступеневих функцій.

*Набули подальшого розвитку:*

- методи математичного моделювання генерації електроенергії ВЕУ;
- методи перерахунку параметрів вітрового потенціалу на задану висоту приземного шару атмосфери.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає у тому, що розроблена математична модель ВЕС дозволяє:

- визначати очікувані обсяги річної генерації електроенергії в залежності від вітрового потенціалу місцевості, на якій передбачається будівництво ВЕС;
- визначати втрачені обсяги генерації електроенергії від накладеного обмеження потужності генерації електроенергії;
- здійснювати обґрунтований вибір ВЕУ серед вже сконструйованих за техніко-економічними характеристиками, що найбільш повною мірою відповідають заданим вітровим умовам, або замовити виготовлення установки з необхідними конструктивними параметрами в разі її відсутності на світовому ринку;
- раціонально розподілити накладене обмеження потужності генерації ВЕС на множину складових ВЕУ і тим самим зменшити обсяги втраченої електроенергії;
- розроблена математична модель ВЕУ покладена в основу метода визначення вартості виробленої електричної енергії, що дозволило проаналізувати економічну ефективність роботи ВЕС України.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, що увійшли до дисертації, отримані здобувачем особисто. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1] – огляд сучасного стану вітроенергетики України; [2] – основні ідеї, збір параметричних даних, розробка математичної моделі та співставлення с фактичними даними результатів математичного моделювання генерації ВЕУ; в [3] – розробка математичної моделі генерації ВЕУ; в [4] – розробка математичної моделі генерації ВЕУ, статистичний аналіз; в [5] – основні ідеї, статистичний аналіз, розробка математичних моделей параметрів вітрового розподілу та їх співставлення с фактичними даними; в [6] – основні ідеї, розрахункові експерименти, розробка і реалізація математичних моделей генерації в умовах обмеження; в [7] – співставлення результатів моделювання річного виробітку ВЕУ з фактичними експлуатаційними показниками; в [8] – розробка параметричної моделі ВЕУ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові, теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково – технічних конференціях (НТК), у тому числі й міжнародних (МНТК): XXVI МНТК “Інноваційні та інвестиційні проекти з метою реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2030 року” (Україна, АР Крим, смт. Миколаївка, 10–12 вересня

2013 р.); регулярних МНТК “Суднова енергетика: стан та проблеми” (Україна, м. Миколаїв, 13–14 листопада 2013 р.; 8–10 листопада, 2017 р.); VII МНТК “Муниципальна енергетика: проблеми, рішення” (Україна, м. Миколаїв, 24–25 грудня 2015 р.); всеукраїнської НТК “Стратегії розвитку екологічної освіти у XXI столітті” (Україна, м. Миколаїв, 27–28 березня 2014 р.); VI МНК “Моделювання–2018” (Україна, м. Київ, 12–14 вересня 2018 р.); регулярних НТК Молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, (Україна, м. Київ, 16 травня 2018 р.; 15 травня 2019 р.; 15 травня 2020 р.); науково–практична конференція (НПК) “Екологічна безпека водного і атмосферного середовищ м. Миколаєва”, (Україна, м. Миколаїв, 12–13 листопада 2018р.); регулярних МНПК “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”, (Україна, м. Київ, 15–16 травня 2019 р.; 14–15 травня 2020 р.); міжнародна МТК “Фізико–технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019”, (Україна, м. Харків, 19 червня 2019 р.); VIII МНК з питань сталості в енергетиці та навколишнього середовища ISCSEES 2020, (Україна, м. Івано-Франківськ, 21–22 жовтня 2020 р.); регулярних Миколаївських екологічних читань “Збережемо для нащадків”, (Україна, м. Миколаїв, 31 жовтня – 2 листопада 2019 р., 27 листопада 2020 р.); IV всеукраїнській НПК здобувачів вищої освіти і молодих учених “Перспективи розвитку територій: теорія і практика”, (Україна, м. Харків, 19–20 листопада 2020 р.).

**Публікації результатів наукових досліджень.** Основні результати дослідження опубліковані в 30 наукових публікаціях, з них: 8 статей у фахових наукових виданнях, одна з яких у міжнародній наукометричній базі (SCOPUS); 19 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій; 3 праці, які додатково відображають наукові результати дисертації, у тому числі 2 патенти на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (100 найменувань) та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 158 сторінок, в тому числі 115 сторінок основного тексту, включаючи 28 рисунків, 56 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовані актуальність та доцільність роботи, сформульовані мета та задачі наукового дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення та перелік впровадження результатів дисертації, особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві, приведено відомості про апробацію і публікації.

**У першому розділі** роботи розглядаються особливості роботи ВЕС в умовах обмеження генерації, аналізуються основні причини накладення обмеження, визначаються найбільш складні задачі визначення об’єму втраченого виробітку, які потребують вирішення, у тому числі шляхом застосування математичного моделювання.

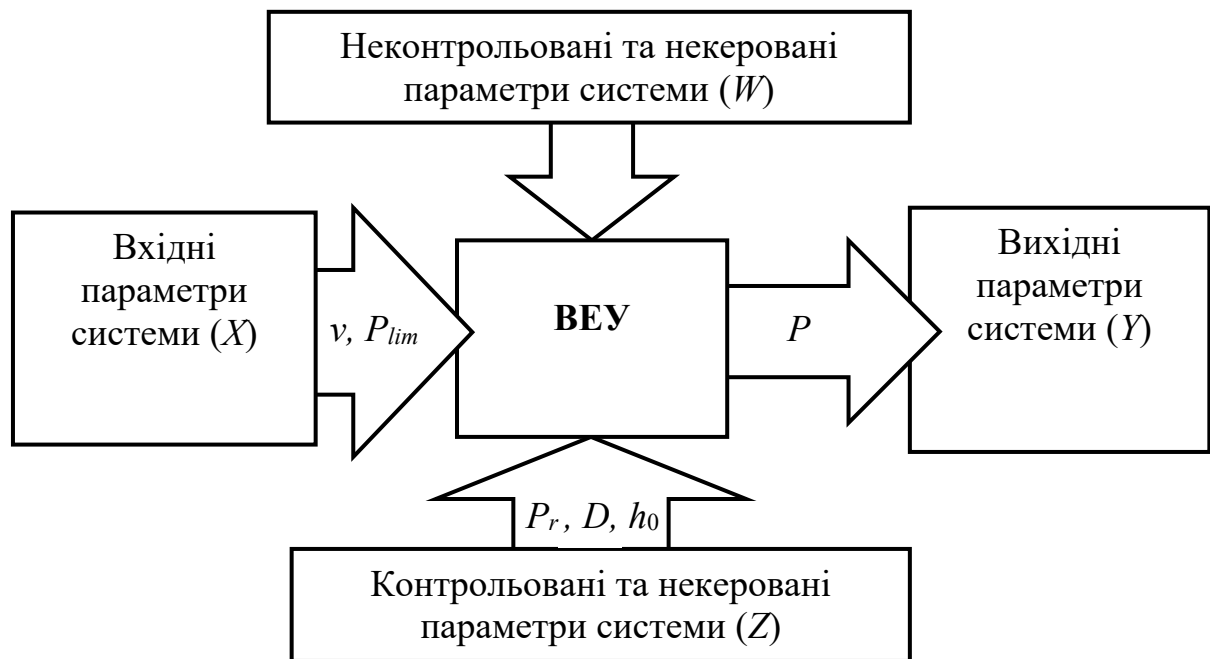
Дослідження показало, що найактуальнішими в роботі вітропарків України являються проблеми прогнозування виробітку ВЕС на заданий період часу з

урахуванням накладеного обмеження та визначення раціонального розподілу накладеного обмеження на складові ВЕУ.

Досліджено, що тривалість обмеження складає від кількох годин – оперативні команди НЕК “Укренерго”, до кількох місяців, чи навіть років – за наявності технічних проблем у розподільчих мережах, вирішення яких потребує великих матеріальних витрат.

Проаналізовані основні математичні моделі ВЕУ (ВЕС), визначено, що вони розрізнені за направленістю, враховують не всі основні фактори впливу, часто потребують вхідних даних, отримання яких ускладнене.

Дослідженням встановлені основні фактори впливу на виробіток ВЕУ, яка представляє собою складну автоматизовану електромеханічну систему: поточна швидкість вітру  $v$  та величина обмеження потужності генерації  $P_{lim}$  – вхідні параметри системи ( $X$ ), номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса – контрольовані некеровані параметри системи ( $Z$ ), безпосередня цілеспрямована зміна яких ускладнена або неможлива. До неконтрольованих і некерованих параметрів ( $W$ ) віднесено всілякі впливи, дії яких носять випадковий характер, не піддаються визначенню (або їх визначення ускладнене) і не розглядаються в рамках даного дослідження. Наприклад, простій ВЕУ (ВЕС) за будь-якої причини, вплив оточуючого ландшафту та схеми розташування ВЕУ на вітровий потенціал конкретної місцевості, втрати електричної енергії у кабельних мережах ВЕС, невідповідність ВЕУ заявленій характеристиці потужності через наявні дефекти та незадовільний стан обладнання і т.п. (рисунок 1).



$v$  – розподіл швидкостей вітру на висоті анемометра  $h_a$ ;  $P_r, D, h_0$  – номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса відповідно;  $P$  – потужність генерації електроенергії;  $P_{lim}$  – величина обмеження потужності;

Рисунок 1 – Параметрична модель функціонування ВЕУ



Отже, математична модель процесу генерації ВЕС повинна враховувати як технічні характеристики складових ВЕУ так і особливості вертикальної зміни вітрового потенціалу конкретної місцевості, а задача математичного моделювання генерації ВЕС розгалужується на задачі визначення характеристики потужності (кривої потужності) складових ВЕУ та вітрового потенціалу на різних висотах приземного шару атмосфери.

У другому розділі роботи розглядається проблема математичного моделювання характеристик потужності (кривих потужності, КП) ВЕУ.

Аналіз поточної ситуації на ринку вітроенергетики показав, що існує проблема приховування кривих потужності достатньої точності через існуючу конкуренцію між виробниками ВЕУ, через що постає задача визначення кривої потужності за основними її відомими параметрами. Через поширене ствердження відносно унікальності КП кожної моделі ВЕУ задача її моделювання за основними параметрами ВЕУ далека до вирішення. Але, як показало проведене дослідження, стандартна невизначеність КП у 4–6 % відповідно вимогам вимірювання ІЕС 61400–12–1 зівставна зі стандартним відхиленням КП ВЕУ однакового типорозміру різних виробників.

Відомо, що КП будь-якої ВЕУ можна змодельовати на підставі мінімальної стартової швидкості вітру  $v_{min}$ , швидкості вітру виходу на номінальний режим роботи  $v_r$ , максимальної швидкості робочого режиму (швидкості вимикання)  $v_{max}$  та номінальної потужності генератора  $P_r$ , значення яких передбачається отримувати з паспортних даних ВЕУ. КП зазвичай поділяють на три (чотири) зони відповідно особливості роботи ВЕУ (рисунок 2).

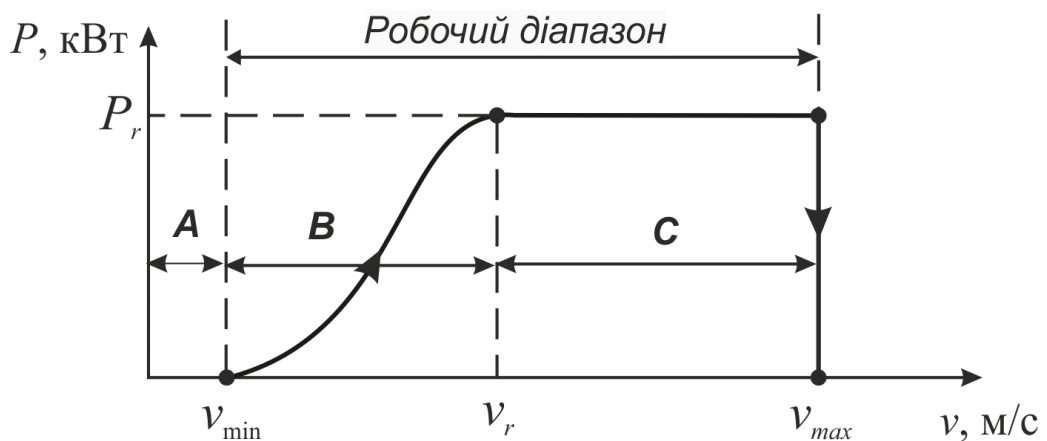


Рисунок 2 – Характерні зони КП

Найбільший інтерес для моделювання представляє S-образна крива зони перехідного режиму роботи *B*. Найпоширенішими математичними моделями КП (її частини у зоні *B*), входні параметри яких представлені набором:  $v_{min}$ ,  $v_r$ ,  $P_r$ , представлені лінійною, квадратичною, біноміальною, кубічною, експоненціальною та іншими моделями.

Номінальна потужність генератора  $P_r$  являється одним з основних параметрів ВЕУ і його значення завжди відоме. Мінімальна стартова швидкість вітру  $v_{min}$  для більшості промислових ВЕУ лежить в діапазоні 2,5–3,5 м/с, і, з огляду на незначну

потужність генерації у даному проміжку, цілком допустимо обирати значення  $v_{min} = 3,0$  м/с для всіх моделей ВЕУ. Швидкість вітру вимикання промислових ВЕУ  $v_{max}$  складає 20–27 м/с, і з огляду на досить малу частоту виникнення таких швидкостей вітру в умовах України, також цілком допустимо обирати значення  $v_{max} = 25$  м/с для всіх моделей ВЕУ. *Основний недолік*, вказаних вище моделей, полягає у їх чутливості до значення параметру  $v_r$ , який не являється основним паспортним параметром ВЕУ. Навіть за наявної КП його визначення буде досить наближеним через поширеність КП з широким діапазоном дискретності.

Основний недолік відомої математичної моделі КП на підставі коефіцієнту використання енергії вітру полягає у необхідності визначення десяти коефіцієнтів, а також функціонального зв'язку між поточною швидкістю вітру  $v$  та кутом повороту лопаті  $\beta$  і швидкохідністю ВК  $\lambda$ , визначення якого можливо лише шляхом опрацювання масиву експлуатаційних даних роботи ВЕС. Більшість дослідників, не маючи подібної можливості, вимушені користуватися відкритими даними, які не відповідають дійсним параметрам ВЕУ, що призводить до виникнення похибки обчислення.

Підсумовуючи оглядовий аналіз існуючих параметричних моделей можна констатувати, що задача розробки простої математичної моделі КП, яка б враховувала тільки основні паспортні параметри ВЕУ, досі не вирішена.

Дослідження впливу на форму КП основних паспортних параметрів ВЕУ: номінальної потужності генератора  $P_r$  та діаметра ВК  $D$  показало, що, наприклад, збільшення розміру вітроколеса ВЕУ GE 2.5 МВт зі 100 до 120 м призводить до зменшення номінальної швидкості вітру  $v_r$  з 13 до 11 м/с, тобто зона  $B$  відповідної КП скорочується по осі  $X$  приблизно в 1,18 рази. А збільшення номінальної потужності генератора  $P_r$  з 2 до 3,4 МВт (на прикладі КП ВЕУ Gamesa 2.0–114 та Senvion 3.4–114) призводить не тільки до розтягування КП в зоні  $B$  по осі  $Y$  в 1,5 рази, але й також по осі  $X$  у 1,2 рази.

Обрана математична модель КП повинна характеризуватися не тільки високою точністю інтерполяції заданих точок КП, але й легко масштабуватися за висотою та шириною. Даним вимогам цілком відповідає поліноміальна залежність ступеню  $k = 5$ , яка з одного боку має високу точність наближення до КП ( $R^2 > 0,99$  у переважній більшості випадків), а з іншого не створює надлишкову громіздкість математичного запису.

Висунуто гіпотезу, що поліноміальну криву, яка описує КП (його частину в зоні  $B$ ) будь-якої ВЕУ можна з певною похибкою наблизити до відповідної частини КП іншої ВЕУ введенням відповідних коефіцієнтів масштабування по осі  $X$ , які залежать від значення номінальної потужності генератора  $P_r$  та діаметру вітроколеса  $D$ :  $k_x = k_{xD} \cdot k_{xP}$ ;  $k_{xD} = f(D)$ ;  $k_{xP} = f(P_r)$ . Масштабування по осі  $Y$  відбувається шляхом введення відповідного коефіцієнту  $k_y = f(P_r)$ , який залежить тільки від значення номінальної потужності генератора  $P_r$ .

Дослідження показало, що найкраще наближення до фактичних КП ВЕУ відбувається при скороченні початкової поліноміальної кривої по осі  $X$  та її розтягуванні по осі  $Y$ , через що, в якості початкової (опорної) було обрано КП ВЕУ номінальною потужністю  $P_r = 2,0$  МВт та діаметром  $D = 100$  м. Для зменшення

впливу похибки вимірювання окремо взятої КП, була сформована вибірка з трьох КП ВЕУ однакового типорозміру: Fuhrländer WTU 2.0–100; SANY SE10020 та Senvion MM100. Статистичне дослідження показало, що найбільші стандартні відхилення значень потужності у вибірці спостерігаються на проміжку 9–10 м/с і становлять 77–87 кВт (4,0–5,5 %  $\bar{P}_i$ ), в середньому 39 кВт у діапазоні швидкостей вітру зони B (3–11 м/с).

Застосовуючи інструмент “Поліноміальний тренд” пакету прикладних програм (ППП) MS Excel на підставі усереднених даних КП була отримана поліноміальна крива виду:

$$P(v) = 0,1416 v^5 - 5,8013 v^4 + 83,919 v^3 - 513,58 v^2 + 1474,3 v - 1614,5. \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації моделі у діапазоні швидкостей вітру зони B складає  $R^2 = 0,986$ , середня абсолютна похибка апроксимації 27 кВт.

На підставі аналізу 50-ти КП мультимегаватних ВЕУ, застосовуючи метод найменших квадратів отримані наступні регресійні моделі масштабування відносно опорної КП:

$$k_{XD} = 0,0064 D + 0,3623 ; R = 0,974; R^2 = 0,949; \bar{A} = 1,03 \% ; A_{max} = 5,64 \% . \quad (2)$$

$$k_{XP} = -0,1093 P_r + 1,2106 ; R = 0,992; R^2 = 0,985; \bar{A} = 0,77 \% ; A_{max} = 1,12 \% . \quad (3)$$

$$k_Y = 0,4626 P_r + 0,0737 ; R = 0,999; R^2 = 0,999; \bar{A} = 0,25 \% ; A_{max} = 0,37 \% , \quad (4)$$

де  $\bar{A}$ ,  $A_{max}$  – середня та максимальна похибки відповідно.

Отже, з урахуванням зон A та C КП ВЕУ заданого типорозміру можна визначити на підставі наступної математичної моделі:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P(v) = 0 ; & (v < v_{\min}) \\ P(v) = (0,1416 (v \cdot k_X)^5 - 5,8013 (v \cdot k_X)^4 + 83,919 (v \cdot k_X)^3 - & (v_{\min} \leq v < v_r) \\ - 513,58 (v \cdot k_X)^2 + 1474,3 (v \cdot k_X) - 1614,5) \cdot k_Y ; & \\ P(v) = P_r . & (v_r \leq v < v_{\max}) \end{array} \right.$$

Зіставна оцінка результатів моделювання КП 66-ох ВЕУ потужністю від 2,0 до 3,6 МВт і діаметром ВК від 100 до 140 м показала високий середній коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,995$ . Статистичний аналіз розподілу абсолютних відхилень результатів математичного моделювання  $P_M(v)$  від паспортних  $P_{\Pi}(v)$ : математичні сподівання  $\mu$  та стандартні відхилення  $\sigma$  представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Абсолютні помилки апроксимації

$v$ , м/с	$\mu$ , кВт	$\sigma$ , кВт	$v$ , м/с	$\mu$ , кВт	$\sigma$ , кВт
3	14,29	19,75	9	9,83	100,61
4	24,52	21,93	10	58,02	95,35
5	43,15	30,04	11	32,37	79,88
6	18,82	47,49	12	4,16	33,60
7	-31,03	60,51	13	-1,50	11,16
8	-42,45	73,18	14	-1,02	5,63

Визначена схожість стандартного відхилення  $\sigma$  результатів таблиці 1 із стандартною невизначеністю проведених вимірювань КП ВЕУ Vestas V-90 (приблизно 25 кВт при 5 м/с, 110 кВт при 9–11 м/с та 50 кВт при 13 м/с) та DOE 1.5 (27,7 кВт при 5 м/с, 90 кВт при 8–9,5 м/с та 30 кВт при 13 м/с) показала, що точність математичної моделі в цілому збігається з точністю експериментального визначення КП ВЕУ, а різниця між КП ВЕУ однакового типорозміру різних виробників в цілому не перевищує експериментальної похибки вимірювань.

**В третьому розділі** досліджується розподіл швидкостей вітру на різних висотах приземного шару за результатами висотних вимірювань, проведених в районі Північного Причорномор'я України. Визначено, що існує проблема перерахунку параметрів розподілу швидкостей вітру на задану висоту приземного шару атмосфери за результатами висотних вимірювань.

Найбільше поширення у вітроенергетиці отримали математична модель розподілу швидкостей вітру Вейбула – Гніденка (РВГ):

$$f(v) = \frac{c}{b} \left( \frac{v-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{v-a}{b} \right)^c \right], \quad (5)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметри зсуву, масштабу та форми відповідно, та ступеневий закон Хеллмана перерахунку середніх швидкостей вітру  $\bar{v}_a$  на задану висоту  $h_0$ :

$$\frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_a} = \left( \frac{h_0}{h_a} \right)^{m_v}, \quad (6)$$

де  $h_a$ ,  $h_0$  – висота розташування анемометру та осі вітроколеса відповідно,  $m_v$  – безрозмірний показник ступеня (або показник Хеллмана), значення якого залежить від стійкості атмосфери, температурної стратифікації і шорсткості підстильної поверхні  $z_0$ .

Дослідження проведене на підставі результатів синхронних вимірювань метеощоглами (МЩ) на висотах 50, 80 та 100 м поблизу с. Іванівка Очаківського району Миколаївської області (далі – МЩ “Іванівка”), та с. Шостакове Миколаївського району Миколаївської області (далі – МЩ “Шостакове”). В якості додаткових даних використані результати багаторічних вимірювань МЩ на висоті 31,5 м на площадці пілотної Аджигольської ВЕС (далі – МЩ “ПАВЕС”) (рисунк 3).

В роботі досліджуються два найпоширеніші способи визначення параметрів РВГ на заданій висоті: на підставі емпіричних залежностей Justus & Mikhail (далі – спосіб J&M)

$$c_0 = c_a \frac{1 - 0,088 \ln \left( \frac{h_a}{10} \right)}{1 - 0,088 \ln \left( \frac{h_0}{10} \right)}, b_0 = b_a \left( \frac{h_0}{h_a} \right)^{m_J}, \text{ де } m_J = \frac{0,37 - 0,0881 \ln b_a}{1 - 0,0881 \ln \left( \frac{h_a}{10} \right)}, \quad (7)$$

та ступеневих залежностей параметрів РВГ (далі – ступеневий спосіб):

$$c_0 = c_a \left( \frac{h_0}{h_a} \right)^{m_c}, b_0 = b_a \left( \frac{h_0}{h_a} \right)^{m_b}, \quad (8)$$

де  $m_c$ ,  $m_b$  – апроксимаційні ступеневі показники.

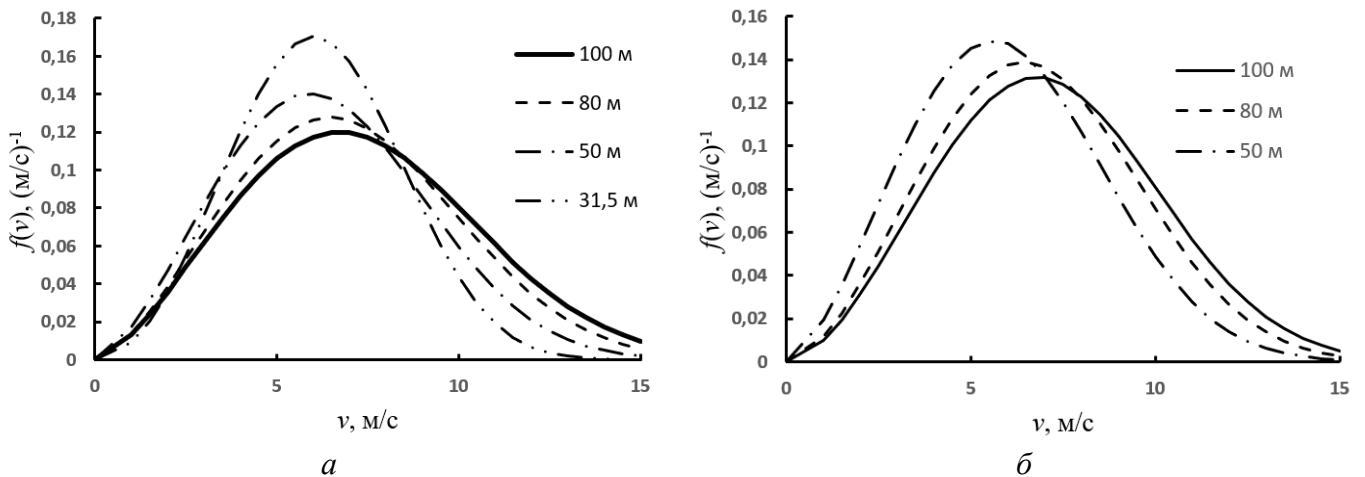


Рисунок 3 – Густина ймовірності повторення швидкості вітру:  
 а – МЦ “Іванівка” та “ПАВЕС”; б – МЦ “Шостакове”

Емпіричні залежності J&M дозволяють визначити параметри РВГ на заданій висоті дослідження на підставі даних РВГ за результатами вимірювань на одній висоті приземного шару атмосфери, що, безумовно, являється суттєвою перевагою даного способу. Але застосовані усереднені емпіричні показники не враховують особливості конкретного місця дослідження, що призводить до появи похибки визначення. Спосіб визначення параметрів РВГ за ступеневими залежностями, враховує особливості зміни вітрового розподілу конкретного місця дослідження, але потребує наявності даних РВГ як мінімум на трьох висотах вимірювання. Подальша оцінка точності даних способів проводилася на підставі результатів обчислення параметрів  $b$  та  $c$  РВГ.

Особливість розташування МЦ “Іванівка” та “Шостакове” (2 км та 70 км від морського узбережжя відповідно) дозволила вперше визначити та дослідити вплив акваторії моря на вітровий потенціал прибережного району Північного Причорномор’я. В таблиці 2 показані результати оцінки точності визначення параметру масштабу  $b$  для двох способів визначення.

Таблиця 2 – Визначення параметру масштабу РВГ  $b$

Спосіб	$R^2$	$\bar{A}$ , %	$\bar{A}_{\max}$ , %
МЦ “Іванівка”			
J&M	0,922	1,41	2,16
ступеневий	0,997	0,27	0,40
МЦ “Іванівка” + “ПАВЕС”			
J&M	0,553	4,10	7,70
ступеневий	0,943	1,54	2,73
МЦ “Шостакове”			
J&M	0,998	0,30	0,47
ступеневий	1	0,08	0,11

Результати таблиці 2 показують високу точність апроксимації параметрів масштабу  $b$  ступеневою залежністю для даних з обох місць вимірювання та

способом J&M тільки з МЦ “Шостакове”, при цьому похибка округлення початкових даних складає  $\pm 0,005$  м/с ( $\approx 0,06$  %).

Результати висотних вимірювань показали характерні відмінності зміни параметру форми РВГ  $c$  з висотою в залежності від місцевості: за даними МЦ “Іванівка” у діапазоні висот 50–100 м параметр  $c$  зменшується з висотою на 2,2 %, та відповідно збільшується на 5,8 % за даними МЦ “Шостакове”, враховуючи похибку округлення початкових даних  $\pm 0,00005$  ( $\approx 0,02$  %). В таблиці 3 показані результати оцінки точності визначення параметру форми  $c$  для двох способів визначення.

Результати таблиці 3 показують, що розширення діапазону висот суттєво вплинуло на якість прогнозування обох способів, при цьому результати визначення параметру форми  $c$  у прибережних районах за способом J&M є неприйнятними.

Таблиця 3 – Визначення параметру форми РВГ  $c$

Спосіб	$\bar{A}$ , %	$\bar{A}_{max}$ , %
МЦ “Іванівка”		
J&M	6,39	10,05
ступеневий	0,79	1,19
МЦ “Іванівка” + “ПАВЕС”		
J&M	17,10	37,77
ступеневий	5,44	10,85
МЦ “Шостакове”		
J&M	1,43	2,17
ступеневий	1,22	2,19

В роботі також досліджуються способи визначення середньої потужності ВЕУ на заданій висоті на підставі перерахунку градацій швидкостей вітру та ступеневої залежності середніх потужностей (виробітків) ВЕУ.

Як показало дослідження, спосіб перерахунку градацій швидкостей вітру не наближує прогнозний розподіл до фактичних значень, а моделює близький за вітровим потенціалом розподіл з частотною характеристикою згідно початкових даних, що є основним його недоліком. Разом з тим даний спосіб показав достатньо малу похибку прогнозування (див. таблицю 4) з огляду на те, що згідно проведеного розрахунку, різниця між прогнозними річними виробітками ВЕУ FL 2500-100 в умовах Північного Причорномор’я обчисленими за РВГ та градаціями швидкостей вітру з дискретністю 0,1 м/с склала 5%.

Ступенева залежність річного виробітку ВЕУ у вигляді залежності середньої потужності генерації ВЕУ лягла в основу патенту на корисну модель №135302 та показала найвищу точність прогнозування серед способів, що розглядаються (див. таблицю 4). Але вона має суттєвий недолік через складність визначення істинних параметрів РВГ за прогнозованою середньою потужністю ВЕУ:

$$P_0 = P_a \left( \frac{h_0}{h_a} \right)^{m_p}, \quad (9)$$

де  $P_0$ ,  $P_a$  – середні потужності ВЕУ згідно вітрового розподілу на висоті  $h_a$  та  $h_0$  відповідно;  $m_p$  – ступеневий показник.

В таблиці 4 представлені результати моделювання річного виробітку ВЕУ FL 2500–100 за чотирма способами, що досліджуються.

Таблиця 4 – Визначення річного виробітку ВЕУ FL 2500–100

Спосіб	$R^2$	$\bar{A}$ , %	$\bar{A}_{max}$ , %
МЦ “Іванівка”			
Ступеневий (потужність)	$\approx 1$	0,05	0,07
Ступеневий (РВГ)	0,997	0,55	0,86
Перерахунок градацій	0,988	1,07	2,28
J&M	0,936	2,60	4,54
МЦ “Іванівка” + “ПАВЕС”			
Ступеневий (потужність)	0,992	1,34	2,14
Ступеневий (РВГ)	0,961	2,99	4,93
Перерахунок градацій	0,938	4,19	4,75
J&M	0,658	7,84	18,1
МЦ “Шостакове”			
Ступеневий (потужність)	$\approx 1$	0,27	0,41
Ступеневий (РВГ)	$\approx 1$	0,23	0,55
J&M	0,999	0,51	0,88
Перерахунок градацій	0,969	2,33	3,84

Розширення діапазону висот дослідження шляхом залучення даних з МЦ “ПАВЕС” показало, що похибка визначення річного виробітку ВЕУ за ступеневою залежністю потужності (виробітку) ВЕУ є приблизно у два рази меншою похибки за ступеневою залежністю РВГ, а найбільша серед розглянутих способів похибка визначення параметрів РВГ за способом J&M показала неприпустимість його застосування для моделювання вітрового потенціалу прибережних районів Північного Причорномор’я.

Дослідженням виявлено, що 10 % похибка визначення параметру форми  $c$  призводить до відхилення річного виробітку FL 2500–100 менш ніж на 2 %. Це дає можливість розробити удосконалений спосіб визначення параметрів РВГ шляхом визначення параметру масштабу  $b$  за річним прогностичним виробітком ВЕУ та ступеневою залежністю параметру масштабу  $c$  РВГ. Даний спосіб дозволяє визначити такі параметри РВГ, за якими похибка обчислення річного виробітку ВЕУ визначатиметься лише точністю апроксимації ступеневої залежності потужності (виробітку).

У четвертому розділі проведено порівняльний аналіз обчислених за розробленою математичною моделлю прогностичних річних виробітків ВЕУ з фактичними експлуатаційними показниками роботи ВЕС України та проведеними обчислювальними експериментами. Алгоритм розрахунку запропонованою математичною моделлю показаний на рисунку 4.

Фактичні результати виробітку ВЕС були скориговані згідно наданих оператором ВЕС коефіцієнтів технічного використання, а за їх відсутності – шляхом введення загальноприйнятого коефіцієнту  $КТВ = 0,95$ . В якості початкових даних вітрового потенціалу обрані параметри РВГ на висоті 100 м за результатами вимірювань на МЦ “Іванівка”.

Аналіз експлуатаційних даних показав, що, наприклад, стандартне відхилення скоригованих за  $КТВ$  річних виробітків ВЕС за вісім років експлуатації, укомплектованих однаковими ВЕУ FL 2500–100 через річні коливання вітрового

потенціалу, похибки обчислень КТВ та інші невраховані фактори складо 6,5%. Враховуючи відхилення фактичних виробітків, загальноприйнятої похибки вітрових вимірювань, вертикальної екстраполяції та середнього стандартного відхилення математичної моделі КП, у 95,4% випадках похибка прогнозованого річного виробітку складатиме до 30 %.

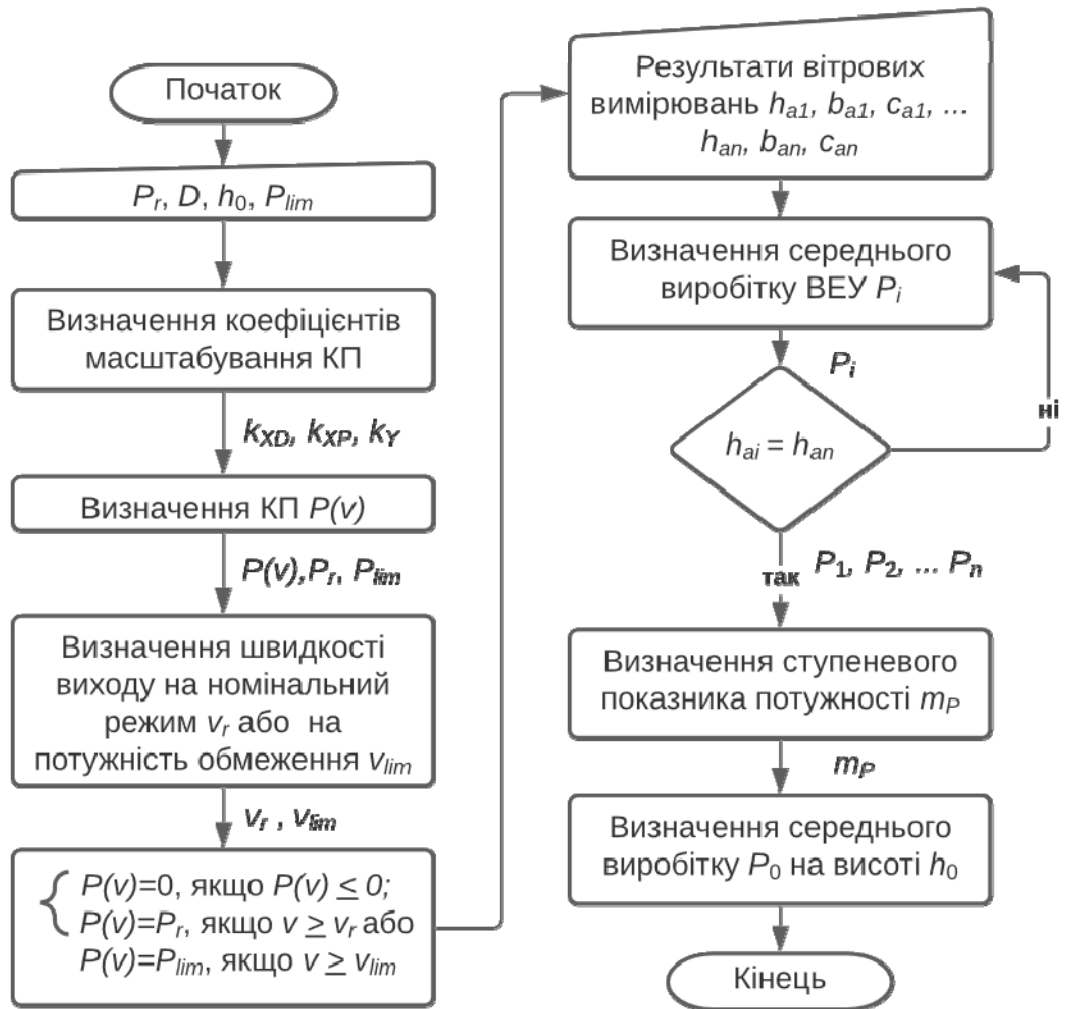


Рисунок 4 – Алгоритм визначення річного виробітку ВЕУ

Результати моделювання річних виробітків  $Q_M$  виявилися в середньому на 11,5% більше фактичних експлуатаційних  $Q_E$  із стандартним відхиленням у 6,5% (див. таблицю 5).

Шляхом введення відповідного коригування точність прогнозування річного виробітку складе  $\pm 13\%$  у 95,4% випадків, що відповідає загальноприйнятій невизначеності прогнозування у 12–15% річного виробітку.

Проведене співставлення з розрахунковими річними виробітками 43-х ВЕУ мегаватного класу за результатами вітрових вимірювань на ПАВЕС показало перевищення річних виробітків за пропонованою моделлю в середньому на 1,3 % зі стандартним відхиленням 4,3 %, в якому закладені, в тому числі, і похибки розрахункових виробітків, що цілком задовольняє загальноприйнятій невизначеності (див. рисунок 5).



Таблиця 5 – Підсумкові результати порівняльного аналізу

ВЕУ	ВЕС, ВП	Роки експлуатації							
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
		$O_M > O'_E, \%$							
FL 2500–100 WTU 2,5	ДВП	12,4	10,8	-7,3	2,8	3,5	11,8	17,5	14,3
	ТВП	10,8	13,4	-0,7	7,3	2,5	16,5	17,5	16,6
	Причорно– морський		–	–	–	3	14,2	18,1	14,7
	Благодатний		–	–	–	–	8,3	13,7	10,8
WTU 3,0 WTU 2,5	Причорно– морський		–	–	–	–	0,3	18,3	17,6
WTU 3,2			–	–	–	–	11,3	13,6	17,2
WTU 3,3			–	–	–	–	–	–	24,4
WTU 3,5 WTU 4,8			–	–	–	–	–	–	21,2
WTU 3,3 WTU 3,5 WTU 4,8	Очаківський	–	–	–	–	–	–	–	21,2
WTU 3,5	Південний								23,1
	Щасливий	–	–	–	–	–	–	–	20
WTU 4,5 WTU 4,8	Благодатний	–	–	–	–	–	–	–	16,2
V112 3,075 94 м	Ботієвська	–	4,1	6,1	10,6	6,1	4,1	15,3	–
V112 3,075 119 м	Віндкрафт Україна	–	–	1,6	4	2,1	2,7	–	–
V126 3,65	Новотроїцька	–	–	–	–	–	10,8	–	–
V136	Новотроїцька	–	–	–	–	–	9,6	16,2	17,8
	Овер'янівська	–	–	–	–	–	–	17,3	12,1

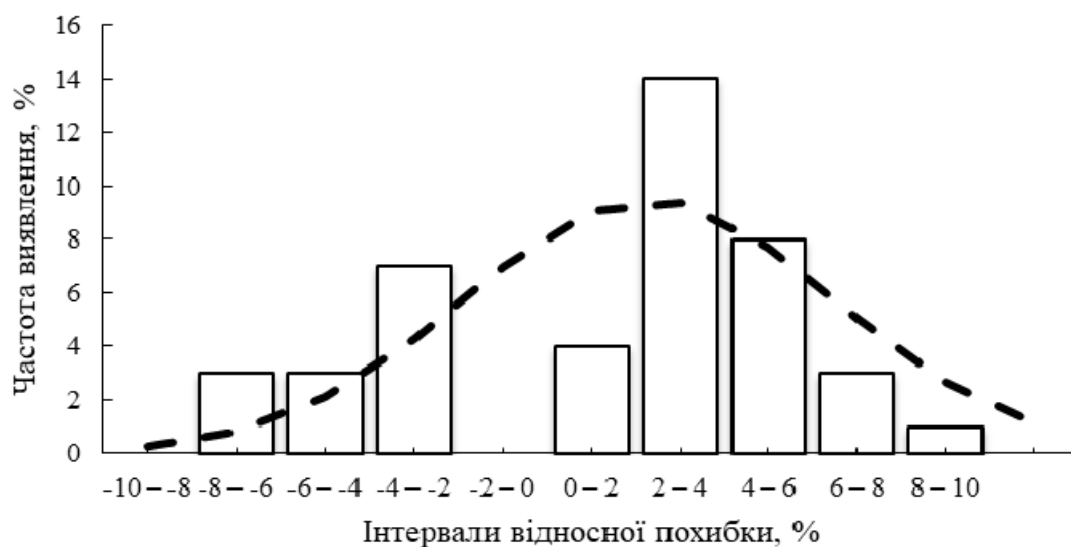


Рисунок 5 – Гістограма розподілу відносної похибки моделювання річного виробітку ВЕУ

Отже, співставлення середніх відносних похибок у 1,3 та 11,5 % річного виробітку вказує на існування неврахованих факторів що були віднесені у першому

розділі дисертаційної роботи до неконтрольованих некерованих параметрів системи та/або суттєві помилки в обчисленні фактичних втрат генерації, які слід враховувати у подальших порівняльних аналізах.

У другій частині розділу представлена модель раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує ймовірнісний характер вітрового потенціалу та типорозмір ВЕУ, що дозволяє мінімізувати втрати від накладеного обмеження.

В умовах накладеного обмеження потужності генерації ВЕС відбувається коригування поточної потужності генерації ВЕС в залежності наявного обладнання. Сучасні промислові ВЕС часто комплектуються спеціалізованим програмно-апаратним комплексом керування. Даний комплекс, об'єднаний з ВЕУ в єдину локальну інформаційну мережу, в режимі реального часу коригує потужність генерації кожної ВЕУ у складі множини в залежності від її поточного стану, досягаючи максимально можливої генерації в рамках існуючого обмеження. Проте існують ВЕС, які з різних причин не обладнані вищевказаним комплексом, через що величина обмеження для кожної ВЕУ визначається оператором ВЕС на власний розсуд. Дослідження показало, що нехтування характеристиками потужності ВЕУ та характеристиками вітрового потенціалу, наприклад, застосовуючи рівномірний розподіл обмеження або за номінальною потужністю ВЕУ, призводить до виникнення додаткових втрат генерації.

Раціональний розподіл обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ  $N$  полягає у встановленні для кожної ВЕУ такого обмеження потужності генерації, що виключає його досягнення  $j$ -ю ВЕУ поки сукупна потужність генерації множини ВЕУ менша встановленого на ВЕС обмеження  $P_{lim}$ .

Задача вирішується шляхом визначення прогнозних потужностей  $P_j$  ВЕУ з урахуванням, як характеристики потужності складових ВЕУ так особливостей розподілу швидкостей вітру на осі розташування вітроколеса для заданої місцевості, що задовольняє розв'язання рівняння виду:

$$P_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N P_j(v_j) = P_{lim}. \quad (10)$$

Один з варіантів розв'язку даного рівняння полягає у табличному представленні характеристики потужності кожної ВЕУ, тобто у вигляді множини  $M$  значень середніх потужностей відповідно вибраного інтервалу швидкостей вітру  $\Delta v$ . На підставі проведених висотних вимірювань або іншим доступним способом застосовуючи закон Хеллмана (6), визначається ступеневий показник  $m_v$ . Далі з множини висот осей вітроколес складових ВЕУ вибирається базова висота  $h_b$  відносно якої відповідно ступеневого показника  $m_v$  перераховуються  $i$ -ті інтервали швидкостей  $v_{ij}$  згідно висоти осі вітроколеса  $j$ -ї ВЕУ:

$$v_{ij} = v_{ib} \left( \frac{h_j}{h_b} \right)^{m_v}. \quad (11)$$

На підставі розробленої математичної моделі характеристики потужності

розраховуються середні потужності  $P_{ij}$  для всіх інтервалів  $v_{ij}$  та визначається інтервал  $v_{ib}$ , за якого різниця між прогнозою потужністю множини ВЕУ (тобто ВЕС)  $P_{i\Sigma}$  та накладеним обмеженням  $P_{lim}$  буде мінімальною:

$$|P_{i\Sigma} - P_{lim}| = \left| \sum_{j=1}^N P_{ij} - P_{lim} \right| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Для точної відповідності потужності ВЕС  $P_{i\Sigma}$  заданому обмеженню  $P_{lim}$  потужність  $N$ -ї ВЕУ  $P_{iN}$  визначається різницею між сукупною потужністю решти ВЕУ та величиною накладеного обмеження:

$$P_{iN} = P_{lim} - \sum_{i=1}^{N-1} P_{ij}. \quad (13)$$

Приклад побудови таблиці потужності ВЕС як множини складових ВЕУ приведений у таблиці 6.

Згідно результатів проведеного порівняльного аналізу з експлуатаційними річними виробітками вітропарків України слід очікувати похибку визначення середніх потужностей ВЕУ  $P_j$  за розробленою математичною моделлю (за даними з МЦ “Іванівка”) біля  $\pm 13\%$  у 95,4% випадків. Точність визначення потужностей може бути покращена шляхом застосування значень вітрового розподілу конкретної місцевості розташування ВЕС та врахування відповідних некерованих неконтрольованих параметрів.

Таблиця 6 – Розрахунок середніх потужностей ВЕУ у складі ВЕС

ВЕУ <sub>1</sub> , $h_1 = h_b$		ВЕУ <sub>2</sub> , $h_2$		...	ВЕУ <sub>j</sub> , $h_j$		...	ВЕУ <sub>N</sub> , $h_N$		ВЕС	Обмеження
$\Delta v_b$	$P_1$	$\Delta v_2$	$P_2$		$\Delta v_j$	$P_j$		$\Delta v_N$	$P_N$	$P_{\Sigma}$	$P_{lim}$
$\Delta v_{1b}$	$P_{11}$	$\Delta v_{12}$	$P_{12}$		$\Delta v_{1j}$	$P_{1j}$		$\Delta v_{1N}$	$P_{1N}$	$P_{1\Sigma}$	$P_{lim}$
...											
$\Delta v_{ib}$	$P_{i1}$	$\Delta v_{i2}$	$P_{i2}$	...	$\Delta v_{ij}$	$P_{ij}$	...	$\Delta v_{iN}$	$P_{iN}$	$P_{i\Sigma}$	$P_{lim}$
...											
$\Delta v_{Mb}$	$P_{M1}$	$\Delta v_{M2}$	$P_{M2}$	...	$\Delta v_{Mj}$	$P_{Mj}$	...	$\Delta v_{MN}$	$P_{MN}$	$P_{M\Sigma}$	$P_{lim}$

**В додатках** наведені початкові дані, список публікацій, результати експериментальних досліджень та документи щодо впровадження розробки.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача математичного моделювання генерації ВЕС в умовах обмеження генерації з урахуванням типорозмірів складових ВЕУ та особливостей вітрового потенціалу на заданій висоті осі вітроколеса у конкретній місцевості.

При цьому отримано наступні основні результати:

1. Розроблено математичну модель характеристики потужності ВЕУ за двома основними її параметрами (номінальна потужність генератора, діаметр вітроколеса), яка дозволяє визначати криві потужності за умов обмеженого доступу до них, а також для ВЕУ, що проектуються.

2. Удосконалено модель визначення розподілу швидкостей вітру на різних висотах осі вітроколеса ВЕУ за результатами синхронних висотних вітрових

вимірювань шляхом поєднання існуючих ступеневих функцій, що дозволяє визначати параметри розподілу швидкостей вітру в забезпечення більш точного прогнозування виробітку ВЕУ.

3. Розроблено статичну математичну модель ВЕС, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує зв'язок між потужністю генерації, накладеним на ВЕС обмеженням та основними паспортними параметрами ВЕУ (номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса), що дозволяє моделювати генерацію для ВЕУ в заданих вітрових умовах .

4. Набула подальшого розвитку математична модель ВЕС шляхом модифікації, що дозволяє вирішити задачу раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, яка дозволяє мінімізувати втрати від накладеного обмеження.

5. Проведена перевірка адекватності розробленої моделі ВЕС, на підставі фактичних експлуатаційних даних роботи ВЕС показала її практичну цінність як для існуючих ВЕС, так і тих, що проектується.

## СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Подгуренко В.С. Многовековые традиции Украины в использовании энергии ветра / В.С. Подгуренко, И.В. Степанец, В.Е. Терехов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – №5. – С. 40-50 (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз *WorldCat*; *BASE*; *Google Scholar*).

2. Подгуренко В.С. Математическое моделирование работы ветрогенератора, оснащенного системой установки угла поворота лопастей / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Електронне моделювання. – 2018. – Том 40. – №2. – С. 95-103 (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз *WorldCat*, *BASE*; *Google Scholar*).

3. Подгуренко В.С. Математическая модель задачи эффективности и один из методов её решения для увеличения выработки электроэнергии ветроэлектростанциями / В.С. Подгуренко, О.М. Гетманец, В.Е. Терехов // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова – 2019. – Вип. 86. – С. 50-55. (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз *BASE*; *Google Scholar*).

4. Подгуренко В.С. Математична модель задачі оцінки виробітку вітроелектричної установки / В.С. Подгуренко, О.М. Гетманець, В.Є. Терехов // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова – 2019. – Вип. 88. – С. 163-170. (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз *BASE*; *Google Scholar*).

5. Подгуренко В.С. Моделирование вертикального распределения скорости ветра по результатам ветроизмерений на высотной мачте / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова – 2019. – Вип. 89. – С. 129-135. (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз *BASE*; *Google Scholar*).

6. Подгуренко В.С. Моделивання роботи вітропарків України в умовах обмеження генерації / В.С. Подгуренко, О.М. Гетманець, В.Є. Терехов // Електронне моделювання. – 2020. – №1. – С. 91-102. (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз INDEXCOPERNICUS; ULRICHSWEB; Google Scholar).

7. Подгуренко В.С. Повышение эффективности производства электроэнергии ветроэлектрической установкой на основе математического моделирования / В.С. Подгуренко, О.М. Гетманець, В.Е. Терехов // Електронне моделювання. – 2020. – №2. – С. 121-127. (фахове видання включене до міжнародних наукометричних баз INDEXCOPERNICUS; ULRICHSWEB; Google Scholar).

8. V. Podhurenko, I. Kovshova, V. Terekhov, N. Dubovyk. (2021) Evaluation of efficiency of wind power plants operation in wind conditions of the Northern Black Sea region of Ukraine / V. Podhurenko, I. Kovshova, V. Terekhov, N. Dubovyk // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, Volume 628 (2021), стаття № 012007, P. 1-8. doi:10.1088/1755–1315/628/1/012007. ISSN:1755–1307 (фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS).

#### **Праці апробаційного характеру:**

9. Подгуренко В.С. Анализ эффективности работы промышленной ВЭС Очаковского ветропарка / В.С. Подгуренко, Е.Ф. Никитенко, В.Е. Терехов // VI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів, науковців та фахівців "Суднова енергетика: стан та проблеми". 13 – 14 листопада 2013 р. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 16 – 28.

10. Подгуренко В.С. Методика определения потерь от наложенных ограничений в генерации при эксплуатации ВЭС / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // VI міжнародна науково-технічна конференція “Суднова енергетика: стан та проблеми”, 13 – 14 листопада 2013р. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 128 – 133.

11. Подгуренко В.С. Методика определения потерь от наложенных ограничений в генерации при эксплуатации ВЭС / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Повышение эффективности энергетического оборудования: Материалы III международной научно-практической конференции 11 – 13 декабря 2013г. – М. – 2013. – Том I. – С. 474 – 489.

12. Подгуренко В.С. Методика определения потерь от наложенных ограничений в генерации при эксплуатации ВЭС / В. С. Подгуренко, В.Е. Терехов // V Міжнародна науково-технічна конференція “Муніципальна енергетика: проблеми, рішення”, 19–20 грудня 2013р. – Миколаїв : НУК. – 2013. – С. 224–233.

13. Подгуренко В.С. Энергия и экология. О некоторых аспектах экологического образования / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Всеукраїнська науково-практична конференція “Стратегії розвитку екологічної освіти у XXI столітті”, 27 – 28 березня 2014р., ЧДУ ім. Петра Могили. – Миколаїв: ФОП Швець В.Д., 2014. – С. 178 – 185.

14. Подгуренко В.С. Промышленная ветроэнергетика Северного Причерноморья: результаты становления и перспективы развития / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // VI міжнародна науково-технічна конференція “Муніципальна

енергетика: проблеми, рішення”, 24 – 25 грудня 2015 р. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 87 – 97.

15. Подгуренко В.С. Результаты пятилетней эксплуатации промышленной ВЭС Северного Причерноморья Украины / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Суднова енергетика: стан та проблеми”, 8 – 10 листопада 2017р., – Миколаїв: НУК, 2017. – С. 17 – 28.

16. Подгуренко В.С. Математическое моделирование работы ветрогенератора оснащенного системой установки угла поворота лопастей / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Суднова енергетика: стан та проблеми”, 8 – 10 листопада 2017р., – Миколаїв: НУК, 2017. – С. 144 – 148.

17. Подгуренко В.С. Исследование ветрового потока за ветроколесом промышленных ветряных электрических установок / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // 36. тез науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 16 травня 2018 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2018. – с. 41 – 43.

18. Подгуренко В.С. Математическое моделирование КИЭВ ротора ветротурбины большой мощности промышленной ВЭС / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Збірка праць міжнародної конференції “Моделювання – 2018”. 12 – 14 вересня 2018р. – Київ. – 2018. – С. 238 – 241.

19. Терехов В.Є. Дослідження геометричних параметрів лопатей вітротурбін мегаватного класу/ В.Є. Терехов, В.С. Подгуренко // Збірник тез XXXVII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 15 травня 2019 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2019. – с. 8 – 9.

20. Терехов В.Є. Дослідження геометричних параметрів лопатей вітротурбін мегаватного класу / В.Є. Терехов // "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 15 – 16 травня 2019 р.). – К.: Інтерсервіс, 2019. – с. 473 – 476.

21. Подгуренко В.С. Методика оцінювання виробітку вітряної турбіни / В.С. Подгуренко, В.Є. Терехов, О.М. Гетманець, М.М. Пеліхатий // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ – 2019): Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 19 червня 2019р., м. Харків, – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна. – С. 55 – 56.

22. Подгуренко В.С. Эффективность работы промышленной ВЭС Очаковского ветропарка / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // XII Миколаївські екологічні читання “Збережемо для нащадків”, 31 жовтня – 2 листопада 2019р. – Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2019. – С.106 – 110.

23. Подгуренко В.С. Моделирование кривых мощности современных мультимегаваттных ветроэлектрических установок / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті", 14 – 15 травня 2020 р. – К: Інтерсервіс. – 2020. – С. 395 – 400.

24. Подгуренко В.С. Результаты эксплуатации промышленной ВЭС Северного Причерноморья Украины / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та

енергоефективність у XXI столітті", 14 – 15 травня 2020 р. – К: Інтерсервіс. – 2020. – С. 401 – 405.

25. Подгуренко В.С. Моделирование стоимости энергии, вырабатываемой ветроэлектрической установкой / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // Збірник тез XXXVIII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України – 15 травня 2020р. – К.: 2020. – С. 66 – 68.

26. Терехов В.Є. Ефективність роботи промислових вітроелектричних станцій України / В.Є. Терехов, В.С. Подгуренко // Перспективи розвитку територій: теорія і практика: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 19–20 листопада 2020 р. / Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Рада молодих вчених при МОН України, Одеський національний економічний університет, НТУ «Дніпровська політехніка» [та ін.] – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020 – С. 382 – 386.

27. Подгуренко В.С. Об эффективности работы промышленных ВЭС Украины / В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов // XIII Миколаївські міські екологічні читання "Збережемо для нащадків", 27 листопада 2020р. – Миколаїв: ФОП Румянцева Г.В., 2020. – С. 97 – 100.

#### **Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

28. Подгуренко В.С. Использование энергии ветра в Украине: история и традиции / В.С. Подгуренко, Е.Ф. Никитенко, В.Е. Терехов // Энергосбережение. – 2013. – №4. – С. 14-16.

29. Патент на корисну модель №132212 Укр., GO1P 5/00. Спосіб визначення вертикального розподілу модуля швидкості вітру в приземному шарі атмосфери / Подгуренко В.С., Терехов В.Є., Гетманець О.М., Черепанов А.І., опубл. 11.02.2019р., Бюл. №3.

30. Патент на корисну модель №135302 Укр., F03 1/00 GO1P 5/00. Спосіб оцінювання виробітку вітряної електричної турбіни / Подгуренко В.С., Терехов В.Є., Гетманець О.М., Черепанов А.І., опубл. 25.06.2019р., Бюл. №12.

## **АНОТАЦІЯ**

**Терехов В.Є. Математичні моделі режимів роботи вітротурбін в умовах обмеження потужності генерації.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача математичного моделювання режимів вітротурбін (ВЕУ) в умовах обмеження потужності генерації з урахуванням їх основних параметрів (номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса) та особливостей розподілу швидкостей вітру на заданій висоті конкретної місцевості. Розроблено математичну модель характеристики потужності (кривої потужності) ВЕУ за двома основними її

параметрами (номінальна потужність генератора, діаметр вітроколеса), яка дозволяє визначати характеристики потужності за умов обмеженого доступу до них. За результатами вітрових вимірювань визначені найбільш точні способи визначення параметрів розподілу швидкостей вітру Вейбула-Гніденка, та, за рахунок їх поєднання, запропоновано удосконалену модель визначення вітрового потенціалу на різних висотах осі вітроколеса. Розроблено статичну математичну модель ВЕУ (ВЕС), яка враховує зв'язок між потужністю генерації, накладеним на ВЕС обмеженням та основними параметрами ВЕУ. Запропонований спосіб раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, яка дозволяє мінімізувати втрати від накладеного обмеження на ВЕС.

**Ключові слова:** крива потужності, характеристика потужності, вітровий потенціал, типорозмір ВЕУ, обмеження потужності генерації, річний виробіток.

## АННОТАЦИЯ

**Терехов В.Е. Математические модели режимов работы ветротурбин в условиях ограничения мощности генерации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача математического моделирования режимов ветротурбин (ВЭУ) в условиях ограничения мощности генерации с учетом их основных параметров (номинальная мощность генератора, диаметр и высота оси ветроколеса) и особенностей распределения скоростей ветра на заданной высоте конкретной местности. На первом этапе исследования разработана математическая модель характеристики мощности (кривой мощности) ВЭУ по двум основным ее параметрам (номинальная мощность генератора, диаметр ветроколеса), которая позволяет определять характеристики мощности в условиях ограниченного доступа к ним, а также для проектируемых ВЭУ. На втором этапе исследования по результатам синхронных высотных ветровых измерений определены наиболее точные из существующих способов определения параметров распределения скоростей ветра Вейбулла-Гнеденко на заданной высоте приземного слоя атмосферы, и за счет их сочетания, предложена усовершенствованная модель определения ветрового потенциала на различных высотах оси ветроколеса ВЭУ, которая позволяет определять параметры распределения скоростей ветра в обеспечение более точного прогнозирования выработки ВЭУ. По результатам проведенных на 1–2 этапах исследований разработана статическая математическая модель ВЭУ (ветровой электрической станции (ВЭС)), которая, в отличие от существующих моделей, учитывает связь между мощностью генерации электроэнергии, наложенным ограничением и основными параметрами ВЭУ и позволяет моделировать генерацию ВЭУ (ВЭС) еще на стадии проектирования.



На основании разработанной математической модели генерации ВЭС предложен способ решения задачи рационального распределения ограничения мощности генерации электроэнергии ВЭС на множество составляющих ВЭУ, которая позволяет минимизировать потери от наложенного на ВЭС ограничения. Проведенная проверка адекватности разработанной модели на основании фактических эксплуатационных данных работы ВЭС и вычислительных экспериментов показала ее практическую ценность как для существующих ВЭС, так и для проектируемых.

**Ключевые слова:** кривая мощности, характеристика мощности, ветровой потенциал, типоразмер ВЭУ, ограничение мощности генерации, годовая выработка.

## ABSTRACT

**Terekhov V.Ye. Mathematical Models of Wind Turbines Operating Modes in the Conditions of Wind Power Curtailment.** – As the manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical science by specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The present thesis paper presents the solution of a vital problem of an applied and scientific character concerning mathematical modeling of wind turbines (WT) operating modes in the conditions of wind power curtailment with regard for their main technical parameters (WT generator nameplate capacity, rotor diameter and hub height) and peculiarities of wind velocities distribution at a given altitude. The mathematical model of the WT power curve was developed based on its two main parameters (nameplate capacity, rotor diameter). On the basis of the results of wind measurements, the most exact of the existing techniques were obtained intended for determining the parameters of Weibull-Gnedenko density function of wind velocities, and due to their combination, the improved model was suggested for determination of wind energy potential at various hub heights. The static mathematical model of WT (wind power station (WPS) was developed, which takes into consideration the link between the generation capacity, imposed curtailment and main technical parameters of WT and enables simulation of WT (WPS) generation as early as the design stage. Based on the developed mathematical model of WPS, the technique was suggested for solving the problem of efficient sharing the wind power curtailment of WPS among the WTs, which fact enables the losses caused by the curtailment imposed on WPS to be minimized.

**Key words:** power curve, wind potential, WT size, wind power curtailment, annual energy production.