

ЕЛЕКТРОННЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ISSN 0204-3572

ЭЛЕКТРОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ

ELECTRONIC
MODELING

Математичне моделювання
та обчислювальні методи

Інформаційні технології

Обчислювальні процеси
та системи

Паралельні обчислення

Застосування методів
та засобів моделювання

Том 42

1

2020

Засновники: Національна академія наук України
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова
Видавець: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова

Головний редактор: чл.-кор. НАН України **В.В. МОХОР**

Заступники головного редактора: канд. техн. наук **О.В. ВАСИЛЬЄВ**,
д-р техн. наук **С.Д. ВИННИЧУК**, канд. техн. наук **Г.О. КРАВЦОВ**, д-р техн. наук **Ю.Г. КУЦАН**

Відповідальний секретар: **Л.Є. ЗБОРОВСЬКА**

Редакційна колегія:

канд. техн. наук **В.О. АРТЕМЧУК**, чл.-кор. НАН України **В.П. БОЮН**, д-р техн. наук **В.Н. БЄЛЕЦЬ-КІЙ** (Польща), д-р техн. наук **А.Ф. ВЕРЛАНЬ**, канд. техн. наук **О.М. ДИБАЧ**, д-р техн. наук **В.Ф. КАТКОВ** (Польща), канд. техн. наук **І.В. КОЦЮБА**, д-р техн. наук **А.Я. МАТОВ**, акад. НАН України **Ю.М. МАЦЕВИТИЙ**, д-р техн. наук **О.О. ПОПОВ**, д-р техн. наук **В.Д. САМОЙЛОВ**, д-р техн. наук **С.Є. САУХ**, д-р техн. наук **В.П. СИМОНЕНКО**, д-р техн. наук **І.С. СКАРГА-БАНДУРОВА**, д-р техн. наук **О.А. ЧЕМЕРИС**, д-р техн. наук **А.В. ЯЦИШИН**

Регіональні редактори:

Prof. E. Dshalalow
Department of Applied
Mathematics, Florida
Institute of Technology,
Melbourne FL 32901, USA,
edshalalow@cfl.rr.com

Dr. Stan Lipovetsky
GfK Custom Research North America,
8401 Golden Valley Road,
Minneapolis, Minnesota
55427-0900, USA,
stan. Lipovetsky@gfk.com

Prof. V. Sree Hari Rao
Department of Mathematics
Jawaharlal Nehru
Technological University,
Hyderabad 500872, India,
vshrao@yahoo.com

Редакційна рада:

Prof. R.P. AGARWAL (USA), проф. Ю.А. БЄЛОВ (Україна), чл.-кор. НАН України, проф. В.В. ВАСИЛЬЄВ (Україна), prof. E. ÇINLAR (USA), prof. H. DADUNA (Germany), акад. РАН, проф. К.С. ДЕМІРЧЯН (Росія), чл.-кор. НАН України **В.Ф. ЄВДОКИМОВ**, prof. H.I. FREEDMAN (Canada), prof. T. KACZOREK (Poland), prof. J. KORBICZ (Poland), акад. НАН України, проф. А.А. МАРТИНЮК (Україна), проф. А.І. ПЕТРЕНКО (Україна), акад. НАН України, проф. Б.С. СТОГНІЙ (Україна), prof. J. SOLDEK (Poland), акад. НАН України, проф. А.К. ШИДЛОВСЬКИЙ (Україна), prof. V.A. VUJICHICH (Serbia)

**Журнал реферується та індексується в Sci Tech Premium
Collection (ProQuest), INSPEC (IEE/IEEE), Index Copernicus**

**За наказом № 527 МОН України від 24.05.2018 журнал включено
до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть
публікуватися основні результати дисертаційних робіт**

Адреса редакції: 03164, Київ-164, вул. Генерала Наумова, 15.
Тел. (044) 4241466, факс 4240586. E-mail: em@ipme.kiev.ua; http: www.emodel.org.ua

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

ЕЛЕКТРОННЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ЭЛЕКТРОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ELECTRONIC MODELING

ТОМ 42
1
2020

МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ВИХОДИТЬ ОДИН РАЗ НА ДВА МІСЯЦІ

ЗАСНОВАНИЙ У 1979 РОЦІ

КИЇВ

ЗМІСТ

Математичне моделювання та обчислювальні методи

- САУХ С.Е., ДЖИГУН Е.Н. Аппроксимативный подход к моделированию ГЭС в задачах планирования режимов электроэнергетических систем 3
- ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., РАФИЕВА Т.К., АБДУЛЛАЕВА С.А. Фидуциальный подход к обеспечению однородных технико-экономических показателей 13
- ГАМЗАЕВ Х.М. Алгоритм определения траектории движения источника тепла вдоль нагреваемого одномерного стержня 25

Інформаційні технології

- СЕРГІЄНКО А.М., ОРЛОВА М.М., МОЛЧАНОВ О.А. Апаратно-програмна обробка XML-документів 33

© Інститут проблем
моделювання
в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова
НАН України, 2020

Застосування методів та засобів моделювання

ІГЛІН С.П., ДМИТРИК В.В., СКУЛЬСЬКИЙ В.Ю. Моделювання руху рідкого металу в зварювальній ванні	51
МЕЛЬНИК И.В., ПОЧИНОК А.В. Использование матричных алгоритмов для расчета траекторий заряженных частиц и определения фокальных параметров электронного пучка	73
ПОДГУРЕНКО В.С., ГЕТМАНЕЦЬ О.М., ТЕРЕХОВ В.Є. Моделювання роботи вітропарків України в умовах обмеження генерації	91
ГНАТЮК С.Є., КОРОТЧЕНКО Л.А., НЕБЕСНА Я.Е. Моделювання надійності об'єктів зі змінною структурою	103
Правила оформлення статті для журналу «Електронне моделювання»	113
Правила оформлення статті для журналу «Электронное моделирование»	117

*Рекомендовано до друку
вченою радою ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України (від 30.01.20, № 2)*

*Номер надруковано частково за рахунок державного замовлення
згідно з Програмою підтримки періодичних видань НАН України*

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 5889, 19.12.2017 р.

Свідоцтво про держ. реєстрацію КВ 13147-2031ПР, 27.08.2007

Оригінал-макет виготовлено в ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України

Підписано до друку 05.02.20. Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 10,56.
Обл.-вид. арк. 7,60. Тираж 138 прим. Зам. № 5866

Віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01004

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 544 від 27.07.2001

doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.01.091>
УДК 621.548:621.311.24

В.С. Подгуренко¹, канд. техн. наук,

О.М. Гетманець², канд. фіз.-мат. наук, **Терехов В.Є.**¹, аспірант

¹ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 424 91 73, vspodgurenko@gmail.com; vl.terekhov86@gmail.com),

² Національний університет ім. В.Н. Каразіна
(Україна, 61000, Харків, пл. Свободи, 4,
тел. (067) 574 45 96, getmanets54@gmail.com)

Моделювання роботи вітропарків України в умовах обмеження генерації

Розглянуто моделювання виробітку вітроелектричної станції (ВЕС) у нормальному режимі роботи та в умовах накладених обмежень генерації для кількісної оцінки втрат електроенергії вітропарків України. З використанням існуючих у вітроенергетиці підходів запропоновано нові рішення, наприклад заміна параметрів роботи ВЕС у нормальному режимі параметрами обмеження, застосування характеристики потужності вітроелектричної установки (ВЕУ) у характерних зонах роботи. На основі багаторічних метеорологічних спостережень та результатів аналізу характеристик потужності сучасних промислових ВЕУ великої потужності запропоновано та випробувано математичну модель виробітку з мінімальним набором вхідних даних. Наведено приклади розрахунків різними способами та співставлення отриманих результатів.

К л ю ч о в і с л о в а: вітрова електрична установка, вітрова електрична станція, розподіл Вейбула—Гніденка, крива потужності, обмеження генерації.

Сумарна встановлена потужність об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України понад 50 млн. кВт [1]. Протяжність її повітряних і кабельних ліній електропередач понад 920 тис. км [2]. Ці матеріальні цінності є одним з основних засобів розвитку економіки України та забезпечення потреб населення. Однією з важливих проблем економіки є підвищення ефективності використання наявних енергоресурсів. Тому мінімізація втрат електроенергії в мережах електропостачання є одною з основних умов ефективної експлуатації всієї ОЕС.

З введенням «зеленого тарифу» в Україні у 2010 р. були побудовані перші промислові вітрові електричні станції (ВЕС). На відміну від елек-

© Подгуренко В.С., Гетманець О.М., Терехов В.Є., 2020

трянцій на традиційному паливі, виробіток електроенергії яких повністю контролюється і підлаштовується до потреб споживачів, величина поточної активної потужності ВЕС залежить від змінної у часі швидкості діючого вітрового потоку, тобто зовнішнього фактору, який складно передбачити і неможливо контролювати [3].

Найбільш привабливими районами для будівництва ВЕС є узбережжя Чорного та Азовського морів. Водночас, Північне Причорномор'я має дефіцит потужних ліній електропередач та підстанцій, що змушує приєднувати ВЕС до малопотужних ліній і передавати електроенергію на межі їх пропускної здатності. На жаль, активне збільшення сукупної потужності вітроенергетичного сектору не супроводжується відповідним розвитком приймача «зеленої» електроенергії — ОЕС України. Такі обставини все частіше призводять до випадків тимчасової неспроможності ОЕС до повноцінного прийому виробленої ВЕС електроенергії, що змушує вводити обмеження потужності генерації ВЕС. На жаль, при збереженні диспропорції розвитку ВЕС та ОЕС такі випадки будуть частішати. Тому дослідження роботи ВЕС в умовах обмеження генерації є вкрай актуальною науково-прикладною задачею.

Проведемо дослідження впливу обмеження на виробіток електроенергії ВЕС за допомогою порівняння результатів експлуатації ВЕС в умовах обмеження з результатами роботи без обмежень.

Відомий спосіб розрахунку виробітку електроенергії і часу роботи вітрової електричної установки (ВЕУ) для довільного діапазону зміни робочих швидкостей вітру, оснований на апроксимації емпіричної залежності повторюваності швидкостей вітру за допомогою розподілу Вейбула — Гніденка (РВГ) [4,5]. Відповідно до РВГ виробіток ВЕУ Q визначаємо за формулою

$$Q = T \int_0^{\infty} P(V) f(V) dV \text{ (кВт·год)}. \quad (1)$$

Тут T — час роботи ВЕУ; $P(V)$ — характеристика потужності, або крива потужності ВЕУ; $f(V)$ — диференціальний розподіл швидкості вітру (густота ймовірності повторення швидкості зі значенням V), який добре описується РВГ [6],

$$f(V) = \frac{c}{b} \left(\frac{V}{b}\right)^{c-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{b}\right)^c \right], \quad 1 < c < 10,$$

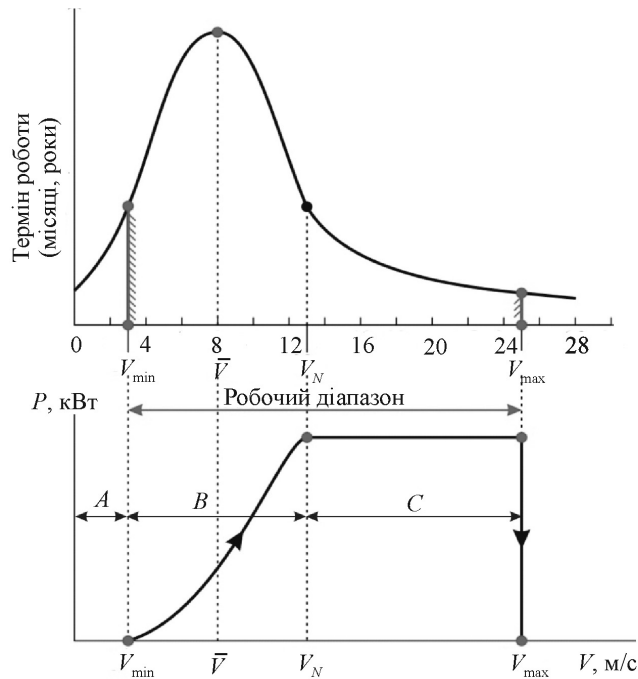


Рис. 1. Зони характеристики потужності ВЕУ

де параметри розподілу b і c оцінюють за даними спостережень. Інтеграл (1) являє собою так звану «згортку» двох функцій: характеристики потужності ВЕУ $P(V)$ і диференціальної характеристики розподілу швидкості вітру $f(V)$. За наявності даних щодо розподілу вітру $f(V)$ основна задача полягає у пошуку функції потужності $P(V)$.

Крива потужності ВЕУ зазвичай подається у табличному (графічному) вигляді, і для подальших розрахунків виникає потреба переведення отриманих даних в аналітичну форму. Сучасне програмне забезпечення дозволяє по наявним табличним значенням потужності ВЕУ отримати поліноміальне рівняння регресії k -го ступеню, наприклад, застосовуючи інструмент побудови тренду з пакету MS Excel.

В умовах обмеження генерації крива потужності ВЕУ змінюється відповідно до значення накладеного обмеження, що змушує коригувати початкові табличні дані і перераховувати рівняння регресії. Вочевидь, за наявності деякої множини значень обмеження такий спосіб є неоптимальним і змушує до пошуків більш прийнятних способів. Розглянемо декілька з них.

Спосіб 1. Характеристика потужності ВЕУ складається з трьох умовних зон (рис. 1).

Зона А — швидкість вітру недостатня для початку генерації активної електроенергії ВЕУ, тобто швидкість V менша стартової $V_{\min}$, значення якої вказане у паспортних даних ВЕУ ($V < V_{\min}$).

Зона B — перехідний режим роботи ВЕУ: $V_{\min} \leq V < V_N$, де V_N — швидкість вітру, за якої ВЕУ досягає номінальної потужності P_N .

Зона C — номінальний режим роботи: $V_N \leq V \leq V_{\max}$, де $V_{\max}$ — максимальна робоча швидкість вітру.

За нормальної роботи усталений режим відповідає номінальному, за умови обмеження ВЕУ працює в режимі підтримки генерації з максимально допустимою потужністю.

Відкидаючи зону A , криву потужності можна відтворити у вигляді сукупності двох складових: кривої потужності перехідного режиму (зона B) і прямої $P(V) = P_N$ усталеного режиму (зона C). Відповідно рівняння регресії необхідно знаходити тільки для зони B :

$$P(V) = (a_0 + a_1V + a_2V^2 + \dots + a_kV^k) \theta(V_N - V) + P_N \theta(V - V_N), \quad (2)$$

де $\theta(x)$ — ступінчаста θ -функція Хевісайда [7], що працює за алгоритмом

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

При швидкості вітру $V < V_N$ (зона B) правий доданок $P_N \theta(V - V_N)$ у формулі (2) дорівнює нулю і розрахунок ведеться за поліноміальним рівнянням регресії, при $V \geq V_N$ лівий доданок дорівнює нулю і розрахунок ведеться за значенням номінальної потужності P_N . Вочевидь, замінюючи V_N на $V_{об}$, тобто швидкість вітру, при якому ВЕУ досягає рівня обмеження $P_{об}$, за рівнянням (2) можна моделювати характеристику потужності ВЕУ в умовах обмеження генерації:

$$P(V) = (a_0 + a_1V + a_2V^2 + \dots + a_kV^k) \theta(V_{об} - V) + P_{об} \theta(V - V_{об}). \quad (3)$$

Отримати значення $V_{об}$ можна за допомогою визначення коренів поліноміального рівняння потужності при $P(V_{об}) = P_{об}$:

$$P(V_{об}) = (a_0 + a_1V_{об} + a_2V_{об}^2 + \dots + a_kV_{об}^k) = P_{об}. \quad (4)$$

Застосовуючи рівняння (3), за рівнянням (1) знаходимо виробіток Q .

Спосіб 2. Повернемося до рівняння (1). Оскільки інтеграл (1) являє собою площу, розділимо його на дві частини відповідно до зон B і C :

$$Q = T \left(\int_{V_{\min}}^{V_N} P(V) f(V) dV + \int_{V_N}^{V_{\max}} P_N f(V) dV \right). \quad (5)$$

За допомогою (4) знаходимо значення $V_{об}$, замінюємо V_N на $V_{об}$ та P_N на $P_{об}$ і за формулою (5) знаходимо виробіток ВЕУ, що працює з обмеженням $P_{об}$.

Спосіб 3. Способи 1, 2 потребують даних щодо кривої потужності $P(V)$ та розподілу швидкості вітру $f(V)$, які не завжди є у наявності. За

Таблиця 1

V , м/с	P , кВт	V , м/с	P , кВт
3,5	31,9	9,0	1647,0
4,0	82,0	10,0	2164,0
5,0	245,1	11,0	2466,0
6,0	453,0	11,5	2500,0
7,0	749,0	...	...
8,0	1143,0	25,0	2500,0

пропонована математична модель дозволяє розрахувати виробіток ВЕУ на території Північного Причорномор'я, використовуючи мінімальний набір вхідних даних:

$$Q = -7126,25 + 1348,594 \cdot X_1 + 97,52617 \cdot X_2 + 28,81139 \cdot X_3, \quad (6)$$

де X_1 — номінальна потужність генератора P_N (МВт); X_2 — діаметр вітрового колеса (ВК) (м); X_3 — висота розташування осі ВК (м). Замінюючи P_N на $P_{об}$, за формулою (6) розраховуємо виробіток ВЕУ в умовах обмеження генерації.

Оцінимо точність запропонованих способів, зіставивши їх результати із фактичними даними роботи Очаківської ВЕС «Вітряний парк Очаківський» встановленою потужністю 25 МВт за 2012, 2013 роки — період найбільшого впливу обмеження генерації. У 2012 р. ВЕС працювала 6768 годин з осередненим значенням обмеження 16,2 МВт. У 2013 р. ВЕС працювала круглий рік, тобто 8 760 годин, з осередненим значенням 22,9 МВт.

Вітрова електрична станція укомплектована десятьма ВЕУ FL 2500-100 номінальною потужністю 2,5 МВт. Висота вісі ВК та його діаметр становлять 100 м. Характеристику потужності ВЕУ наведено у табл. 1.

Згідно паспортних даних номінальна потужність ВЕУ досягається за швидкості вітру $V_N = 11,5$ м/с, тобто зона A для даної ВЕУ становить 0 — 3,5 м/с, зона B — 3,5—11,5 м/с, зона C — 11,5—25 м/с. За даними табл. 1 за допомогою пакета MS Excel побудовано графік та поліноміальну лінію тренду для зони B (рис. 2). Як бачимо на рис. 2, для апроксимації табличних даних з достатньо великою точністю можна використати поліноміальне рівняння четвертого ступеню.

За результатами спостережень з метеощогли «Іванівка» та з бортових анеометрів ВЕУ отримано наступні значення середньої швидкості вітру V_{cp} та параметрів РВГ b і c на висоті 100 м:

$$2012 \text{ р. — } V_{cp} = 7,5 \text{ м/с, } b = 8,443, c = 2,479;$$

$$2013 \text{ р. — } V_{cp} = 7,5 \text{ м/с, } b = 8,479, c = 2,416.$$

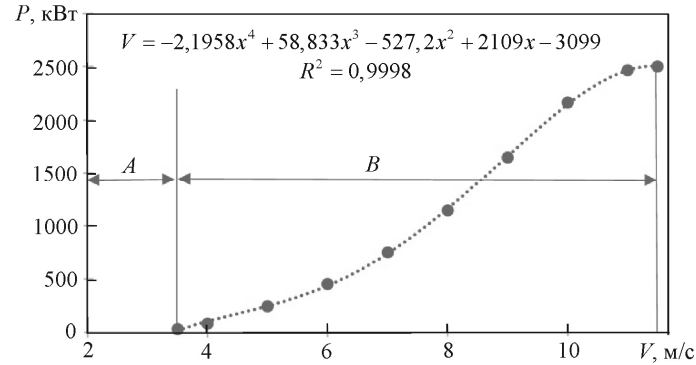


Рис. 2. Перехідна частина кривої потужності FL 2500–100

Розрахунок виробітку ВЕС Q за нормального режиму роботи та в умовах обмеження генерації за способом 1 показано на лістингах 1.1 і 1.2, а способом 2 — на лістингу 2 (тільки 2012 р). Розрахунки виконано в пакеті MathCAD. Введемо умову, що накладене на ВЕС обмеження рівномірно розподілено на всі встановлені ВЕУ, тобто величина обмеження генерації ВЕУ Очаківської ВЕС складає 1/10 загального обмеження.

Лістинг 1.1. Обчислення виробітку Q за 2012 рік способом 1.

2012 - без обмеження.

Вхідні дані: $V_{\max} := 25$; $V_{\min} := 3.5$; $b := 8.443$; $c := 2.479$; $T := 6768$; $N := 10$; $P_n(v) := 2500$; $V_n := 11.5$.

$$f(v) := \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{v}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^c\right]; \quad P(v) := -2.1958v^4 + 58.833v^3 - 527.2v^2 + 2109v - 3099.$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[P(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(V_n - v) + 1}{2} \right) + \left[P_n(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(v - V_n) + 1}{2} \right) \right] \cdot f(v) \right] dv = 1.091 \times 10^3.$$

$$Q := T \cdot P1 \cdot N = 7.383 \times 10^7.$$

2012 - з обмеженням.

Вхідні дані: $P_{\text{об}}(v) := 1620$.

$v := 7$ - ініціалізація початкового значення v (будь-яке близьке до значення кореня).

$$V_{\text{об}} := \text{root}\left(-2.1958v^4 + 58.833v^3 - 527.2v^2 + 2109v - 3099 - P_{\text{об}}(v), v\right).$$

$$V_{\text{об}} = 8.919.$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[P(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(V_{\text{об}} - v) + 1}{2} \right) + \left[P_{\text{об}}(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(v - V_{\text{об}}) + 1}{2} \right) \right] \cdot f(v) \right] dv = 885.836.$$

$$Q := T \cdot P1 \cdot N = 5.995 \times 10^7.$$

Лістинг 1.2. Обчислення виробітку Q за 2013 рік способом 1:

2013 - без обмеження.

Вхідні дані: $b := 8.479$; $c := 2.416$; $T := 8760$.

$$f(v) := \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{v}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^c\right] .$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[\left[P(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(V_n - v) + 1}{2} \right) \right] + \left[P_n(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(v - V_n) + 1}{2} \right) \right] \right] \cdot f(v) dv = 1.096 \times 10^3 .$$

$$Q := T \cdot P1 \cdot N = 9.604 \times 10^7 .$$

2013 - з обмеженням.

Вхідні дані: $P_{\text{об}}(v) := 2290$.

$v := 7$ - ініціалізація початкового значення v (будь-яке близьке до значення кореня) .

$$V_{\text{об}} := \text{root}\left(-2.1958v^4 + 58.833v^3 - 527.2v^2 + 2109v - 3099 - P_{\text{об}}(v), v\right) .$$

$$V_{\text{об}} = 10.361 .$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[P(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(V_{\text{об}} - v) + 1}{2} \right) + P_{\text{об}}(v) \cdot \left(\frac{\text{sign}(v - V_{\text{об}}) + 1}{2} \right) \right] \cdot f(v) dv = 1.06 \times 10^3 .$$

$$Q := T \cdot P1 \cdot N = 9.286 \times 10^7 .$$

Лістинг 2. Обчислення виробітку Q за 2012 рік способом 2.

2012 - без обмеження.

Вхідні дані: $V_{\max} := 25$; $V_n := 11.5$; $V_{\min} := 3.5$; $b := 8.443$; $c := 2.479$; $T := 6768$; $N := 10$; $P_n := 2500$.

$$f(v) := \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{v}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^c\right] ; \quad P(v) := -2.1958v^4 + 58.833v^3 - 527.2v^2 + 2109v - 3099 .$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_n} P(v) \cdot f(v) dv = 799.964 ; \quad P2 := \int_{V_n}^{V_{\max}} P_n \cdot f(v) dv = 290.855 .$$

$$Q := T \cdot (P1 + P2) \cdot N = 7.383 \times 10^7 .$$

2012 - з обмеженням.

Вхідні дані: $P_{\text{об}} := 1620$.

$v := 7$ - ініціалізація початкового значення v (будь-яке близьке до значення кореня) .

$$V_{\text{об}} := \text{root}\left(-2.1958v^4 + 58.833v^3 - 527.2v^2 + 2109v - 3099 - P_{\text{об}}, v\right) = 8.919 .$$

$$V_{\text{об}} = 8.919 .$$

$$P1 := \int_{V_{\min}}^{V_{\text{об}}} P(v) \cdot f(v) dv = 370.695 .$$

$$P2 := \int_{V_{об}}^{V_{max}} P_{об} \cdot f(v) dv = 515.142.$$

$$Q := T \cdot (P1 + P2)N = 5.995 \times 10^7.$$

З лістингів 1.1, 1.2 та 2 видно, що способами 1 і 2 отримано ідентичні значення (за 2012 р.), позаяк обидва способи основані на рівнянні (1). Беручи до уваги, що θ -функція застосовується у більшості популярних пакетів (в MathCAD як функція *sign*, в MS Excel як функція *ЗНАК*), способи 1 і 2 можна вважати рівноцінними.

Згідно з результатами розрахунків способами 1 і 2 за умови відсутності впливу обмеження генерації виробіток ВЕС мав би скласти 73 830 МВт·год у 2012 р. та 96 040 МВт·год у 2013 р. (не враховуючи простоїв). З урахуванням обмеження генерації виробіток мав би скласти відповідно 59 950 МВт·год та 92 860 МВт·год.

Обчислимо виробіток Очаківської ВЕС за рівнянням (6) способом 3. Безсумнівною перевагою цього способу є простота розрахунку та мінімальний набір вхідних даних. Оскільки за даним способом обчислюється річний виробіток, а у 2012 р. ВЕС працювала лише 6768 год, тобто 77,26% річної тривалості, отриманий результат помножимо на 0,7726. У 2013 р. ВЕС працювала цілий рік і необхідності коригування немає. Підставивши значення $X1 = 2,5$, $X2 = 100$, $X3 = 100$ та $N = 10$, отримаємо наступний виробіток:

за 2012 рік

$$Q = (-7126,25 + 1348,594 \cdot 2,5 + 97,52617 \cdot 100 + 28,81139 \cdot 100) \cdot 0,7726 = 68\,599 \text{ МВт} \cdot \text{год},$$

за 2013 рік

$$Q = -7126,25 + 1348,594 \cdot 2,5 + 97,52617 \cdot 100 + 28,81139 \cdot 100 = 88\,790 \text{ МВт} \cdot \text{год}.$$

Підставивши $X1 = 1,62$ для 2012 р. та $X1 = 2,29$ для 2013 р., отримаємо виробіток ВЕС з урахуванням обмеження генерації:

за 2012 рік

$$Q = (-7126,25 + 1348,594 \cdot 1,62 + 97,52617 \cdot 100 + 28,81139 \cdot 100) \cdot 0,7726 \cdot 10 = 59\,430 \text{ МВт} \cdot \text{год},$$

за 2013 рік

$$Q = (-7126,25 + 1348,594 \cdot 2,29 + 97,52617 \cdot 100 + 28,81139 \cdot 100) \cdot 10 = 85\,958 \text{ МВт} \cdot \text{год}.$$

Отримані результати способами 1, 2 ($Q_{1,2н}$) та способом 3 ($Q_{3об}$) подано у табл. 2 у нормальному режимі та при обмеженні генерації.

Таблиця 2

Рік	$Q_{1,2н}$ МВт · год	$Q_{3об.}$ МВт · год	$Q_{1,2 об.}$ МВт · год	$Q_{3 об.}$ МВт · год	Співвідношення, %		$(Q_n - Q_{об})/Q_n$, %	
					$Q_{1,2 об.}/Q_{1,2 н}$	$Q_{3 об.}/Q_{3 н}$	$\Delta Q_{1,2}$	ΔQ_3
2012	73 803	68 599	59 950	59 430	81,2	86,6	18,8	13,4
2013	96 040	88 790	92 860	85 958	96,7	96,8	3,3	3,2

Згідно з даними табл. 2 у 2012 р. через накладене обмеження генерації Очаківською ВЕС було втрачено потенційного виробітку 18,8 %, що розраховано способами 1, 2, та 13,3 %, що розраховано способом 3. У 2013 р. втрачено відповідно 3,3 % та 3,2 % виробітку. Незважаючи на абсолютно різний підхід та набір початкових даних, різниця у розрахунках способами 1, 2 та 3 склала 5,4 % у 2012 р. та 0,1 % у 2013 р. Різниця у 5,4 % пояснюється використанням річних значень параметрів b та c РВГ, тоді як потрібно було б використовувати невідомі значення, отримані за дев'ять місяців роботи у 2012 р. Використання річних значень замість конкретних значень за час роботи (місяць, квартал, дев'ять місяців і т.д) зумовлює збільшення похибки.

Висновки

Запропоновані способи дозволяють розрахувати потенційний виробіток ВЕС у нормальному режимі роботи та в умовах обмеження генерації із використанням різних наборів вхідних даних. Співставлення отриманих результатів свідчать про можливість оцінювати втрати від обмеження потужності генерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матєєнко, О.Р. Пастух. Київ.: Вид-во «Політехніка», 2017, 456 с.
2. План розвитку системи передачі на 2020—2029 роки. ДП Укренерго, 2019, 378 с. <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/10/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2020-2029-roky-1.pdf>
3. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. ДП Укренерго, 2019, 84 с. <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-vid-31.10.19.pdf>
4. Васько П. Ф. Определение технических показателей эффективности использования ветроэнергетических агрегатов в Украине / П.Ф. Васько, А.А. Брыль, П.П. Пекур // Энергетика и электрификация, 1995, № 2, с. 48—51.
5. Alfred J. Cavallo. Wind Energy: Current Status and Future Prospects // Science & Global Security, 1993, Vol. 4, p. 65—109.
6. Кравчишин В.С., Медиковський М.О., Галуцук М.О. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В.С. Кравчишин, М.О. Медиковський, М.О. Галуцук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Інформаційні системи та мережі, 2016, № 854, с. 80—87.
7. Плескунов М.А. Операционное исчисление: учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 143 с.

Отримано 13.01.20

REFERENCES

1. Zhurakhivskiy, A.V., Kazanskyi, S.V., Mateienko, Yu.P. and Pastukh, O.R. (2017), *Nadiynist' elektroenerhetychnykh system i elektrychnykh merezh: pidruchnyk* [Reliability of power systems and power grids: a textbook], Vyd-vo «Politehnika».
2. (2019), “Plan for the development of the transmission system for 2020-2029”, available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/10/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2020-2029-roky-1.pdf> (accessed January 27, 2020).
3. (2019), “Report on conformity assessment (adequacy) of generating capacities”, available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-vid-31.10.19.pdf> (accessed January 27, 2020).
4. Vas'ko, P.F., Bryl', A.A. and Pekur, P.P. (1995), “Determination of technical indicators of the efficiency of using wind power units in Ukraine”, *Energetika i elektrifikatsiya*, no. 2. pp. 48-51.
5. Alfred, J.C. (1993). “Wind Energy: Current Status and Future Prospects, Science & Global Security”, *Gordon and Breach Science Publishers*, Vol. 4, pp.65-109.
6. Kravchyshyn, V.S., Medykovskyi, M.O. and Halushchak, M.O. (2016), “Modeling of energy potential of a wind power plant”, *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika». Ser. Informatsiyini systemy ta merezhi*, no. 854, pp. 80-87.
7. Pleskunov, M.A. (2014), *Operatsionnoye ischisleniye: ucheb. pos* [Operational calculus: textbook. pic], Izd-vo Ural, Ekaterinburg, Russia.

Received 13.01.20

В.С. Подгуренко, О.М. Гетманец, В.Е. Терехов

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕТРОПАРКОВ УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ

Рассмотрено моделирование выработки ветроэлектрической станции (ВЭС) в нормальном режиме работы и в условиях наложенных ограничений генерации для количественной оценки потерь электроэнергии ветропарков Украины. С использованием существующих в ветроэнергетике подходов предложены новые решения, например замена параметров работы ВЭС в нормальном режиме параметрами ограничения, использование характеристики мощности ветроэлектрической установки (ВЭУ) в характерных зонах работы. На основе многолетних метеорологических наблюдений и результатов анализа характеристик мощности современных промышленных ВЭУ большой мощности предложена и опробована математическая модель выработки с минимальным набором входных данных. Приведены примеры расчетов различными способами и сопоставление полученных результатов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ветровая электрическая установка, ветровая электрическая станция, распределение Вейбулла—Гнеденко, кривая мощности, ограничение генерации.

V.S. Podhurenko, O.M. Getmanets, V.Ye. Terekhov

MODELING OF UKRAINIAN WIND FARMS PRODUCTION UNDER THE GENERATION LIMITATION CONDITIONS

The modeling of the production of a wind power station in normal operation and under the generation limitation conditions as the aim of quantifying the electricity losses in the operation of wind farms of Ukraine is considered. To achieve this goal, on the basis of existing in wind energy approaches, original solutions have been proposed, such as, for example, replacing normal mode wind farm operation parameters in with limitation parameters, researching wind turbine power characteristics with characteristic operating areas. Based on long-term meteorological observations and analysis of the power characteristics of modern industrial multi-megawatt class wind turbines, a mathematical model of generation with a minimum set of input data is proposed and tested in the calculations. For a better understanding of the material, examples of calculations in various ways and a comparison of the results are given.

К е у о r d s: wind turbine, wind farm, Weibull—Gnidenko distribution, power curve, generation limitation.

ПОДГУРЕНКО Володимир Сергійович, канд. техн. наук, доцент, докторант Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1964 р. закінчив Миколаївський кораблебудівний ін-т. Область наукових досліджень — вітроенергетика.

ГЕТМАНЕЦЬ Олег Михайлович, канд. фіз.-мат. наук, доцент Національного університету ім. В.Н. Каразіна. У 1977 р. закінчив Харківський державний університет ім. М. Горького. Область наукових досліджень — математичне моделювання.

ТЕРЕХОВ Володимир Євгенович, аспірант Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 2010 р. закінчив Національний університет кораблебудування (м. Миколаїв). Область наукових досліджень — вітроенергетика.

