



АНАЛІЗ ДВОПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Виконано порівняльний аналіз різних двопараметричних залежностей для моделювання аеромеханічних характеристик вітрової турбіни для зарядки гідроакumuлювальної електростанції.

К л ю ч о в і с л о в а: вітротурбіна, потужність, кут установлення лопаті, модель, момент, швидкохідність.

Вступ. Найпоширеніші електростанції на відновлюваних джерелах енергії це вітроелектричні та фотоелектричні станції (ВЕС, ФЕС). Основним недоліком таких електростанцій є мінливість при генерації електроенергії. Вона проявляється у стохастичності та пульсаціях, які шкідливо впливають на весь процес перетворення і передачі цієї енергії до кінцевого споживача. Досить часто ВЕС видають такі показники параметрів електроенергії, що доводиться їх від'єднувати від мережі, щоб запобігти неприпустимих наслідків для мережі і споживачів. Ця мінливість в генерації електроенергії є основним стримуючим фактором розвитку відновлюваних джерел. При значних обсягах встановленої потужності ВЕС найкращим виходом для вирішення проблеми мінливої генерації є її акумулювання. Існує багато способів акумулювання електроенергії, але для того щоб ефективно акумулювати цю енергію у великих обсягах необхідно використовувати гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС). Використання ГАЕС для накопичування енергії ВЕС це ефективний шлях для їх інтегрування в електроенергетичну систему [1, 2], що в свою чергу дає можливість накопичувати та реалізовувати енергію відновлюваних джерел у значних обсягах.

В даній статті, як перший етап, буде розглянуто двопараметричну залежність коефіцієнта потужності вітрової турбіни. Вибрана залежність необхідна для побудови досліджуваної математичної моделі, що налічуватиме такі об'єкти – вітровою турбіна, електричний насос, гідравлічна турбіна.

Для моделювання процесу роботи вітроустановки було обрано та проаналізовано вид формули функціональної залежності, коефіцієнта потужності – C_p .

$$C_p(Z, Q) = C_1(C_2 - C_3Q - C_4Q^x - C_5) e^{-C_6}$$

Дана функціональна залежність містить два змінні параметри: Z – відношення швидкості обертання на кінці лопаті до швидкості вітру або швидкохідність; Q – кут установки лопаті [3]. Залежність коефіцієнта потужності від двох пара-

метрів наведена в наступних публікаціях [4, 5], згодом інші автори використовуючи цю функціональну залежність розраховували свої коефіцієнти для моделювання конкретних вітроустановок. Деякі варіанти цієї функціональної залежності з різними коефіцієнтами були порівняні авторами з експериментальними залежностями, щоб перевірити їхню адекватність для подальшого використання.

Для порівняння було використано три різні інтерпретації функціональної залежності, яка представлена вище з різними коефіцієнтами.

1) Формула функціональної залежності [6, 7]:

$$C_p(Z, Q) = C_1(C_2 - C_3Q - C_4) e^{-C_5/Z_i} + C_6Z,$$

$$C_p(Z, Q) = 0,5(116/Z_i - 0,4Q - 5) e^{-21/Z_i} + 0,0068Z$$

$$Z_i = 1 / \left(\frac{1}{Z + 0,08Q} - \frac{0,035}{Q^3 + 1} \right). \quad (1)$$

$$C_1=0,5; C_2=116/Z_i; C_3=0,4; C_4=5; C_5=21/Z_i; C_6=0,0068;$$

2) Формула функціональної залежності [8]:

$$C_p(Z, Q) = C_1(C_2 - C_3Q - C_4Q^x - C_5) e^{-C_6},$$

$$C_p(Z, Q) = 0,5(116/Z_i - 0,4Q - 5) e^{-21/Z_i}$$

$$Z_i = 1 / \left(\frac{1}{Z + 0,08Q} - \frac{0,035}{Q^3 + 1} \right). \quad (2)$$

$$C_1=0,5; C_2=116/Z_i; C_3=0,4; C_4=0; C_5=5; C_6=21/Z_i$$

3) Формула функціональної залежності [9]:

$$C_p(Z, Q) = C_1(C_2 - C_3Q - C_4Q^x - C_5) e^{-C_6},$$

$$C_p(Z, Q) = 0,5(151/Z_i - 0,58Q - 0,002Q^{2,14} - 13,2) e^{-18,4/Z_i}$$

$$Z_i = 1 / \left(\frac{1}{Z - 0,02Q} - \frac{0,003}{Q^3 + 1} \right). \quad (3)$$

$$C_1=0,73; C_2=151/Z_i; C_3=0,58; C_4=0,002; C_5=13,2; C_6=18,4/Z_i; x=2,14$$

Ці формули відрізняються між собою тільки тим, що вони були відкориговані для своїх задач моделювання і використання вітротурбіни, причому формула (1) використовується для імітаційного

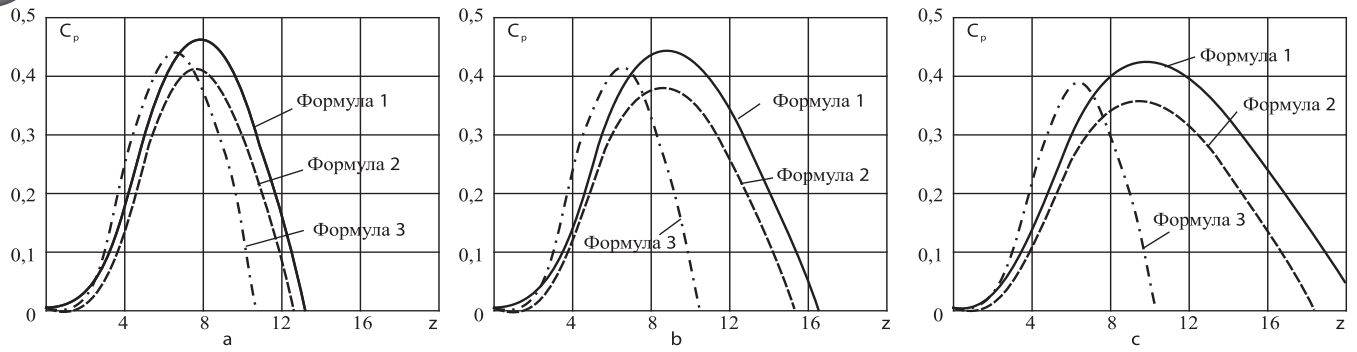


Рис. 1. Графіки трьох залежностей для кутів: *a* – 0°, *b* – 1° і *c* – 2°.

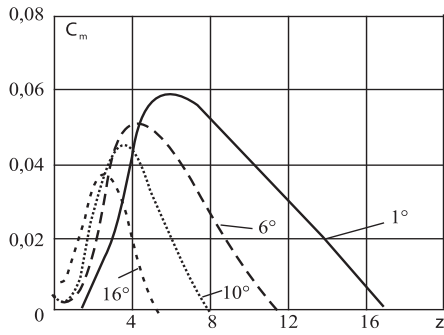


Рис. 2. Експериментальні криві C_m для вітроустановки 500 кВт.

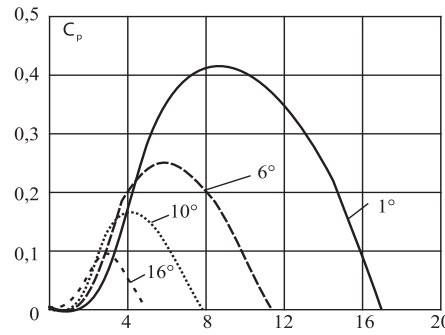


Рис. 3. Експериментальні криві C_p для вітроустановки 500 кВт

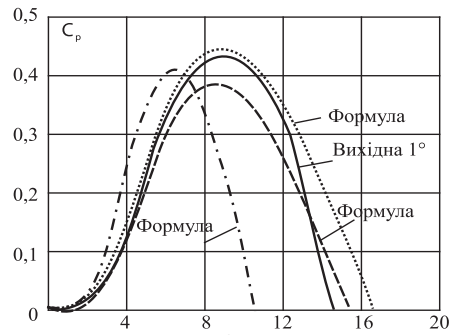


Рис. 4. Порівняння з експериментальною кривою АВЕУ6-4

моделювання блока вітрової турбіни в бібліотеці SimPowerSystems прикладного пакета MATLAB.

Порівняння роботи цих формул представлено у вигляді графіка для різних робочих кутів вітротурбіни (Рис.1).

Як видно з рисунків графік розрахований по формулі (1) має найбільше значення C_p , тоді як по формулі (3) має дещо менше значення C_p і її номінальне значення Z суттєво менше від формул (1) і (2), що говорить нам про значно менший діапазон застосування формули. Зі збільшенням кута

установки лопаті характер графіків зберігається.

В якості експериментальних даних були взяті криві залежності коефіцієнта моменту (C_m) від Z для вітроустановки 500 кВт [10], та відповідно перераховані залежності C_p від Z (Рис. 2, 3).

На основі цих даних було здійснено порівняння з кривими по вище представленим формулам для аналогічних кутів установки лопаті (Рис. 4) для вітрогенератора АВЕУ6-4 [11] та вітрогенератора 500 кВт Рис. 5.

Як видно з Рис. 4 вихідна крива АВЕУ6-4 з встановленим кутом лопаті 1°, повторює за своїм характером криву по формулі (1), праві частини обох графіків розходяться, але та частина кривих на якій вітроагрегат набирає та розвиває найбільшу потужність мають однаковий характер. Всі інші формули не описують характер зміни залежності вітроагрегата АВЕУ6-4.

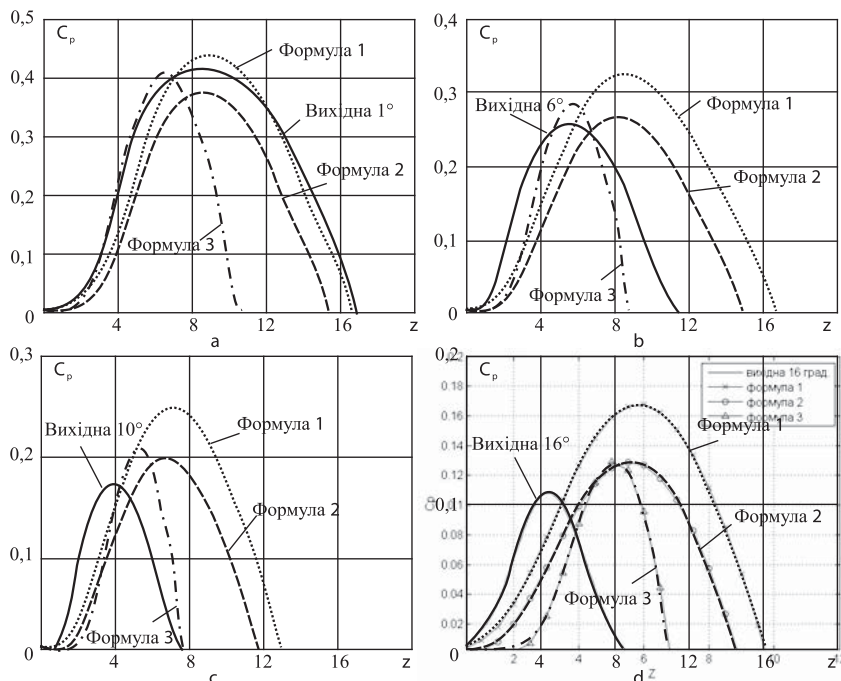


Рис. 5. Порівняння з експериментальною кривою 500 кВт

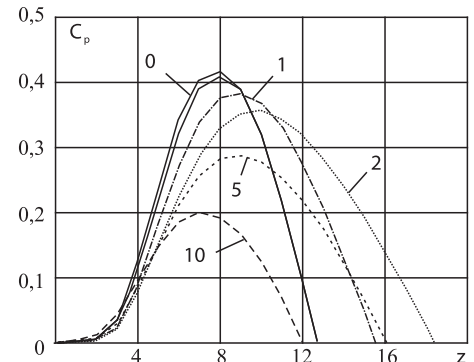


Рис. 6. Вихідні криві і їх апроксимації



На (Рис. 5, а) спостерігається схожий характер експериментальної кривої з кривою побудованою по формулі (1) попри те, що ліва частина експериментальної кривої знаходиться на третину Z лівіше від кривої описаної формулою (1). Інші дві криві не підпадають під опис експериментальних кривих. На інших рисунках (Рис. 5, b, c, d) жодна крива, по жодній із формул не співпадає з характером експериментальних кривих для представлених кутів.

З цього порівняння можна зробити висновок, що представлені функціональні залежності у вигляді формул (1), (2), (3) не можуть описувати функцію коефіцієнта потужності в вибраному діапазоні зміни кута лопаті, а отже не зможе і на більших кутах. При цьому для кутів при яких вітротурбіна генерує найбільшу потужність (кути 0° , 1° , 2° градуси) функціональна залежність по формулі (1) прийнятна, і на думку авторів може використовуватись для моделювання вітротурбін різного класу потужності.

В описаних функціональних залежностях використовуються сталі коефіцієнти, але якщо є дані експериментальної кривої, то за допомогою методу найменших квадратів (МНК) можна розрахувати ці коефіцієнти для окремої кривої при сталому куті установки лопаті. Причому отримані коефіцієнти можуть не співпадати з оригінальними. Тобто одна і та сама формула функціональної залежності може будувати однакову криву з різними коефіцієнтами при умові, що кут установки лопаті сталий. Наприклад для формули (1) були побудовані криві для кутів 0° , 1° , 2° , 5° , 10° на Рис. 6, потім по даним цих кривих за допомогою апроксимації МНК були отримані необхідні коефіцієнти (Табл. 1).

Коефіцієнти з Табл.1 підставлялись в формулу (1) і будувались відповідні залежності, які були накладені на оригінальні залежності Рис. 6. Як видно з графіка характер залежностей майже повністю співпадає для всіх кутів. Деякі коефіцієнти цієї залежності, знаходяться за межами дужок в формулі (1) це C_1 і C_6 . Ці розраховані коефіцієнти починаючи з встановленого кута 2° повністю співпадають з постійними коефіцієнтами формули (1), тоді як інші значно відрізняються (Табл. 1).

Висновок. Двопараметрична функціональна залежність C_p від Z має декілька варіантів представлення, але найближчою до очікуваного ре-

Таблиця 1. Розраховані коефіцієнти по формулі (1)

Кут установки лопаті	Коефіцієнти по формулі (1)			
	C_1	C_3	C_4	C_6
0	1,0798	-11064,2591	1114,8356	0,000754
1	0,74382	-22119,3208	22126,4683	0,00478
2	0,5606	1504,8722	-3003,553	0,00645
5	0,5205	-202,9884	1021,9694	0,0067
10	0,5179	-4,06504	49,6536	0,00679

зультату є лише одна формула наведена в [6, 7], яка найбільш якісно описує криві залежності та має такий самий характер як і експериментальні дані в діапазоні зміни номінальних значень робочих кутів установлення лопатей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Васько П.Ф., Ибрагимова М.Р., Пазыч С.Т. Гидроакмулирующие электростанции на морской воде – технологическая основа крупномасштабного использования ветровой и солнечной энергии в электроэнергетической системе Крыма // units // Alternative Energy and Ecology – ISJAEE № 15 (155) 2014. ст. 38–49.
2. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Ибрагимова М.Р., Пазыч С.Т. Гидроаккумулятивные электростанции – технологическая основа интеграции ветро- та фотоэлектрических станций до складу електроенергетичної системи України // Гідроенергетика України. – 2017. – №1-2. – С. 20–25
3. ДСТУ 3896:2007 – Вітроенергетичні установки та вітроенергетичні станції, – Київ 2008, ст.. 24.
4. Siegfried Heier Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems, 3rd Edition Wiley & Sons Ltd, 2014.
5. Man D. T., Sullivan J. P. and Wasynczuk O. Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, June 1981, PAS-100(6).
6. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. – М.: Солон-Пресс, 2003.
7. Siegfried Heier. (1998). Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons Ltd, 1998, ISBN 0-471-97143-X, New York, USA.
8. Nicolet C, Vaillant Y, Kawkabani B, Allenbach P, Simond J-J, Avellan F. Pumped storage units to stabilize mixed islanded power network: a transient analysis. In: Proceedings of HYDRO 2008, October 6-9, 2008, in Ljubljana, Slovenia. Paper 16.1.
9. J. G. Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder and W.L. Kling, (Feb. 2003) "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 144–151
10. Пекур П.П. Імовірнісні характеристики навантажувальних режимів роботи вітроелектричних установок з асинхронними генераторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.04.09 / Пекур П.П.; НАН України. – Київ, 2009. – 21 с.
11. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки, – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

