

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253

УДК 621.311.24

Гліб Миколайович Стрункін

старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка»
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потєбні Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)
E-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: LNQ-2155-2024

АВТОНОМНА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

Проведено аналіз методів підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну у вітроенергетичних установках. Розглянуто безмультиплікаторні схеми, що дозволяють підвищити ефективність аеромеханічного перетворення енергії вітру. Наведено історичні відомості розвитку систем з аеродинамічним мультиплікуванням. Виявлено перспективність використання систем з неповним перетворенням енергії. Запропоновано нову структуру автономної вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від автономного інвертора напруги.

Ключові слова: автономна вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, первинна вітротурбіна, вторинна вітротурбіна, асинхронний генератор із фазним ротором, автономний інвертор напруги.

Рис.: 2. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Вирішення проблем автономного енергозабезпечення в Україні останнім часом стає дедалі більш актуальним. Намітилася тенденція до підвищення потужності таких джерел автономного енергоживлення. Одним із первинних джерел енергії систем автономного енергоживлення є енергія вітру. З розвитком схемотехніки перетворювачів та їхньої елементної бази максимальна потужність автономних вітроенергетичних установок (ВЕУ) зросла з 50-150 кВт до 500-750 кВт [1]. У теперішній час проєктуються автономні ВЕУ для віддалених районів Карпат, для острова Зміїний, для великих фермерських господарств [2].

Постановка проблеми. При побудові автономних систем енергоживлення виникає завдання підвищити ефективність перетворення вітрової енергії в електричну в вітроенергетичних установках для максимально повного використання електричного та аеромеханічного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну у вітроенергетичних установках традиційно поділяється на два напрямки: покращення ефективності механічних процесів ВЕУ [3; 4] і зменшення втрат, встановленої потужності [5; 6] та вартості електричного обладнання [7]. Ефективність механічних процесів вдається поліпшити шляхом відмови від аеромеханічного регулювання та використанні безмультиплікаторних схем [3]. Зменшити втрати та встановлену потужність електричного обладнання вдається з використанням схем із неповним перетворенням енергії, при якому використовується асинхронний генератор із фазним ротором (АГФР) та перетворювач частоти (ПЧ) у роторному ланцюзі генератора на потужність ковзання [5]. Знизити вартість можливо використанням серійної асинхронної машини, наприклад кранового двигуна, при цьому відсутня потреба проведення дослідно-конструкторських робіт зі створення спеціальних електричних машин [8]. Додатково знизити вартість електрообладнання можна за відсутності додаткового компенсатора реактивної потужності АГФР. Це вдається при використанні в складі ПЧ автономного інвертора напруги (АІН) [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз показав, що при поєднанні всіх цих заходів можливе комплексне поліпшення показників автономної ВЕУ.

Метою статті є побудова структурної схеми автономної ВЕУ з покращеною ефективністю перетворення вітрової енергії в електричну та визначення функцій її обладнання.

Виклад основного матеріалу. У традиційних ВЕУ горизонтального типу узгодження невеликої кутової швидкості обертання вітротурбіни з високою швидкістю обертання вала генератора здійснюється за допомогою мультиплікатора (підвищуючого редуктора) [3]. Причина вибору різних швидкостей для турбіни та генератора пов'язана з такими обставинами [3]:

- швидкість вітротурбіни великої потужності доцільно знижувати, враховуючи, що вони мають великий діаметр, який призводить до погіршення показників міцності при великих швидкостях обертання;

- швидкість обертання вала генератора доцільно підвищувати для зниження його масогабаритних показників.

Проте вже давно дослідники шукають можливості побудови так званих безредукторних схем. Причини, за якими бажана відмова від мультиплікатора, такі:

- надійність мультиплікатора залишається на досить невисокому рівні (середнє напруження на відмову редуктора у 2,5-3 рази менше, ніж для генератора) [10];

- найбільше шумове випромінювання ВЕУ пов'язане з роботою мультиплікатора [11];

- мультиплікатор залишається таким пристроєм, який потребує періодичного технічного обслуговування. Наприклад, автори [12] отримали експериментальну інформацію, що мультиплікатор ВЕУ з потужністю 500-1000 кВт потребує заміну мастила через кожні 1,5-2 роки. Погіршення герметичності кожуха мультиплікатора призводить також до забруднювання навколишнього середовища.

Альтернативою використанню мультиплікатора є встановлення у ВЕУ тихохідних генераторів, зокрема синхронних із постійними магнітами. Однак цей шлях виглядає сумнівним: зменшення швидкості обертання генератора з 1500 об/хв до 50 об/хв призводить до збільшення маси електричної машини з 478 кг до 1520 кг, тобто, більше ніж у 3 рази, що не може вважатися прийнятним в умовах автономних ВЕУ [13].

У теперішній час перспективним можна вважати використання аеродинамічного мультиплікування (АДМ).

Перша пропозиція побудови ВЕУ з АДМ ще у 1924 році була висунута А. Г. Уфимцевим, коли їм було запропоновано «вітродвигун з аеродинамічною передачею» [14]. Розвинули цю ідею Н. В. Красовський і Б. А. Васильєв для вітроенергетичних установок із синхронним генератором [15].

У США Ульріхом Хуттером також було запропоновано подібну схему [16].

Надалі тема аеродинамічного мультиплікування з'являлася лише в поодиноких публікаціях, серед яких потрібно вказати [17]. У роботі надані можливі енергетичні характеристики системи. Треба згадати, що автор роботи показав характер залежності вихідної потужності від швидкості вітру, таким чином, вперше описав ефект автооптимізації.

Наприкінці 2002 р. у ПФГ «Конкорд» (м. Дніпро, Україна) команда під керівництвом М. С. Голубенка розпочала створення принципово нової високоефективної ВЕУ з АДМ ТГ-750 потужністю 750 кВт. Основні відмінні риси вітротурбіни для ВЕУ з АДМ захищені патентом України № 49970 за заявкою 2000031794 від 30.03.2003 р. [18].

Слід зазначити, що напрямок ВЕУ з АДМ на теперішній час у практичному плані розвивається тільки в Україні командою М. С. Голубенка [19], П. Д. Андрієнка і Д. Г. Алексієвського [20] та у Великій Британії [21].

Особливістю вітротурбіни з АДМ є розміщення генераторів із вторинними вітротурбінами невеликої потужності в гондолах на лопатях великої первинної вітротурбіни (рис. 1).

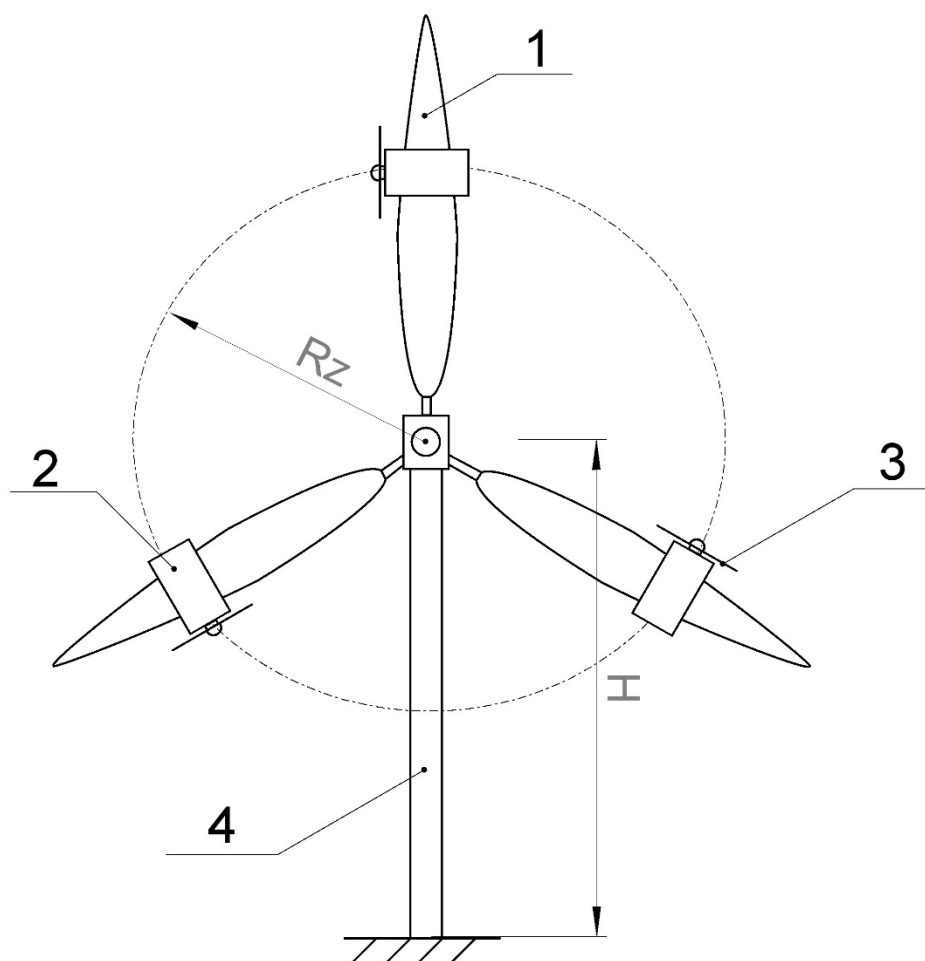


Рис. 1. Схема вітротурбіни з АДМ:

1 – лопаті первинної вітротурбіни; 2 – гондола з генератором та електрообладнанням; 3 – вторинні вітротурбіни; 4 – опора; R_z – радіус закріплення вторинної вітротурбіни; H – висота вісі первинної вітротурбіни

Джерело: розроблено автором.

Вітер, обметаючи лопаті первинної вітротурбіни, приводить її в рух. Первинна вітротурбіна є пасивною, тобто її вісь не підключено до генератора. Тангенціальна складова швидкості руху гондоли з вторинною вітротурбіною пропорційна радіусу її закріплення R_z . Таким чином, при швидкості обертання первинної вітротурбіни 16 об/хв (1,68 рад/с), та $R_z = 13$ м, тангенціальна швидкість руху вторинної вітротурбіни становитиме $1,68 \times 13 = 21$ м/с. Таким приблизно стане еквівалентна швидкість вітру для вторинної вітротурбіни. Очевидно, що в цьому випадку вторинна вітротурбіна може бути маленькою та обертатися зі швидкістю 400-600 об/хв і вище, що задовольнятиме вимогам для відмови від мультиплікатора. Отже, використання більш складної вітротурбіни дозволяє підвищити обороти на валу генераторів без наявності механічного мультиплікатора. Такий метод називають аеродинамічним мультиплікуванням [20].

У минулому ВЕУ з АДМ знаходили застосування лише в системних установках, але підвищення щодо вимог до потужності автономних ВЕУ відкриває можливість задіяти цей метод і в них.

Поєднавши переваги ВЕУ з АДМ з системами з неповним перетворенням енергії на базі АГФР, вдається поліпшити як механічні, так і електричні показники ВЕУ.

Для роботи АГФР необхідне джерело змінної напруги. Це може бути синхронний генератор, що приводиться в рух двигуном внутрішнього згоряння, або перетворювач на базі автономного інвертора. До такого джерела ставляться такі вимоги:

- забезпечення необхідної якості напруги в мережі (наприклад, відповідно до чинних стандартів);

- можливість роботи з несиметричним навантаженням;

- можливість компенсації реактивної потужності АГФР і навантаження.

Крім інших переваг, системам з АГФР властива можливість роботи як у надсинхронному, так і в підсинхронному режимах [6]. Недоліком є наявність в АГФР контактних кілець, що знижують надійність машини. Цей недолік може бути усунутий застосуванням машин безконтактних кілець, що призводить до погіршення масогабаритних показників машини.

У наш час електрообладнання ВЕУ з АГФР виконується за різними схемами [6; 9; 22], але в автономних ВЕУ простішим виявляється застосування перетворювачів із ланкою постійного струму й автономним інвертором [9].

За наявності автономного інвертора напруги проблема компенсації реактивної потужності й підтримки балансу активної вирішується автоматично, що зумовлено властивостями інвертора напруги. Такі властивості АІН дозволяють використовувати його як компенсатор реактивної потужності, джерела змінної напруги для формування мережі та статорного перетворювача одночасно. Недоліком цієї системи є наявність у ланці постійного струму значної високовольтної ємності, величина якої повинна бути обрана з урахуванням впливу навантаження і перетворювача в ланці постійного струму.

Слід зазначити, що при використанні некерованого роторного випрямляча неможлива робота в підсинхронному генераторному режимі [6], що знижує діапазон робочих швидкостей вітру (діапазон регулювання становить приблизно 2:1 [6]). Однак відомо [3], що при зменшенні швидкості вітру вдвічі потужність знижується у $2^3 = 8$ разів. Отже, глибше регулювання практично потрібно рідко.

Таким чином, підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну досягається за рахунок:

- підвищення ККД у механічному тракці за рахунок відмови від мультиплікатора;

- зниження витрат на періодичну заміну мастила в мультиплікаторі;

- підвищення ККД у ланцюгах керування генератором через меншу встановлену потужність перетворювача частоти;

- зниження вартості первинної вітротурбіни через відмову від зміни кута встановлення її лопатей;

- відсутність вимог щодо використання спеціального компенсатора реактивної потужності.

Додатково можливе зменшення вартості на розробку автономної системи, якщо використати серійний асинхронний двигун у генераторному режимі.

Запропоновану схему автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги представлено на рис. 2.

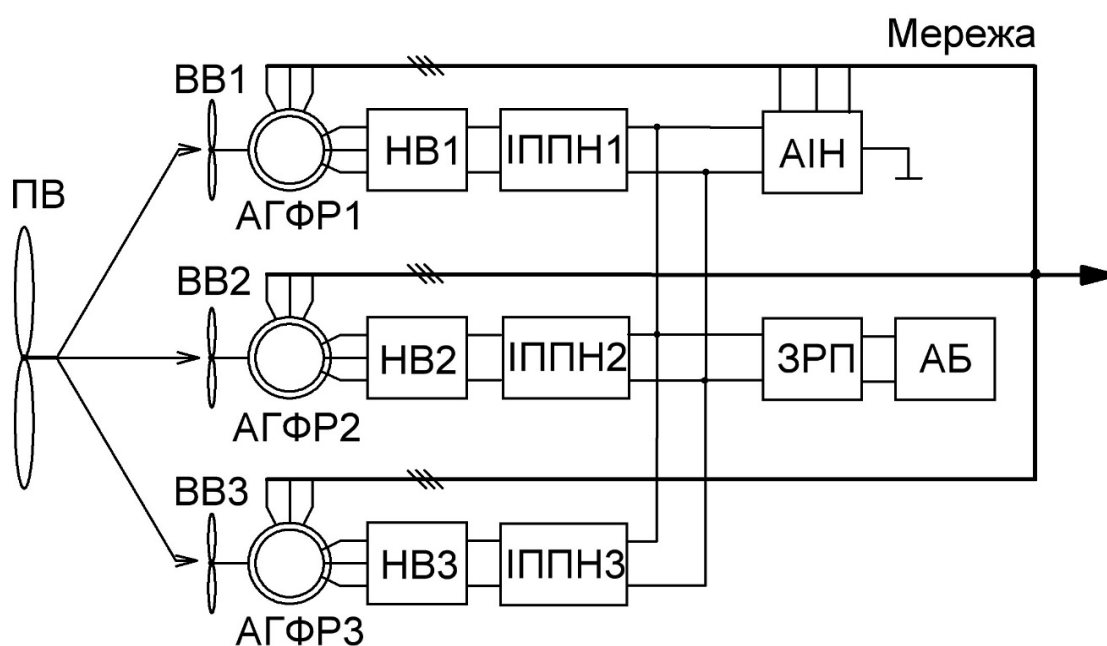


Рис. 2. Схема автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР

Джерело: розроблено автором.

Система працює таким чином. За наявності вітру первинна вітротурбіна ПВ із незмінним кутом встановлення лопатей створює вітровий потік для вторинних вітротурбін ВВ1...ВВ3, які обертають асинхронні генератори з фазним ротором АГФР1...АГФР3. Енергія знімається як з боку статора кожного генератора, так і з боку ротора (енергія ковзання) через індивідуальний некерований випрямляч НВ1...НВ3. Коли швидкість вітру перевищує номінальну, можливо зменшення моменту шляхом регулювання проти-ЕРС імпульсного перетворювача постійної напруги ІППН1...ІППН3, який є навантаженням некерованих випрямлячів. Енергія ковзання використовується також для підзарядки акумуляторної батареї АБ. Струм заряджання АБ формується зарядно-розрядним пристроєм ЗРП. При недостатній швидкості вітру, коли потужності, що генерується недостатньо, а також при пуску, здійснюється перехід на живлення від акумуляторної батареї. У цьому випадку ЗРП стабілізує напругу в ланцюзі постійного струму. У будь-якому разі формування мережі змінного струму та збудження генераторів відбувається автономним інвертором напруги АІН. Система керування повинна мати 3 канали: індивідуальне завдання моменту кожного АГФР шляхом зміни коефіцієнта заповнення ІППН, стабілізація напруги в ланцюгах постійного струму та формування струму заряджання для АБ шляхом зміни коефіцієнта заповнення ЗРП та формування та стабілізацію змінної напруги мережі шляхом широтно-імпульсної модуляції в АІН.

Система має високу гнучкість, бо дозволяє використовувати підключення інших джерел енергії, наприклад, сонячної батареї або дизель-генератора.

Вимогою незалежної роботи кожного ІППН повинно бути їх стабільна проти-ЕРС, яку формує ЗРП.

До автономних інверторів, призначених до створення автономних ВЕУ на базі АГФР, ставлять такі вимоги:

- 1) забезпечення необхідної якості змінної напруги (коефіцієнт гармонік у номінальному режимі не більше ніж 5 % [23]);
- 2) можливість роботи з несиметричним навантаженням та навантаженням, здатним змінюватися в широких межах [23];

- 3) компенсація реактивної потужності навантаження та АГФР;
- 4) добрі масогабаритні показники.

Через свою зворотність [22] АІН дозволяє передавати енергію як від ланки постійного струму в навантаження, так і у зворотному напрямку, що має місце при надлишку потужності, що генерується, або рекуперативному навантаженні. Отже, вирішується проблема підтримки активної потужності системі, коли її надлишок запасється в АБ.

У науково-дослідній лабораторії «Промислова електроніка» Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету проводиться подальша робота зі створення математичних моделей автономних ВЕУ з АДМ та створення методики їх розрахунку. Детальний аналіз потоків енергії та моделювання роботи автономної ВЕУ - тема наступних публікацій.

Висновки. У статті проведено аналіз можливих методів підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну в автономних ВЕУ. Запропоновано структуру автономної ВЕУ з АДМ, яка відповідає поставленій меті. Покращення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну вдасться досягти шляхом підвищення ККД у механічному обладнанні через вилучення мультиплікатора та використання для керування режимом ВЕУ ПЧ з неповним перетворенням енергії. Регулювання моменту на валу генератора здійснюється в ланцюгу його ротора імпульсним перетворювачем, а формування мережі відбувається від автономного інвертора напруги. Наявність акумулюючої батареї та інвертора напруги надає всієї системі рис джерела безперервного живлення. Через те, що така структура ВЕУ запропонована вперше, автор направив на розгляд заявку на корисну модель.

Список використаних джерел

1. Rahman, M. M. A. Decentralized wind-PV-diesel based hybrid power generation / M. M. Atiqur Rahman, Ali T. Al Awami // In 2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, ICEEICT 2015. – Article 7307472. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307472>.
2. Вітроенергетичний сектор України. Огляд ринку [Електронний ресурс] / Г. Шмідт, А. Конеченков, М. Грицишина, М. Сисоєв, К. Книш, М. Савчук; за заг. ред. канд. техн. наук І. В. Плачкова, А. Є. Конеченкова. – Режим доступу: https://uwea.com.ua/uploads/reviews/uwea_2019_ua_preview.pdf.
3. Patel, M.R. Wind and solar power systems / M. R. Patel. – CRC Press, Boca Raton, 1999. – 283 p.
4. Sorensen J.D. Wind Energy Systems – Optimization Design and Construction for Safe and Reliable Operation / John Dalsgaard Sørensen, Jens N Sørensen. – 1st editions. – Woodhead Publishing Limited. Sawston, Cambridge, UK, 2011. – 616 p.
5. Iov, F. Analysis of a Variable-Speed Wind Energy Conversion Scheme with Doubly Fed Induction Generator / F. Iov, F. Blaabjerg, A. D. Hansen // International Journal in Electronics. – 2003. – Vol. 90. – №. 11-12. – Pp. 779-794.
6. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation / G. Abadi, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski. – 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, – 2011.
7. Перминов, Ю. Н. Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок / Ю. Н. Перминов, Е. А. Монахов // *Відновлювана енергетика*. – 2019. – № 2. – С. 54-60. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
8. Об использовании крановых асинхронных двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ / А. В. Переверзев, Д. Г. Алексеевский, В. В. Семенов, А. Н. Буров, Г. Н. Стрункин, А. В. Таранец // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2008. – № 1. – С. 20-23.
9. Патент на корисну модель №26494 Україна, МПК H02K 17/34 (2007.01). Автономна вітроелектрогенеруюча система / Д. Г. Алексієвський, О. М. Буров, К. І. Веселов, Н. А. Омельчук, А. В. Переверзев, В. В. Семенов, Г. М. Стрункін, А. В. Таранець. – Заявлено 11.05.2007; Опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15.

10. Caichao Z. Reliability Analysis of Wind Turbines / Zhu Caichao, Yao Li // Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines. – Australia, 2018. – Pp. 169-186. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74859>.
11. Pohl, J. Understanding stress effects of wind turbine noise – the integrated approach / J. Pohl, J. Gabriel, G. Hübner // Energy Policy. – 2018. – Vol. 112. – Pp. 119-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
12. Ranjan, R. Experimental and statistical analysis of wear on gear material / R. Ranjan, S. Kumar, SK. Ghosh, M. Kumar // Lubrication Science. – 2023. – Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1002/ls.1650>.
13. Wu, W. A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines / W. Wu, V.S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129). – Rome, Italy, 2000. –Vol. 1. – Pp. 147-154. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049>.
14. Патент СССР №1457, Класс 88-с. Ветроэлектрический генератор / А. Г. Уфимцев. – Заявл. 14.01.1924; опубл. 31.07.1926.
15. Красовский, Н. В. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100-3.000 кв / Н. В. Красовский // Известия ОГИН. – 1939. – № 5. – 15 с.
16. Патент на винахід US4197056, МПК F03D 1/00, F03D 11/04. Wind-driven power plant / Ulrich Hutter; заявник і патентовласник Ulrich Hutter. – US 05/935558, заявл. 21.08.1978; опубл. 08.04.1980.
17. Патент на винахід EP 1 390 615, МПК F03D 1/02, F03D 11/00. WIND TURBINE HAVING SECONDARY ROTORS / Helge Aagaard Madsen, Flemming Rasmussen; заявник і патентовласник Technical University of Denmark 2800 Lyngby (DK). – 02735087.5, заявл. 29.11.1990; опубл. 30.08.2008. Бюл. № 18.
18. Патент на винахід UA49970, МПК F03D 1/00. Вітродвигун / М. С. Голубенко, О. Л. Кадацький, В. С. Легеза, В. О. Циганов, С. І. Лось, Г. В. Гальмаков; заявник і патентовласник Державне конструкторське бюро 255 «Південне» ім. М. К. Янгеля. – № 2000031794, заявл. 30.03.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
19. Голубенко, Н. С. Ветровая электрическая турбогенераторная установка ТГ-750 / Н. С. Голубенко, В. Е. Олишевская, С. Д. Курдюков, Г. С. Олишевский, С. С. Курдюков // Наука та інновації. – 2008. – Т. 4, № 6. – С. 71-77. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin4.06.071>.
20. Алексієвський, Д. Г. Синтез електромеханічних систем вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням: дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Алексієвський Дмитро Геннадійович ; Запорізький національний університет. – Запоріжжя, 2020. – 331 с.
21. Morgan, L. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off / L. Morgan, W. Leithead, J. Carroll // Wind Energy. – 2024. – № 27(6). – С. 569-582. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.2901>.
22. Стрункін, Г. М. Застосування пристроїв силової електроніки / Г. М. Стрункін. – Дніпро : Середняк Т. К., 2024. – 407 с.
23. ДСТУ ІЕС 62040-3:2004. Агрегати безперебійного живлення. Частина 3. Загальні технічні вимоги. Методи випробовування. – Чинний від 2025-01-01. – Вид. офіц.

References

1. Rahman, M. M. A., & Al Awami, A. T. (2015). Decentralized wind-PV-diesel based hybrid power generation. In 2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEICT 2015 Article 7307472 (2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEICT 2015). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307472>.
2. Plachkov, I.V., Konechenkova, A. Ye. (2019). Vitroenerhetychnyi sektor Ukrainy. Ohliad rynku [Wind energy sector of Ukraine. Market overview]. https://uwea.com.ua/uploads/reviews/uwea_2019_ua_preview.pdf.
3. Patel, M.R. (1999). *Wind and solar power systems*. CRC Press, Boca Raton.
4. Sorensen, J.D., Sorensen, J.N. (2011). *Wind Energy Systems – Optimization Design and Construction for Safe and Reliable Operation*. Woodhead Publishing Limited. Sawston, Cambridge, UK.

5. Iov, F., Blaabjerg, F., Hansen, A.D. (2003). Analysis of a Variable-Speed Wind Energy Conversion Scheme with Doubly Fed Induction Generator. *International Journal in Electronics, Taylor & Francis Ltd*, 90(11-12), 779-794.
6. Abadi, G., Lopez, J., Rodriguez, M., Marroyo, L., Iwanski, G. (2011). *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA.
7. Perymynov, Y., & Monakhov, E. (2019). Sravnenie variantov konstruktsii sinkhronnykh generatorov s vobuzhdeniem ot postoiannykh magnitov dlia vetroustanovok [Design comparison of synchronous permanent magnet generator for wind turbines]. *Vidnovluyana Energetika – Renewable energy*, (2(57), 54-60. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
8. Pereverzev, A.V., Alekseevsky, D.G., Semenov, V.V., Burov, A.N., Strunkin, G.N., Taranets, A.V. (2008). Ob ispolzovanii kranovykh asinkhronnykh dvigatelei v kachestve generatorov dlia avtonomnykh VEU [On the use of crane induction motors as generators for autonomous WPP]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka – Electrical engineering and electrical energy*, (1), 20-23.
9. Aleksievskiy D.G., Burov O.M., Veselov K.I., Omelchuk N.A., Pereverzev A.V., Semenov V.V., Strunkin H.M., Taranets A.V. (2007). Avtonomna vitroelektroheneruiucha systema [Autonomous wind power generating system]. Utility model patent No. 26494 Ukraine, IPC N02K 17/34 (2007.01).
10. Zhu, Cai-chao and Yao Li. “Reliability Analysis of Wind Turbines.” *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines* (2018): n. pag. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74859>.
11. Pohl, J., Gabriel, J., Hübner, G. (2018). Understanding stress effects of wind turbine noise – the integrated approach. *Energy Policy*, 112, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
12. Ranjan, R., Kumar, S., Ghosh, S.K., Kumar, M. (2023). Experimental and statistical analysis of wear on gear material. *Lubrication Science*. 1-11. <https://doi.org/10.1002/ls.1650>.
13. Wu, W., Ramsden, V.S., Crawford, T., Hill, G. (2000). A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines. *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy* (Cat. No.00CH37129), Rome, Italy, pp. 147-154 vol. 1. <https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049>.
14. Ufimtsev, A.G. (1926). Vetroelektricheskii generator [Wind-powered generator]. USSR Patent No. 1457, Class 88-c.
15. Krasovsky, N.V. (1939). Skhema vetrianoho dvyhatelia s aerodynamicheskoi peredachei dlia moshchnosti 100-3.000 kv [Wind turbine diagram with aerodynamic transmission for capacities of 100-3,000 kW]. *Izvestia OGIN*. (5).
16. Ulrich Hutter. (1980). *Wind-driven power plant*. Patent US4197056, MIIK F03D 1/00, F03D 11/04.
17. Patent EP 1 390 615, MIIK F03D 1/02, F03D 11/00. WIND TURBINE HAVING SECONDARY ROTORS / Helge Aagaard Madsen, Flemming Rasmussen; Technical University of Denmark 2800 Lyngby (DK).
18. Golubenko M.S., Kadatskiy O.L., Legeza V.S., Tsyganov V.O., Los S.I., Halmakov G.V. (2002). Patent for the invention UA49970, IPC F03D 1/00. Wind engine.
19. Golubenko M.S., Olishevskaya V.E., Kurdyukov S.D., Olishevskiy G.S., Kurdyukov S.S. (2008). Vetrovaia elektrycheskaia turbohenera-tornaia ustanovka TH-750 [Wind electric turbo-generator TG-750]. *Science and innovation*, (6), 71-77. <https://doi.org/10.15407/scin4.06.071>.
20. Alekseevskiy, D.G. (2020). *SynteZ elektromekhanichnykh system vitroenerhetychnykh ustanovok z aerodynamichnym multiplykuvanniam [Synthesis of wind power plants elec-tromechanical systems with aerodynamic multiplication]* [Doctor dissertation].
21. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. (2024). On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. *Wind Energy*, 27(6), 569-582. <https://doi.org/10.1002/we.2901>.
22. Strunkin, H.M. (2024). *Zastosuvannia prystroiv sylovoi elektroniky [Application of power electronics devices]*. Serednyak T. K.
23. DSTU IES 62040-3:2004. Ahrehaty bezperebiinoho zhyvlennia. Chastyna 3. Zahalni tekhnichni vymohy. Metody vyprovovuvannia [IEC 62040-3:1997 Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements].

Отримано 23.10.2024

Hlib Strunkin

senior researcher of the research laboratory "Industrial Electronics"
Engineering Institute of Zaporizhzhia National University.

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0009-1719-4132)

AUTONOMOUS WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION BASED ON ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR WITH EXCITATION FROM A VOLTAGE-SOURCE INVERTER

The article analyzes the methods of increasing the efficiency of converting wind energy into electricity in wind power plants. It is noted that there are both aero-mechanical and electrical methods of increasing the efficiency of converting wind energy into electricity. Multiplierless schemes that allow to increase the efficiency of aero-mechanical conversion of wind energy are considered. These include the use of low-speed generators and aerodynamic multiplication. Aerodynamic multiplication is considered promising and more acceptable for high-power autonomous wind power plants, considering that low-speed generators have poor mass-dimensional indicators. Historical information on the development of systems with aerodynamic multiplication is given. Similar systems are currently being developed only in Ukraine, where the experimental operation and implementation of the TG-750 industrial model have been carried out, and in the United Kingdom. The perspective of using systems with incomplete energy conversion has been revealed. The improvement of indicators is determined by the use of a slip power converter of an asynchronous generator with a phase rotor and a voltage-source inverter. A new structure of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter is proposed. Information on the operation of the system is provided. The use of a voltage-source inverter allows you to abandon an additional source of alternating voltage for an asynchronous generator with a phase rotor and provide the system with the features of an uninterrupted power source. The considered structure of the autonomous wind power plant is presented in the utility model application.

Keywords: autonomous wind power plant; aerodynamic multiplication; primary wind turbine; secondary wind turbine asynchronous generator with a phase rotor; voltage-source inverter.

Fig.: 2. References: 23.