

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-49-55>

УДК 621.311.24+621.313.332

ОЦІНЮВАННЯ МАСИ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Стрункін Г.М.

EVALUATION OF THE MASS OF THE MAIN EQUIPMENT OF A WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION BASED ON AN ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR

Strunkin H.M.

У статті вказано відомості про національні плани України щодо розвитку енергетики та вітроенергетики до 2030 року. Наводяться історичні відомості про дослідження вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. Подано аналітичний огляд новітніх досліджень вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням, започаткованих українськими вченими. Вказано про перспективність використання електрообладнання таких установок на базі асинхронного генератора з фазним ротором та перетворювачем частоти на потужність ковзання, що мають кращі масогабаритні показники. Наведено відомості про роботу вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. Описано структурну схему електрообладнання для керування потужністю асинхронного генератора з фазним ротором та наведено короткі відомості про її функціонування. З використанням перетворювача частоти можливо відмовитися від регулювання кута встановлення лопатей первинної вітротурбіни. Існуючий ринок асинхронних машин з фазним ротором обмежено крановими двигунами, які мають великий струм намагнічування та працюють у повторно-короткочасному режимі. Знизити струм намагнічування можливо зменшенням напруги статора двигуна, що, з іншого боку, приводить до підвищення струму ротора. В попередніх публікаціях проведена оптимізація напруги статора, при якій струм ротора не перевищує номінальне значення у тривалому режимі. Для узгодження оптимального значення напруги статора генератора з номінальною напругою навантаження необхідне встановлення вольтододавального автотрансформатора. Проведено розрахунки

сумарної маси трьох асинхронних генераторів з фазним ротором та вольтододавального автотрансформатора для всієї серії кранових двигунів при використанні їх в вітроенергетичних установках з аеродинамічним мультиплікуванням. Порівняння загальної маси електрообладнання на базі асинхронного генератора з фазним ротором з масою синхронних генераторів, які використовувалися до сьогодні, показали їх перевагу. При використанні серійних асинхронних машин вдається покращити масу обладнання, що розташовано на лопатях первинної вітротурбіни, майже в 2 рази.

Ключові слова: асинхронний генератор з фазним ротором, вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, крановий двигун у генераторному режимі, тривала робота, вольтододавальний автотрансформатор, маса обладнання.

Вступ. Вітроенергетика України займає в ухваленому 13.08.2024р. Кабінетом міністрів України розпорядженні про затвердження «Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» [1] найвищий пріоритет. Додатково, згідно із ухваленим 25.06.2024р. Кабінетом міністрів України «Національним планом з енергетики та клімату на період до 2030р.» частка енергії відновлювальних джерел к 2030р. повинна становити 27% [2]. Означені національні плани підкреслюють важливість досліджень та

впровадження нових типів вітроенергетичних установок (ВЕУ).

Історично на теренах України вперше було запропоновано та побудовано новий тип ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням (АДМ), які дозволяють відмовитися від використання механічного редуктора. Користуючись теоретичними напрацюваннями Уфимцева А.Г. [3], Красовський Н.В. побудував першу в світі установку, в якій для узгодження обертового руху вітротурбіни та генератора використовувалося розміщення маленьких вітротурбін на лопатях великої [4]. На той час рівень техніки не дозволяв виготовляти лопаті великої міцності, тому ідея на довгий час була забута. Крім поодиноких патентів у Німеччині та США, ідея не знаходила використання. Але 2002р. командою Голубенка М.С. (фірма «Конкорд», Дніпро) було запатентовано [5], спроектовано та побудовано дослідний зразок ВЕУ з АДМ ТГ-750 потужністю 750 кВт [6].

Відтоді почалися теоретичні дослідження вітроенергетичних установок цього типу. В сьогоденні основна частина досліджень досі виконується в Україні: Голубенком М.С. було розроблено більш потужні установки [7]; Миргородом В.Ф. та Алексієвським Д.Г. [8, 9] – започатковано та розвинуто створення математичних моделей ВЕУ з АДМ; Андрієнком П.Д. започатковано новий напрямок керування потужністю таких установок за допомогою перетворювачей частоти [10, 11]; автором у попередніх публікаціях [12, 13] започатковано вивчення поведінки ВЕУ з АДМ у автономних режимах. З інших країн треба зазначити роботи команди Morgan L. (Глазго, Велика Британія) по застосуванню аеродинамічного мультиплікування в офшорній енергетиці [14, 15].

Перспективним є використання в ВЕУ з АДМ асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР) через добрі масогабаритні показники та меншу потужність необхідного перетворювача частоти для його керування [16, 17]. Зважаючи на те, що в ВЕУ з АДМ використовуються 3 або більше машини одночасно, залишається неосвітленим питання маси основного обладнання таких систем.

Метою роботи є аналіз основного обладнання вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням за масою, враховуючи оптимальне значення напруги статора асинхронного генератора з фазним ротором.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вітротурбіна з АДМ являє собою великий вітровий ротор 1 (первинна вітротурбіна), на лопатях якого розміщено гондоли 2 з розташованими в них генераторами (рис. 1). На вісях генераторів закріплено маленькі швидкохідні вторинні вітротурбіни 3.

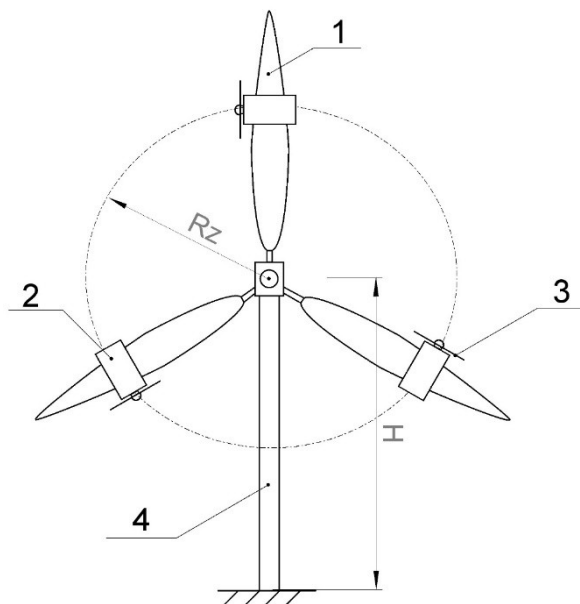


Рис. 1. Схема вітротурбіни з АДМ

Первинна вітротурбіна не має свого генератора, а закріплена своєю віссю на опорі 4. Під дією вітру (первинного вітрового потоку) первинна вітротурбіна обертається та створює для гондоли з вторинною вітротурбіною вторинний вітровий потік, який пропорційний радіусу її закріплення R_z . Таким чином, при швидкості обертання первинної вітротурбіни 16 об/хв ($1,68 \text{ рад}^{-1}$), та $R_z=13 \text{ м}$, вторинний вітровий потік становитиме $1,68 \times 13 = 21 \text{ м/с}$. Завдяки цьому вторинна вітротурбіна може бути маленькою та обертатися зі швидкістю 400-600 об/хв і вище, що задовольнятиме вимогам для відмови від механічного мультиплікатора. Таким чином, використання більш складної вітротурбіни дозволяє підвищити обороти на валу генераторів без наявності механічного мультиплікатора. Такий метод називають аеродинамічним мультиплікуванням [18].

Більшість вищеперерахованих дослідників концентрували свої зусилля по вивченню поведінки ВЕУ з АДМ у сполученні з синхронним генератором. Це й не дивно, враховуючи, що такий тип електричної машини дозволяє обійтися без перетворювача частоти, а керування потужністю здійснювати зміною кута

встановлення лопаті первинної вітротурбіни. В дослідженнях Андрієнка П.Д. використано перетворювач на повну потужність для збільшення діапазону робочих швидкостей вітру. Але відомо [16, 17], що асинхронні машини мають найкращі показники за масогабаритними показниками. У зв'язку з цим автором у якості автономних ВЕУ з АДМ запропоновано побудову вітроенергетичної установки на базі асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР), структурна схема якої зображена на рис. 2 [19].

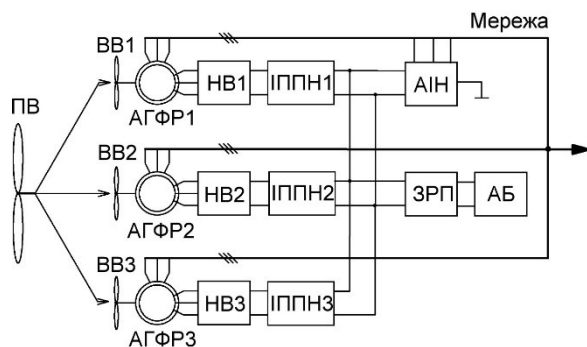


Рис. 2. Схема автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР

На рис. 2 прийнято наступні позначення: ПВ – первинна вітротурбіна; ВВ1...ВВ3 – вторинні вітротурбіни; АГФР1...АГФР3 – асинхронні генератори з фазним ротором, на вісі яких знаходяться вторинні вітротурбіни; НВ1...НВ3 – некеровані випрямлячі в роторних ланцюгах генераторів; ІППН1...ІППН3 – імпульсні перетворювачі постійної напруги; АІН – автономний інвертор напруги з нульовим проводом; ЗРП – зарядно-розрядний пристрій; АБ – акумуляторна батарея.

Регулювання потужності ВЕУ здійснюється шляхом зміни проти-ЕРС ІППН. Напруга в ланцюгу постійного струму стабілізується зарядно-розрядним пристроєм. Інвертор напруги формує напругу та компенсує реактивну потужність генератора. Через те, що в автономній системі навантаження по фазам може бути суттєво несиметричним, інвертор виконано по чотирьохпроводній схемі. Через це зручно при аналізі та розрахунку системи використовувати фазні значення напруги інвертора та генератора. Акумуляторна батарея необхідна для підтримання балансу потужності при недостатній генерації, або при малому навантаженні. Використання первинної вітротурбіни з незмінним кутом встановлення

лопатей та перетворювача частоти на потужність ковзання призводить до покращення масогабаритних показників та надійності всієї системи.

Асортимент асинхронних машин з фазним ротором в діапазоні потужностей 1-160 кВт вичерпується крановими двигунами [20]. Роботу кранового двигуна в генераторному режимі досліджено в роботах [21, 22], де проведено оптимізацію статорної напруги. Особливістю кранових асинхронних двигунів з фазним ротором є великий струм намагнічування та їх робота у повторно-короткочасному режимі з ПВ=40%. Як показано в [22], для їх роботи у тривалому генераторному режимі потрібно знизити напругу статора, що призведе до перерозподілу активної складової струму статора. З іншого боку, при зниженні напруги статора підвищується значення струму ротора. В [22] було оптимізовано значення статорної напруги, при якій струм ротора не перевищував номінального. Для кранових асинхронних двигунів серій МТН і МТФ фазне значення напруги склало 192 В. При цьому потужність, що генерується, для цих двигунів за значенням була вищою, ніж у режимі двигуна.

Для узгодження напруги на статорі U_1 з номінальною напругою навантаження $U_{1ном}$ 220 В можна використовувати вольтододавальний автотрансформатор, встановлена потужність якого пропорційна відхиленню напруги на статорі від його номінального значення та струму навантаження I_H :

$$S_T = 3 \cdot (U_{1ном} - U_1) I_H.$$

Вважаючи, що в ВЕУ з АДМ 3 генератори, режим яких приблизно однаковий, а збудження здійснюється від одного інвертора, зручно використовувати один вольтододавальний автотрансформатор.

Зважаючи на потребу встановлення додаткового пристрою, цікавим є оцінювання загальної маси основного обладнання ВЕУ – трьох генераторів та автотрансформатора на потрібну відносно (1) потужність.

Маси генераторів взято з довідника [23], а для оцінювання маси автотрансформатора можна скористуватися довідковими даними заводу-виготівителя [24] для трансформаторів типового ряду. Результати розрахунків зведено до Таблиці.

Таблиця

Результати розрахунку маси електрообладнання ВЕУ з АДМ

Рдв, кВт	Рген, кВт	Ртр, кВА	Ртр сум, кВА	Рсерійн.тр, кВА	Мтр, кг	Мдв, кг	Мдв сум., кг	Мсумм, кг
1,4	2,24	0,285	0,855	1	11,5	51	153	164,5
2,2	3,52	0,448	1,344	1,6	28,3	58	174	202,3
3,5	5,6	0,712	2,138	2,5	41	76	228	269
5	8	1,018	3,054	4	47	88	264	311
7,5	12	1,527	4,581	6,3	75	120	360	435
11	17,6	2,24	6,72	7,5	80	170	510	590
16	25,6	3,258	9,774	10	95	210	630	725
22	35,2	4,48	13,44	14	120	280	840	960
30	48	6,109	18,327	25	165	345	1035	1200
30	48	6,109	18,327	25	165	460	1380	1545
40	64	8,145	24,436	25	165	560	1680	1845
45	72	9,163	27,49	32	182	860	2580	2762
60	96	12,218	36,654	40	215	10120	30360	30575
80	128	16,29	48,872	63	310	1180	3540	3850
100	160	20,363	61,09	63	310	1550	4650	4960
125	200	25,454	76,363	80	410	1700	5100	5510
160	256	32,581	97,745	100	500	1900	5700	6200

В таблиці прийнято позначення: Рдв – потужність серійного двигуна, Рген – потужність серійного двигуна у генераторному режимі; Ртр – необхідна потужність вольтододавального автотрансформатора при оптимальній напрузі статора двигуна; Ртр сум – сумарна потужність автотрансформатора для трьох двигунів; Рсерійн.тр. – потужність серійного трансформатора зі стандартного ряду; Мтр – маса серійного трансформатора; Мдв – маса двигуна; Мдв. сум. – маса трьох двигунів; Мсум. – сумарна маса електрообладнання.

Таким чином, отримано значення маси обладнання при використанні існуючої серії кранових двигунів у якості генераторів для ВЕУ з АДМ.

Порівнюючи АГФР МТН-713-10, який здатен віддати 256 кВт та має масу 1900 кг з встановленим на ТГ-750 індукторним синхронним генератором СГІ-250-16 УХЛ1 потужністю 250 кВт та масою 3550 кг [25], можна зазначити суттєвий виграв за масою трьох двигунів МТН-713-10 навіть з встановленням вольтододавального автотрансформатору 100 кВА з масою 500 кг. Повна маса електрообладнання при використанні АГФР становитиме 6200 кг, в той

час, як маса трьох синхронних генераторів складає 10650 кг. Безпосередньо на лопатях первинної вітротурбіни необхідно встановити лише асинхронні генератори масою 5700 кг, а автотрансформатор може бути винесено в контейнер ВЕУ. Тобто маса генераторів при використанні АГФР зменшується майже вдвічі.

Висновки. Розрахунки маси основного обладнання ВЕУ з АДМ підтвердили перспективність застосування асинхронного генератора з фазним ротором. Зважаючи на відсутність спеціалізованих асинхронних генераторів середньої потужності, використання кранових електродвигунів виявляється цілком доречним при умові зменшення їх статорної напруги. Для узгодження напруги статора АГФР з номінальним значенням напруги навантаження можливе використання вольтододавального автотрансформатора. Розраховано масу обладнання для існуючої серії кранових двигунів при використанні їх у якості генератора для ВЕУ з АДМ. Порівняння за масою асинхронного генератора з фазним ротором і автотрансформатором з існуючим типом синхронного генератора підтверджує кращі показники ВЕУ на базі АГФР.

Література

1. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>. (Дата звернення 18.03.2025).
2. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku> (дата звернення 17.03.2025).
3. Патент СССР №1457, Класс 88-с. Ветроэлектрический генератор / А.Г. Уфимцев. заявл. 14.01.1924; опубл. 31.07.1926.
4. Красовский Н.В. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100-3.000 кв / Н.В. Красовский // Известия ОГИН. Москва. Ан СССР. 1939. №5: 15.
5. Патент на винахід UA49970, МПК F03D 1/00. Вітродвигун / М.С. Голубенко, О.Л. Кадацький, В.С. Легеца, 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.
6. 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. 4, №6: 71-77. 10.15407/scin.4.06.071.
7. Голубенко Н.С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Голубенко Н.С., Довгалюк С.М., Фельдман А.М., Цыганов В.А. // Нетрадиционная энергетика XXI века: Материалы IV международной конференции (Крым, Гурзуф, 2003). 2003: 68-74.
8. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С., Голубенко Н.С. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2006. № 4(30). С. 96–99.
9. Alekseevskiy, Dmitriy, *et al.* "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, 10.15587/1729-4061.2018.150483.
10. Андриенко П.Д. Повышение единичной мощности и эффективности ВЭУ с аэродинамической мультипликацией / П. Д. Андриенко, В. П. Метельская, И. Ю. Немудрый // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: проблемы автоматизированного электропривода. Харьков: НТУ "ХПИ". 2013. № 36 (1009): С. 394-395.
11. Andrienko P. & Alekseevskiy, D.G. & Blyzniakov, O.V. & Nemykina, O. & Nemudriy, I.Yu. Efficiency analysis of electromechanical conversion systems of wind turbines with aerodynamic multiplication. Tekhnichna Elektrodynamika. 2023: 44-53. 10.15407/techned2023.06.044.
12. Strunkin, H. Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. Technologies and Engineering, 2024. 25(6): 69-79. 10.30857/2786-5371.2024.6.7.
13. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," Turk J Electr Power Energy Syst., Published online January 27, 2025. 10.5152/tepes.2025.24034.
14. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, Journal of Physics: Conference Series, 2257. 10.1088/1742-6596/2257/1/012001, 2022.
15. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. Wind Energy, 2024. 27(6): 569-582. 10.1002/we.2901.
16. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.
17. Стрункін Г.М. Застосування пристроїв силової електроніки. Дніпро. Середняк Т. К., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9.
18. Алексієвський Д.Г. Синтез електромеханічних систем вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. – Дис. ... доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» Запорізький національний університет, Запоріжжя, 2020: 331.
19. Стрункін, Г. Автономна вітроенергетична установка з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від інвертора напруги. Технічні науки та технології, 2024. 4 (38): 245–253. 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253.
20. Отраслевой портал, посвященный рынку электродвигателей. – URL: <http://dvigatel.info>, (дата звернення 12.06.2023).
21. Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Шуруб Ю.В., Джуря А.В. Габаритная мощность асинхронной машины в генераторном режиме работы. / Техническая электродинамика. 2004. №2: 32-35.
22. Переверзев А.В., Алексеевский Д.Г., Семенов В.В., Буров А.Н., Стрункин Г.Н., Таранец А.В. Об использовании крановых асинхронных

- двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ. / Электротехника та електроенергетика. 2008. №1: 20-23.
23. Краново-металлургические электродвигатели / Баталов Н. М., Белый В. А., Иоффе А. Б. и др. М.: Энергия, 1967: 238.
 24. Трансформатори ТСП та ТСП 1. Каталог ЗВП «НЕОН» УТОГ. URL: <https://www.neonzpp.com.ua/ua/docs/tsp.pdf> (дата звернення 10.05.2024).
 25. Индукторные машины. Технический каталог НП ЗАО «Электромаш». URL: https://zzem.com.ua/img/UserFiles/inductor_machines.pdf (дата звернення 10.05.2024).
- ### References
1. Pro zatverdzhennya Nacionalnogo planu dij z vidnovlyuvanoi energetiki na period do 2030 roku ta planu zahodiv z jogo vikonannya. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>. (accessed 03/18/2025).
 2. Nacionalnij plan z energetiki ta klimatu na period do 2030 roku. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku>. (accessed 17.03.2025).
 3. Patent SSSR №1457, Klass 88-s. Vetroelektricheskij generator / A.G. Ufimcev. zayavl. 14.01.1924; opubl. 31.07.1926.
 4. Krasovskij N.V. Shema vetryanogo dvigatelya s aerodinamicheskoy peredachej dlya moshnostej 100-3.000 kv / N.V. Krasovskij // Izvestiya OGIN. Moskva. An SSSR. 1939. №5: 15.
 5. Patent na vinahid UA49970, MPK F03D 1/00. Vitrodvigun / M.S. Golubenko, O.L. Kadac-kij, V.S. Legeza, V.O. Ciganov, S.I. Los, G.V. Galmakov; zayavnik i patentovlasnik Derzhavne konstruktorske byuro 255 «Pivdenne» im. M.K. Yangelya. № 2000031794, zayavl. 30.03.2002; opubl. 15.10.2002, Byul. № 10.
 6. Golubenko N.S. Vetrovaya elektricheskaya turbogenera-tornaya ustanovka TG-750 / N.S. Golubenko, V.E. Olishevskaya, S.D. Kurdyukov, G.S. Olishevskij, S.S. Kurdyukov // Nauka ta innovaciyi. 2008. 4, №6: 71-77. 10.15407/scin4.06.071.
 7. Golubenko N.S. Tendencii razvitiya vetroenergetiki i bezmultiplikatornye vetrovye ustanovki / Golubenko N.S., Dovgalyuk S.M., Feldman A.M., Cyganov V.A. // Netradici-onnaya energetika HHI veka: Materialy IV me-zhdunarodnoj konferencii (Krym, Gurzuf, 2003). 2003: 68-74.
 8. Mirgorod V.F., Ranchenko G.S., Golubenko N.S. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov vetroenergeticheskoy ustanovki bolshoj mo-shnosti. Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnolo-giya. 2006. № 4(30). S. 96–99..
 9. Alekseevskiy, Dmitriy, *et al.* "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, 10.15587/1729-4061.2018.150483.
 10. Andrienko P.D. Povyshenie edinichnoj mo-shnosti i effektivnosti VEU s aerodinami-cheskoy multiplikaciej/P. D. Andrienko, V. P. Metelskaya, I. Yu. Nemudryj // Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: problemy avtomatizirovannogo elekt-roprivoda. Harkov: NTU "HPI". 2013. № 36 (1009): S. 394-395.
 11. Andrienko P. & Alekseevskiy, D.G. & Blyzniakov, O.V. & Nemykina, O. & Nemudryi, I.Yu. Efficiency analysis of electromechanical conversion systems of wind turbines with aerodynamic multiplication. Tekhnichna Elektrodynamika. 2023: 44-53. 10.15407/techned2023.06.044.
 12. Strunkin, H. Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. Technologies and Engineering, 2024. 25(6): 69-79. 10.30857/2786-5371.2024.6.7.
 13. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," Turk J Electr Power Energy Syst., Published online January 27, 2025. 10.5152/tepes.2025.24034.
 14. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, Journal of Physics: Conference Series, 2257. 10.1088/1742-6596/2257/1/012001, 2022.
 15. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. Wind Energy, 2024. 27(6): 569-582. 10.1002/we.2901.
 16. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hobokes, NJ, USA, 2011..
 17. Strunkin G.M. Zastosuvannya pristroyiv silovoyi elektroniki. Dnipro. Serednyak T. K., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9.
 18. Alekseyevskij D.G. Sintez elektromechanichnih sistem vitroenergetichnih ustanovok z aerodinamichnim multiplikuvannyam. – Dis. ... doktora tehnicnih nauk za specialnistyu 05.09.03 «Elektrotehnicni kompleksi ta sis-temi» Zaporizkij nacionalnij universitet, Zaporizhzhya, 2020: 331.
 19. Strunkin, G. Avtonomna vitroenergetichna ustanovka z aerodinamichnim multipli-kuvannyam na bazi asinhronnogo generatora z faznim rotorom zi zbudzhennyam vid invertora naprugi. Tehnicni nauki ta tehnologiyi, 2024. 4 (38): 245–253. 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253.

20. Otrazolevoj portal, posvyashennyj rynku elektrodvigatelej. – URL: <http://dvigatel.info>, (data zvernennya 12.06.2023).
21. Lesnik V.A., Mazurenko L.I., Shurub Yu.V., Dzhura A.V. Gabaritnaya moshnost asinhronnoj mashiny v generatornom rezhime raboty. / *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 2004. №2: 32-35.
22. Pereverzev A.V., Alekseevskij D.G., Semenov V.V., Burov A.N., Strunkin G.N., Taranec A.V. Ob ispolzovanii kranovyh asinhronnyh dvigatelej v kachestve generatorov dlya avtonomnyh VEU. / *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2008. №1: 20-23.
23. Kranovo-metallurgicheskie elektrodvigateli / Batalov N. M., Belyj V. A., Ioffe A. B. i dr. M.: Energiya, 1967: 238.
24. Transformatori TSP ta TSP 1. Katalog ZVP «NEON» UTOG. URL: <https://www.neonzpp.com.ua/ua/docs/tsp.pdf> (accessed 05/10/2024).
25. Induktornye mashiny. Tekhnicheskij katalog NP ZAO «Elektromash». URL: https://zzem.com.ua/img/UserFiles/inductor_machines.pdf (accessed 05/10/2024).

Strunkin H.M. Evaluation of the mass of the main equipment of a wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor

The article provides information on the national plans of Ukraine for the development of energy and wind power until 2030. Historical information on the research of wind power plants with aerodynamic multiplication is presented. An analytical review of the latest research on wind power plants with aerodynamic multiplication, initiated by Ukrainian scientists, is provided. The prospects for using electrical equipment of such plants based on an asynchronous generator with a phase rotor and a frequency converter for sliding power, which have better weight-dimensional indicators, are indicated. Information on the operation of wind power plants with aerodynamic multiplication is provided. The structural diagram of electrical equipment for controlling the

power of an asynchronous generator with a phase rotor is described and brief information on its functioning is presented. Using a frequency converter, it is possible to abandon the adjustment of the angle of installation of the blades of the primary wind turbine. The existing market of asynchronous machines with a phase rotor is limited to crane motors, which have a large magnetizing current and operate in a repeated short-term mode. It is possible to reduce the magnetizing current by reducing the motor stator voltage, which, on the other hand, leads to an increase in the rotor current. In previous publications, the stator voltage was optimized, at which the rotor current does not exceed the nominal value in a continuous mode. To match the optimal value of the generator stator voltage with the nominal load voltage, it is necessary to install a step-down autotransformer. Calculations of the total mass of three asynchronous generators with a phase rotor and a step-down autotransformer for the entire series of crane motors were made when using them in wind power plants with aerodynamic multiplication. A comparison of the total mass of electrical equipment based on an asynchronous generator with a phase rotor with the mass of synchronous generators used to date showed their superiority. When using serial asynchronous machines, it is possible to improve the mass of the equipment located on the blades of the primary wind turbine by almost 2 times.

Key words: asynchronous generator with phase rotor, wind power plant, aerodynamic multiplication, crane motor in generator mode, long-term operation, step-up autotransformer, mass of equipment.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка», Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. 69006, Запоріжжя, проспект Соборний, 226, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 22.02.2025.