

РОЗРОБКА ЛОПАТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЙОНІВ З НИЗЬКОЮ ШВИДКІСТЮ ВІТРУ

Юрченко Олександр Юрійович

асистент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-3047-6654

aleksyurchenko110917@gmail.com

Барсукова Ганна Володимирівна

кандидат технічних наук, старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-4261-2182

Anna-Barsukova@ukr.net

Тимошенко Григорій Андрійович

завідувач навчальної лабораторії

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-0451-137X

GATymoshenko@gmail.com

Розширення можливостей альтернативної енергетики може призвести до значного зменшення використання традиційних джерел енергії, а також забруднення навколишнього середовища. На сьогоднішній день альтернативна енергетика у різних країнах набирає темпи розвитку досить не стабільно. Це пов'язано з можливістю використання тих чи інших альтернативних джерел, відсутністю окремих їх видів, затрат на виробництво установок, їх монтаж та пусконаладжувальні роботи. Однак, значного поширення набуває вітрова енергетика. Особливо це стосується районів, де швидкість вітру досить часто здатна розкручувати вітроколесо до обертів, за яких генератор буде виробляти електричну енергію. Проте, вітроенергетика не є виключенням і для районів з малою швидкістю вітрів. Використання мінімального зусилля, здатного привести в рух вітроколесо, уже є успіхом. У таких районах для забезпечення достатніх для генерування електричної енергії обертів вітроустановки встановлюють редуктори або інші пристрої, здатні збільшити частоту обертання валу на виході з редуктора, порівнюючи з частотою обертання на вході. Проте, ускладнення конструкції установки призводить до збільшення її маси та збільшення витрат на виробництво окремих частин, їх монтаж та обслуговування. Тому, пошук оптимальної форми лопаті, здатної забезпечити покращений старт вітроустановки та підтримувати оберти на більш високому рівні, порівнюючи з базовою формою лопаті, є актуальним завданням. В роботі представлено нову форму лопаті вітроустановки з вертикальною віссю обертання для районів з малою швидкістю вітрів. Розроблена лопать має незмінні габаритні розміри, порівнюючи з базовим варіантом, проте, за рахунок зміни форми безпосередньо на бічній частині є можливість поглинання енергії одразу у двох напрямках та концентрації її у так званому «кармані», чого не було у базового варіанту. За такого компонування кількість обертів установки складає на 17% більший показник, ніж у лопаті, виконаної у базовому варіанті. Зростає показник розгону установки, що підтверджує ефективність її на старті. Дослідження, проведенні за допомогою мінімоделі вітроустановки з трьома формами лопатей та вентилятора, забезпечили однакові умови випробувань та отримання не лише теоретичних даних, а і практичних.

Ключові слова: енергія, вісь обертання, ефективність, вітер, енергетика.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.14>

Вступ. Темпи розвитку енергетичних систем на сьогоднішній день потребують значної уваги, поставивши перед конструкторами ряд вимог. Кожна з цих вимог передбачає покращення показників роботи енергоустановки шляхом як внесення змін в конструкцію уже існуючих систем, так і виготовлення нових механізмів та конструкцій.

Вдосконалення вітроенергетичних установок відбувається шляхом ускладнення конструкції вітроколеса, системи керування, а також конструкції генератора. Це дає змогу досягнення більш стабільної роботи вітроустановки.

Класифікацією вітроенергетичні установки (ВЕУ) за положенням вітрогенератора по відношенню до напрямку дії потоку повітря передбачено два основні види вітроу-

становок: вітроустановки з горизонтальною та вертикальною осями обертання.

Дослідження оптимальної форми лопаті для установки проводяться на основі ВЕУ з вертикальною віссю обертання.

Серед вертикально-осьових установок найбільш розповсюдженими є вітроустановки з типами роторів Савоніуса, Еванса, Масгрува та Дар'є.

Значною позитивною якістю конструкцій такого типу є те, що вони уловлюють вітри будь-якого напрямку. Завдяки геометрії своїх лопатей такі ВЕУ завжди знаходяться в робочому положенні. Конструкцією вітрових установок з вертикальною віссю обертання передбачено відмову орієнтації на вітер. А це, в свою чергу,

є значним недоліком конструкції установок з горизонтальною віссю обертання.

Проте для конструкцій із вертикальними осями обертання потрібен початковий старт для того, щоб вітроустановка розпочала свою роботу. Мова йде про розкручування вітроколеса на старті.

Ще одним з недоліків установок даного типу є низька частота обертання вітроколеса. Внаслідок цього виникає необхідність введення в конструкцію ВЕУ редукторів, що дають змогу збільшити оберти генератора.

Разом із цим, установки з вертикальною віссю обертання відрізняються простотою конструкції та відносною дешевизною матеріалів. Незалежність від напрямку вітру, яким розкручується вітряк, дає змогу використовувати його у місцях з обмеженою течією повітря. Такими можуть бути площі, закриті з одного боку будівлями чи іншими спорудами, які б перешкождали дії вітру на вітроколесо.

На сьогоднішній день актуально висвітлюється питання використання енергій вітру, сонця, води та інших альтернативних джерел у максимально можливих об'ємах. Тобто, виникає тенденція отримання енергії від даних ресурсів по максимуму, наскільки це можливо. Вітроустановки є одними з представників такої енергетики.

Проектування і розробка вітрових турбін для районів із низькою швидкістю вітрів пов'язані із рядом технічних і фінансових проблем. А це, в свою чергу, веде до максимізації ефективності перетворення і мінімізації витрат (Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S., 2021).

На переважній частині територій, де проводилися дослідження у джерелі (Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S., 2021) переважають вітри з низькою швидкістю. У даному дослідженні представлено багатопараметричний метод оптимізації, що використовується з метою дослідження конструкції нового вітроколеса. Використовуючи коефіцієнт швидкості наконечника, відношення підйому і опору а також коефіцієнт потужності, визначено оптимальну ефективність за рахунок зміни кількості лопатей та діаметру ободу.

Як показали дослідження, зміна кількості лопатей має значний вплив на ефективність роботи вітроустановки, тим більше при різних діаметрах ободу. Виявлено, що зменшення кількості спиць у два рази (з 64 до 32) у чотирьох досліджуваних вітроколісах із різними діаметрами ободів знижує ефективність менш, ніж на 0,19%. Крім того, при цьому зменшиться вартість на придбання на 42%, вартість монтажних робіт на 42% та маса на 28%. А зменшення кількості спиць у чотири рази (тобто з 32 до 16) знизило ефективність менш, як на 0,31%, зменшило витрати на придбання і монтаж на 36% та 35,5% відповідно, а масу вітроколеса на 19,2%

Покращення параметрів вітроустановок несе за собою різні методи. Так, наприклад, у джерелі (Hosseinie, R., Roohi, R., Ahmadi, G., 2021) розглядається установка, що працює за рахунок нахилу так званого вітрила, змушуючи гойдатися робочий орган, що, у свою чергу, призводить до руху маховика в випрямленому обертальному русі. Цей маховик використовується з метою приводу електрогенератора. Спроектвані до цього турбіни спо-

чатку були напівактивними, тоді як у даному дослідженні було запропоновано повністю пасивну версію турбіни і вивчено її роботу. Установка складається із коливального вітрила, що прикріплене до щогли, що рухається взаємно за рахунок торсійної пружини. Коливальний рух, в свою чергу, перетворюється у обертальний рух маховика. Таким чином, при проведенні дослідження були отримані динамічні рівняння для вітроустановки, що були використані з метою аналізу тимчасових характеристик роботи установки.

Ефективне використання енергії вітру може нести і підключення великих маховиків до ротора генератора (Akbari, R., Izadian, A., 2021). У даному джерелі представлено моделювання і керування такою системою. Обертний момент накопичувача напряму пов'язаний із ротором генератора. Трансмісією від'єднується вал турбіни від валу генератора з метою забезпечення незалежного контролю кутових швидкостей. Таким чином, якість електроенергії, яка вироблятиметься вітроустановкою, покращиться, так як коливання потужності, викликані зміною швидкості вітру, зменшуються.

Використання енергії вітру збільшується, а тому і розміри вітрових турбін можуть значно відрізнитися. Це призводить до появи більш жорстких вимог, що висувуються до вітроустановок, як із боку електромережі, так і з боку економіки. Деякі із таких вимог можна задовольнити за рахунок додаткових механізмів керування у вітрогенераторах. У роботі (Jauch, C., 2021) розглянуто механізм, що є, свого роду, гідравлічно-пневматичною системою маховика у роторі вітрової турбіни. За рахунок такої системи досягається стабілізація живлення, швидка частотна характеристика, стабілізація системи живлення. Крім того, це може призвести до пом'якшення навантаження на механізми вітроустановки, що виникає внаслідок, наприклад, дисбалансу, гравітації, які діють на лопаті, вібрацій та екстреного гальмування.

Моделювання обтікання вітроколеса із лопатями у формі обертаних циліндрів може також підвищити ефективність використання енергії вітру, а тим більше для районів із малою швидкістю вітрів (Tanasheva, N.K., Bakhtybekova, A.R., Sakipova, S.E., Minkov, L.L., Shuyushbaeva, N.N., Kasimov, A.R., 2021). У даній роботі розглянуто вітроустановки із обертаними циліндричними лопатями. Перевагою таких установок, порівнюючи їх із традиційними лопатевими установками, є пусковий момент та початок вироблення енергії за швидкості вітру, що складає 2 – 3 м/с. Також у даній роботі на основі тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса у обертаній системі розроблено математичну модель.

Кількість та форма лопатей мають важливу роль при обертанні вітроустановки та максимально ефективному використанні енергії вітру. Так, у дослідженні (Syuhada, A., Maulana, M.I., Syahriza, Sani, M.S.M., Mamat, R., 2020) обговорюється вплив швидкості вітру і коливань в залежності від кількості лопатей вітроустановки на потужність, що досягається вітровими установками для обертання генераторів. Вітряк, що є досліджуваним у кількох варіаціях лопатей, був виготовлений з деревини. Результатами дослідження виявлено, що для швидкостей вітру,

що є нижчими 5 м/с, краще використовувати невелику кількість турбін, а для швидкостей вітру, більших за 7 м/с, краще використовувати вітроколесо з великою кількістю лопатей.

Дослідження, що проводяться з оптимізацією конструкцій вітроустановок, нерідко призводять не до зменшення структури вітроустановки, а навпаки, – до її ускладнення. Однак, усі ці зусилля спрямовані на максимально ефективне використання енергії вітру. У роботі (Yang, R., Chen, Y.-J., Sun, X.-Y., Ma, C.-S., 2020) розглянуто установку з допоміжним вітровим колесом, що знаходиться на тій же осі обертання. Допоміжне вітроколесо, що спроектовано з діаметром 26 м, кількість лопатей якого складає 8–12 шт., використовується в конфігурації п'яти типів моделей подвійних вітроустановок. Аналіз роботи таких моделей за різних умов показав, що подвійні вітроустановки здатні збільшити використання енергії вітру. Подвійна вітроустановка із 10-лопатеvim допоміжним вітроколесом показала найкращий ефект. У момент, коли швидкість вітру складає 3 м/с, порівняно із оригінальною моделлю, потужність установки з двома вітроколесами збільшується на 14,17%, а коефіцієнт використання енергії вітру збільшився на 4,53%. Швидкість вітру на ділянці, близькій до кореня лопатей основного вітроколеса (радіус менше 13 м) відносно зменшена, у той момент, як в області, що є близькою до верхівки допоміжного вітроколеса (радіус близько 13–20 м) є відносно більшою. Допоміжним вітроколесом перетворюється частина енергії, а тому кінетична енергія в сліді значно зменшується.

Формулювання цілей статті (постановка мети та завдання). ВЕУ з вертикальною віссю обертання, хоч і має одну з головних переваг – відсутність необхідності орієнтації на вітер, але для своєї роботи потребує певного старту для роботи.

Тихохідність, що є однією з ознак вітроустановок такого типу, вимагає встановлення редукторів або мультиплікаторів. Це несе за собою ускладнення конструкції, збільшення маси та розмірів. Крім того, збільшується зусилля для обертання. Це зусилля витрачається на обертання не лише самого генератора і редуктора. Враховуючи тихохідність таких вітроустановок, збільшення зусилля для обертання його основних елементів може значно зменшувати оберти вітроколеса.

Тому, ускладнення конструкції, що несе за собою зменшення крутного моменту вітроустановки, необхідно компенсувати. Разом із цим, питання запуску вітрогенератора вертикально-осьової установки є одним з основних завдань при проектуванні як конструкції лопатей установки, так і їх кількості.

Зменшення стартового зусилля вітроколеса дасть змогу використання його при менших значеннях швидкості вітру, ніж до цього.

З підвищенням старту актуальним залишається збільшення обертів вітроустановки. Завдяки цьому редуктор, який буде встановлено у ВЕУ, може мати значно менше передатне число.

У зв'язку із цим, розробка вітроустановки з вертикальною віссю обертання, у якій лопаті могли б значно покращити старт, є актуальним питанням.

Метою статті є створення вітроенергетичної установки, робота лопатей якої є ефективною, для регіонів з малою швидкістю вітру без додаткового запуску її для початкової роботи. Тому слід провести дослідження числа обертів вітроколеса у кількох варіантах лопатей для зменшення його стартового зусилля.

Матеріали і методи досліджень. Основною характеристикою ВЕУ є коефіцієнт використання енергії вітру, що по змісту має схожість з коефіцієнтом корисної дії (Chizhma S. N., Molchanov S. V., Zakharov A. I., 2018).

При розробці вітроустановки ставляться такі завдання:

- 1) початок роботи вітроустановки при якомога менших зусиллях;
- 2) сприяння більшій частоті обертання вітроколеса під час роботи;
- 3) проведення дослідів з лопатями однакових габаритних розмірів;
- 4) випробування усіх типів лопатей за однакових умов.
- 5) розробка оптимальної конструкції ВЕУ при певних умовах дослідження (як варіант).

Розробка кількох типів лопатей, що зовні в певній мірі є схожими одна на одну, дозволить зменшити стартове зусилля для вітроколеса.

Нижче, на рисунку 1, представляємо схеми трьох лопатей, які було виготовлено.

Результати. При виготовленні вітроустановки головним завданням вбачалося зменшення стартового

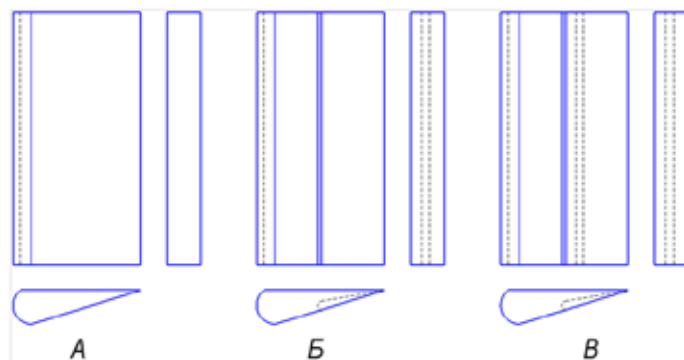


Рис. 1. Схема лопаті вітроколеса:

А – плоска лопать; Б – лопать з «карманом»; В – лопать з «карманом» та щілиною.

зусилля. Це досягалося поступово від варіанту А рисунку 1 до варіанту В.

Використання в конструкції лопатей «карманів» з одного боку (варіанти Б та В) та щілини з протилежного боку (варіант В) дає змогу сконцентрувати потік вітру не лише в одному напрямку, а в кількох відразу, при чому з двох протилежних одна до одної сторін.

Так чи інакше, потік вітру концентрується у «кармані» лопаті, спонукаючи вітроколесо до руху.

Показаний на рисунку 2 напрям вітру, що діє на кожен з представлених лопатей, має неоднозначний характер.

Аналізуючи варіант Б рисунку 2, стає зрозумілим, що потік вітру концентрується уже не на безпосередньо боковій частині лопаті, як це відбувається у варіанту А. У даному варіанті потік сконцентровується у «кармані» лопаті, що приводить в рух вітроколесо.

Порівнюючи варіанти Б та В рисунку 2, видно, що лопать у виконанні за варіантом В матиме ще один напрям дії вітру – напрям «2», що реалізується через вертикальну щілину, яка пролягає через усю бокову сторону лопаті, що є протилежною до сторони, на яку діє потік «1» вітру за звичним способом.

Таким чином, потік, позначений «2» на рисунку 2, потрапляючи усередину лопаті, направляється до «карману», приводячи в рух вітроколесо.

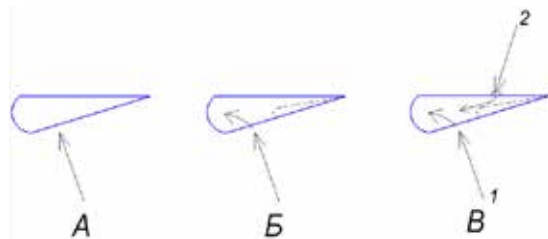


Рис. 2. Напрямок потоку вітру, що діє на лопать вітроколеса: А – плоска лопать; Б – лопать з «карманом»; В – лопать з «карманом» та щілиною

Варіанти Б та В мають значно кращі стартові показники, ніж варіант А. Разом із цим, важливим є те, що лопать у виконанні за варіантом В значно кращі показники і по частоті обертання, порівнюючи з варіантами А та Б.

На рисунку 3 зображено напрям дії вітрового потоку на лопаті вітроустановки, виконаної за варіантом В, на старті. Як бачимо, кожна з лопатей активно задіяна у старті.

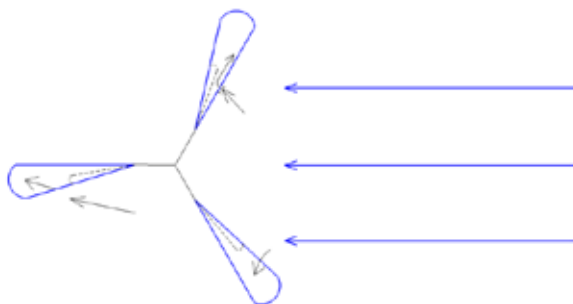


Рис. 3. Потік вітру на старті вітроустановки

Дослідження залежності кількості обертів вітряка від часу проводилися за допомогою міні моделі вітроустановки, яку окремо виготовлено та встановлено, і вентилятору, зображених на рисунку 4.

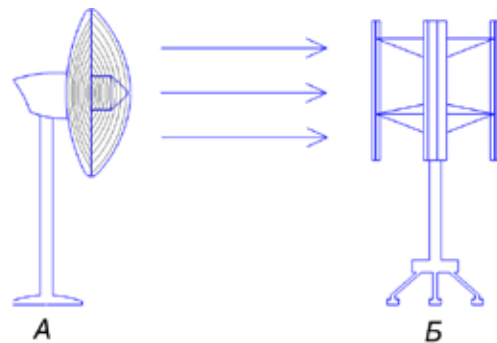


Рис. 4. Експериментальна вітроустановка: А – вентилятор; Б – вітроустановка

Випробування здійснено по трьом видам лопатей, представлених вище. Умови дослідження усіх типів лопатей – незмінні. Однаковими є відстань від вентилятору до вітроустановки, швидкість обертання вентилятору.

Результати досліджень показали, що найкраще використовують потік вітру мають кращий момент на старті – лопаті, виконані за варіантом В.

Нижче представлено показники обертання вітряка з різними лопатями за окремий проміжок часу при незмінних умовах (таблиця 1).

**Таблиця 1
Залежність числа обертів від часу**

№	t, с	n ₁ , об	n ₂ , об	n ₃ , об
1	5	0,75	1	1,1
2	10	2,5	3	3,25
3	15	4,5	5,5	6,5
4	20	7	9	10
5	30	15	16	19
6	40	24	25	28
7	50	31	35	38
8	60	41	44	48

У таблиці 1 представлено дані досліджень, де n₁, n₂, n₃ – кількість обертів вітроустановки, виготовлених відповідно за способами А, Б та В.

Результати досліджень говорять про те, що за 1 хвилину число обертів вітроустановки з лопатями, виготовленими по способу В, на 17% більше, ніж з лопатями, що виготовлені за способом А.

Обговорення (Discussion). Використання сил рухомих повітряних мас на даний момент є глобальним явищем (Pytel, K., Gumula, S., Dudek, P., Bielik, S., Szpin, S., Hudy, W., Piaskowska-Silarska, M., Kowalski, M., 2019). Метою дослідження у даній роботі було визначення впливу форми лопатей та кута атаки лопаті на ефективність перетворень енергії вітру у механічну на колесі ротору. Роторним колесом перетворюється енергія вітру у механічну енергію при використанні лопатей, орієнтованих із точки зору оптимальної продуктивності



Рис. 6. Створена ВЕУ з лопатями з «карманом» і щілиною

та певної форми. У публікації представлено результат аеродинамічних характеристик профільних лопатей для використання у вітрогенераторах.

Дослідження лопатей у джерелі (Ma, J., Huo, D., Li, X., Duan, Y., Wu, Y., Wang, J., 2019) стосуються лопатей вітроустановки з розподіленою віссю, а її жорсткість, коефіцієнт демпфування і власна частота вперше покращені за допомогою увігнутого крила. Передумовою цього було збереження вихідної потужності. Дослідження показали, що увігнута внутрішня аеродинамічна поверхня може краще контролювати положення і вплив на діпазони зближення повітряного потоку. Крім того, увігнутий аеродинамічний профіль здатен збільшити коефіцієнт амортизації вітроколеса на 3%–9%, збільшити значення жорсткості лопаті на 32%, Крім того, ефективно зменшуються максимальний зсув та деформація на 28%. Застосування увігнутого аеродинамічного профілю у конструкції лопатей вітрогенератора не тільки забезпечило новий метод отримання сімейства аеродинамічних крил, але і може забезпечити спосіб для синхронної оптимізації аеродинамічних характеристик та структурних динамічних характеристик лопатей.

У роботі (Bel Mabrouk, I., El Nami, A., 2019) досліджено динамічну поведінку вітроустановки із вертикальною віссю обертання. Крутий момент змодельовано на розрахунках Нав'є-Стокса із усередненими значеннями Рейнольдса для дво-, три- і чотирилопатевого роторів. Для кожної із запропонованих конфігурацій ротору обговорено вплив кількості лопатей на аеродинамічні характеристики. У роботі встановлено взаємозв'язок між аеродинамічними деталями і динамічною вібрацією зубчастих систем шляхом вивчення впливів деяких конструктивних параметрів на динамічну вібрацію системи передачі в нестационарному режимі. Кількість лопатей вважається

основною проблемою вітрової техніки. У цій роботі наведено чисельні результати, які показують, що кількість лопатей чинить істотний вплив на ККД установки та динамічну характеристику досліджуваної системи.

Кут атаки лопаті вважається одним із найважливіших факторів, які впливають на аеродинамічні характеристики вітроколеса із вертикальною віссю (Zhang, L., Zhao, X., Wang, H., Liu, Y., 2018). Для вітроустановки потужністю 1 кВт з вертикальною віссю та симетричним аеродинамічним профілем визначено теоретично оптимальні кути атаки, що складають $10,7^\circ$ та $-10,7^\circ$ протівітряної і підвітряної площі вітроустановки з метою отримання максимального коефіцієнту використання сили вітру вітроколесом. На основі теорії багатопотокового керування диска з подвійним приводом, результати досліджень показують, що коефіцієнт використання потужності вітроколеса може бути збільшено на 11,03 % за допомогою закону регулювання кутів атаки лопаті у реальному часі, запропонованого у даній статті.

З метою визначення характеристик вітроустановок у джерелі (Li, Z., Yu, X., Han, R., 2017). досліджується новий тип вітроколеса із горизонтальною структурою вітрогенератора у поєднанні із характеристиками вітрогенератора із вертикальною віссю і вітрогенератора із горизонтальною віссю. За допомогою програмного забезпечення досліджено структуру турбіни і розподіл навколишнього поля потоку. Одночасно для генераторів, що встановлені на вітроустановках, запропоновано синхронний генератор. У роботі досліджено та змодельовано поле потоку навколо вітроустановки. Результати показали, що нова структура установки може покращити використання енергії вітру і значно краще використовувати енергію вітру. Доцільність такої структури перевірено за допомогою моделювання, яке забезпечує подальшу оптимізаційну основу.

Вітроустановки, в тому числі і ті, що містять ротор з вертикальною віссю обертання, можна з'єднати з перетворювачами енергії та нерухомим концентратором повітря з напрямними пластинами. Такий концентратор повітря виконується у вигляді двох конусоподібних чашок із отворами у дні чашок, між якими розташовуються напрямні повітря пластини і ротор. При цьому утворюються канали, що звужуються у горизонтальному і вертикальному напрямках (Рекрут М. І., Шевченко І. А., 2019). В основу моделі було поставлено задачу створення вітроустановки, у якій би з'явилася можливість підвищення потужності і ефективності її експлуатації. Тому, поставлену задачу вирішено тим, що ротор із вертикальною віссю обертання з'єднано з перетворювачем енергії, нерухомим концентратором повітря із напрямними пластинами.

В результаті дослідження ефективності використання лопатей, опис яких представлено у даній роботі, виявлено, що робота вітроустановки може бути покращеною за рахунок зміни форми лопаті без зміни її габаритних розмірів. Час розгону до максимальних обертів скорочується, що означає покращений старт вітроустановки. Крім того, слід відмітити, що максимальні оберти установки також є більшими, порівнюючи зі стандартною формою лопаті, що підтверджує ефективність її використання.

Висновки.

1. Покращення старту, а саме, – початок роботи з меншим тиском повітряних мас, досягнуто у варіантів лопатей з «карманом» та з «карманом» і щілиною.

2. Кількість обертів вітроколеса покращується зі зміною їх конструкції, а саме: лопать з «карманом» має на 7,3% більше число обертів за хвилину, ніж плоска лопать. А лопать з «карманом» та щілиною має покращений на

17% показник кількості обертів за хвилину у порівнянні з плоскою лопаттю.

3. Усі типи лопатей вітроустановки досліджено з однаковими габаритними розмірами.

4. Умови, в яких проводилися дослідження, є однаковими для кожного з типів лопатей, адже вентилятор працював у одному режимі, відстань від вентилятору до вітроустановки була незмінною. Крім того, в усіх трьох випадках дотримано висоту, на якій знаходилися лопаті вітроустановки та вентилятор.

5. Було створено конструкцію тихохідної ВЕУ з вертикальною віссю обертання для районів з малою швидкістю вітрів.

Результати дослідних випробувань розробки тихохідної ВЕУ з лопатями з «карманами» та щілинами реалізовано як пристрій для освітлення емблеми університету у темну пору доби, що виготовлений за способом В і знаходиться поруч з корпусом інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету (акт впровадження від 03.12.2021 р.).

А теоретико-практичні результати дослідження використовуються в навчальному процесі при вивченні дисциплін: «Екологічні аспекти раціонального енергокористування», «Енергетичні та екологічні основи в збереженні та використанні поновлюваних джерел енергії» «Енергетичні та екологічні основи в забезпеченні та використанні поновлюваних джерел енергії» (акт впровадження від 03.12.2021 р.).

Отже, при створенні оптимальної конструкції лопатей вітроустановки було досягнуто зменшення стартового зусилля для вітроколеса. Крім того, виявлено, що у лопатей з «карманами» та щілиною щілини, що знаходяться з однієї зі сторін лопатей, також виконують допоміжну функцію не лише при старті, а й під час роботи вітроустановки.

Бібліографічні посилання:

1. Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S. (2021). Multi-parameter optimization of efficiency, capital cost and mass of ferris wheel turbine for low wind speed regions. *Energies*, 14 (19), № 6217. DOI: 10.3390/en14196217.
2. Hosseinie, R., Roohi, R., Ahmadi, G. (2021). Modeling and analysis of a fully passive swinging sail wind turbine. *Wind Energy*, 24 (7), pp. 653-671. DOI: 10.1002/we.2595.
3. Akbari, R., Izadian, A. (2021). Modelling and Control of Flywheels Integrated in Wind Turbine Generators. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 2021-May, № 9491886, pp. 106-114. DOI: 10.1109/EIT51626.2021.9491886.
4. Jauch, C. (2021). Grid services and stress reduction with a flywheel in the rotor of a wind turbine. *Energies*, 14 (9), № 2556, DOI: 10.3390/en14092556.
5. Tanasheva, N.K., Bakhtybekova, A.R., Sakipova, S.E., Minkov, L.L., Shuyushbaeva, N.N., Kasimov, A.R. (2021). Numerical simulation of the flow around a wind wheel with rotating cylindrical blades. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18 (1), pp. 51-56. DOI: 10.31489/2021NO1/51-56.
6. Syuhada, A., Maulana, M.I., Syahriza, Sani, M.S.M., Mamat, R. (2020). The potential of wind velocity in the Banda Aceh coast to the ability to generate electrical energy by horizontal axis wind turbines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788 (1), стаття № 012082, DOI: 10.1088/1757-899X/788/1/012082.
7. Yang, R., Chen, Y.-J., Sun, X.-Y., Ma, C.-S. (2020) Analysis on the Phenomenon of Power Increase in Dual-wind Turbine under Low Wind Speed [Article@低风速下双风轮风力机增功现象分析] Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 35 (9), pp. 134-140. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.09.019. (in Chinese).
8. Pytel, K., Gumula, S., Dudek, P., Bielik, S., Szpin, S., Hudy, W., Piaskowska-Silarska, M., Kowalski, M. (2019). Testing the performance characteristics of specific profiles for applications in wind turbines. *E3S Web of Conferences*, 108, № 01015, DOI: 10.1051/e3sconf/201910801015.
9. Ma, J., Huo, D., Li, X., Duan, Y., Wu, Y., Wang, J. (2019). A study on the optimization method of structural dynamic properties of blades based on concave deformation of airfoil [Article@基于翼型凹变的叶片结构动力学性能优化方法研究] Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock, 38 (8), pp. 36-41. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.08.006. (in Chinese).

10. Bel Mabrouk, I., El Hami, A. (2019). Effect of number of blades on the dynamic behavior of a Darrieus turbine geared transmission system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, pp. 562-578. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.11.048.
11. Zhang, L., Zhao, X., Wang, H., Liu, Y. (2018). Study on the Real time and Efficient Adjustment Law for H-Type Vertical Axis Wind Turbine [Article@H型垂直轴风力机实时高效攻角调节方法研究] *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 54 (10), pp. 173-181. DOI: 10.3901/JME.2018.10.173. (in Chinese).
12. Li, Z., Yu, X., Han, R. (2017). Modeling and wake characteristics analysis of a new vertical axis wind generation system. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017-January, pp. 8590-8595., DOI: 10.1109/IECON.2017.8217509.
13. Recruit M.I., Shevchenko I.A. (2019). Vitroustanovka [Wind generator] (Patent of Ukraine № 134082, 21.04.2019) State Enterprise "Ukrainian Institute of Intellectual Property"(Ukrpatent) URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=258070> (in Ukrainian).
14. Chizhma S. N., Molchanov S. V., Zakharov A. I. (2018). Kriterii vybora tipa vetroustanovok dlya mobil'nykh vetro-solnechnykh elektrostansiy [Criteria for selecting the type of wind plants for mobile wind-solar power plants] *Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant. Ser.: Physical-mathematical and technical sciences*. 2018. № 1. C. 53–62. (in Russian).

Yurchenko O. Yu., Assistant, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Barsukova H. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Tymoshenko H. A., Head of the training laboratory, Sumy, Ukraine

Development of a wind turbine blade for areas with low wind speed

Expanding the possibilities of alternative energy can lead to a significant reduction in the use of traditional energy sources, as well as environmental pollution. Today, alternative energy in different countries is gaining momentum rather unstable. This is due to the possibility of using certain alternative sources, the lack of certain types, the cost of production, installation and commissioning. However, there is a significant expansion of wind energy. Particularly important are the districts, where the wind is often blown up by spinning the wind wheel to the wraps, for which the generator will vibrate electric energy. Prote, wind energy is not excluded and for areas with low wind speed. Winning the minimal susilla, building to bring the wind wheel into operation is already a success. In such areas, for the provision of wrappers of wind turbines sufficient for generating electrical energy, reducers or other extensions are installed to increase the frequency of wrapping the shaft at the output of the reducer, equal to the frequency of wrapping at the input. However, the complex design of the installation leads to increased weight and increased loss for the production of some parts, as well as maintenance installations. Therefore, look for the optimal shape of the blade, creating protection for starting the wind turbine and leveling it to a higher level, which corresponds to the basic shape of the blade is the actual task. This article presents a new shape of wind turbine blade for areas with low wind speeds. The developed blade has the same dimensions compared to the base version, however, due to the change in shape directly on the side it is possible to absorb energy in two directions and concentrate it in the so-called "pocket", which was not the base version. With this arrangement, the number of revolutions of the installation is 17% higher than in the blade made in the basic version. The rate of acceleration of the installation increases, which confirms its effectiveness at the start. Studies conducted with the help of a mini-model of a wind turbine with three forms of blades and a fan provided the same conditions for testing and obtaining not only theoretical but also practical data.

Key words: energy, axis of rotation, efficiency, wind, energy.