

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-391-400
УДК 621.548

ТАРАСЕНКО МИКОЛА

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0001-6080-4367>
e-mail: araskenko_mykola@ukr.net

КОЗАК КАТЕРИНА

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0001-7267-8492>
e-mail: kozakateryna@gmail.com

ОМЕІЗА ЛУКМАН

Університет Бруней-Даруссалам
<https://orcid.org/0000-0003-4513-3010>
e-mail: lukahmed@yahoo.com

ЗИНЬ МИРОСЛАВ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0003-3301-0216>
e-mail: zin@mtu.edu.ua

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТИПОВИХ ТА НЕ ТИПОВИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

У статті проаналізовано енергоефективність різного роду вітроенергетичних установок (ВЕУ) з точки зору використання конфузорів, похідних шестерних вітрогенераторів, ротора Оніко, впливу середньорічної швидкості вітру та еквівалентного числа годин вироблення номінальної потужності на прийнятті рішення щодо встановлення потужних ВЕУ, які працюють на основі ефекту Магнуса, роторів Масгреєв, Еванса, Дар'є, вітроенергетичної установки компанії Sheer Wind, ВЕУ з змінним кутом лопатей, ВЕУ Аергрей та нерухомих вітрогенераторів.

Ключові слова: конфузур, вітрогенератор, вітровий потік, Межа Беца, коефіцієнт швидкохідності, холостий хід, навантаження.

TARASENKO MYKOLA, KOZAK KATERYNA

Ternopil National Ivan Puluj Technical University

OMEIZA LUKMAN

University Brunei Darussalam

ZIN MYROSLAV

Ternopil National Ivan Puluj Technical University

EFFICIENCY ANALYSIS OF USING TYPICAL AND ATYPICAL WIND ENERGY INSTALATIONS

The article analyzes the energy efficiency of typical wind turbines (Savonius, Musgrave, Evans, Darier, Magnus, Lentz) and non-typical wind turbines (carousel-petal, double, powerful wind turbines operating on the basis of the Magnus effect, stationary turbine-type wind turbines, airship wind turbines filled with helium), Sklyarov wind turbine, wind generators, constructions of various wind energy types installations in terms of axis location - vertically axial or horizontally axial, the limit value of the coefficient of wind energy utilization (CWEU), the influence of the control voltage regulator on the reliability and durability of the wind power plant, effectiveness of using confusors and guides for increasing the energy of the wind flow, the efficiency of compact derivative gears and flying wind generators, protection against lightning and overvoltage's and noise, coefficient of wind flow inhibition etc. It also has been analyzed the effectiveness of the shape of the wind wheel blade and the rotor, the influence of the average annual wind speed and the equivalent number of hours of nominal power generation on the decision-making on the installation of powerful wind turbines, the influence of the number of blades on the speed, the energy efficiency of the wind energy installation of the Sheer Wind company, Air Grey and stationary wind generators, protection against lightning and overvoltage, an approximate determination of the capacity of any wind power plant. It has been established that the speed of the rotor rotation in wind turbines of similar power differs by several times. The number, width, and length of the blades of classic wind turbines with a horizontal axis of rotation and the speed of rotation of the rotor of wind turbines similar in power, which differ by several times, were analyzed.

Key words: confusor, wind generator, wind flow, Betz limit, speed coefficient, idle speed, load.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У зв'язку з вичерпністю традиційних енергоресурсів (згідно з офіційними даними, вугілля вистачить на 150, нафти на 50, природного газу на 49 р), інтенсивним приростом населення (на 21.03.2023 р чисельність населення планети вже перевищила 8 млрд осіб) та забрудненням навколишнього середовища перехід до відновлюваних джерел енергії є неминучим [1]. До перспективних відновлюваних джерел енергії відносяться: сонячні панелі та вітроенергетичні установки (ВЕУ). Сумарна встановлена потужність вітроенергетичного сектору на кінець 2021 року становила 1 672,9 МВт [2]. До початку широкомасштабної війни в Україні «зелену» електроенергію генерували 34 вітроелектростанції (ВЕС) або 699 вітрових турбін. Середня одинична потужність яких на 11.10 2022 р становила 3,5 МВт [3]. У зв'язку з реальним розумінням дефіциту електричної енергії помітно зросла і зацікавленість щодо виготовлення та використання ВЕУ не тільки в промисловому, але й в приватному секторі. Виникло запитання, яка з конструкцій ВЕУ є найефективнішою. Щоб відповісти на це запитання розглянемо існуючі конструкції ВЕУ від простих до

більш складних. Підкреслимо, що перший спогад про застосування вітру для виконання механічної роботи було знайдено в роботі Герона, який у 1 столітті н. е. сконструював примітивний вітряк, що постачав енергію для музичного інструменту (органа) [4].

Перші справжні вітряки з'явилися близько 7 століття в регіоні Сістан на межі Ірану й Афганістану. Це були споруди з вертикальною віссю обертання, які мали від 6 до 12 лопатей, зроблених з рисових матів. Вони застосовувалися для помелу зерна і помпування води. Сучасна вітроенергетика зосереджується перш за все на отриманні електроенергії, хоча незначна кількість вітряків, призначених для виконання механічної роботи все ще існує [5]. У кількох країнах вітроенергетика вже зараз становить досить вагому частку всієї електроенергетики: у Данії 20 % і по 14 % – у Португалії та Іспанії [6], лідер Китай. Всі комерційні ВЕУ, що застосовуються зараз, збудовано у вигляді наземних високих веж із горизонтальною віссю генератора (ротора). Це обумовлено тим, що швидкість вітру помітно зростає з висотою (рис.1). Розроблюються навіть методи отримання електроенергії за допомогою мобільних генераторів, встановлених на великих повітряних зміях. Обумовлено це тим, що на висотах від 1 до 4 км від поверхні Землі в зоні між 30° північної і південної широт утворюються досить рівномірні повітряні течії. У північній півкулі ближче до поверхні землі їх середня швидкість становить 7-9 м/с. Згідно з інформацією інституту відновлюваної енергетики НАН України економічно вигідно виробляти вітрову електроенергію в південних областях України, Криму та передгір'ях Карпат України. При цьому треба обов'язково враховувати структуру вітрового потоку за певний відомий проміжок часу, який характеризується наступною низкою параметрів: 1) середньою швидкістю; 2) поривчастістю; 3) мінливістю; 4) тривалістю провалів-підйомів швидкостей вітру вище або нижче середнього значення [6]. Не треба також забувати і про те, що сумарне вироблення електроенергії ВЕУ за тривалий проміжок часу можна визначити з високим рівнем достовірності.



Рис.1. Залежність швидкості вітру від висоти розташування ротора ВЕУ [7]

Це пояснюється тим, що середня швидкість вітру і частота розподілу швидкостей протягом року або сезону майже не змінюється. Суттєвий вплив на надійність і довговічність роботи ВЕУ мають значення граничних швидкостей вітрового потоку в регіонах де вони встановлюються. Вони визначають прийняті розрахункові нормативи при проектуванні вузлів і конструкцій установки на міцність, параметри регуляторів та аеродинамічні характеристики лопатей. Необхідно також пам'ятати, що швидкість вітру і висота хвиль в океанах (для офшорних ВЕУ) постійно зростають, а напрямок залишається незмінним [8].

Розрахункова швидкість вітру для мало-потужних ВЕУ знаходиться в межах 3-5 м/с, для потужних 11-15 м/с. Як правило, чим більша потужність ВЕУ, тим більша швидкість вітрового потоку необхідна для ефективної її роботи. Однак у зв'язку з мінливістю швидкості вітру певну частину часу ВЕУ простоє, або виробляє менше електроенергії. Але якщо середньорічна швидкість вітру не менша 5-7 м/с, а еквівалентне число годин у році, коли виробляється номінальна потужність не менше 2000 год, то таке місце вважається сприятливим для встановлення потужних ВЕУ. Тому, **основним завданням** дослідження стало визначення енергоефективності типових і не типових вітроенергетичних установок промислового і приватного виготовлення, **а предметом дослідження – методи** і засоби оцінювання та аналізу енергоефективності типових і нетипових вітроенергетичних установок.

Аналіз останніх джерел

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що споживання енергії у світі характеризується великою нерівномірністю. Так при населенні 3% від його сучасного світового рівня США споживає більше 30% енергії з викопних джерел. У той час як мало розвинуті країни стали на шлях інтенсивного розвитку, нарощуючи рівні споживання енергії. Якщо врахувати що основні поклади нафти та газу розташовані в євро-азіатському регіоні де панує іслам і різко зростає чисельність населення можна прийти до висновку що світові енергетичні війни будуть періодично виникати. Для усунення подібних ситуацій потрібно не просто забезпечити людство електроенергією, а забезпечити екологічно чистою енергією, до якої в теперішній час

відносяться відновлювані джерела енергії – сонячні панелі та вітроенергетичні установки, які в теперішній час займають лідируючі позиції. Сонячні панелі знаходяться на другому місці. Питаннями забезпечення впровадження вітроенергетичних установок та підвищенням їх кількісних та якісних характеристик займалися такі вчені як: Кириленко О.В, Яндульський О.С, Лежнюк П.Д, Богомолова Т.С, Кулик В.В, Swen Teske, В. Побігун, Б.М. Лижичко, Н.В. Фоменко, Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossany E., та інші [3,6,8,9]. Проте залишилося без уваги таке питання як аналіз ефективності використання типових та нетипових вітроенергетичних установок промислового та приватного виробництва кількість яких невпинно зростає. Робота виконана у відповідності з науковим напрямком діяльності кафедри «електрична інженерія»

Виклад основного матеріалу

Розглянемо принцип роботи вітроенергетичних установок. Сучасні ВЕУ з горизонтальною віссю обертання здатні ефективно перетворювати енергію вітру в електроенергію. Все це завдяки лопатям, які розроблені з використанням самих сучасних засобів аеродинамічного аналізу та обладнанню, яке підвищує їх продуктивність. В основі аналізу лежить закон Бернуллі, який встановлює залежність між швидкістю стаціонарного потоку рідини (газу) та її тиском. Відповідно до цього закону, якщо вздовж лінії течії тиск рідини підвищується, то швидкість течії зменшується і навпаки. Вигнута форма лопатей ВЕУ забезпечує різницю швидкостей зверху і знизу від лопатей, внаслідок чого, згідно із законом Бернуллі, тиск повітря над лопатями стає меншим за тиск повітря під лопатями завдяки чому ротор ВЕУ і обертається (а літак піднімається вгору). Якщо повітряний потік буде обертати лопаті, то ми зможемо отримати електроенергію від приєднаного до них генератора саме завдяки аеродинамічному профілю лопатей, які від основи до самого кінця мають різну форму і розміри поперечного перерізу. Для того, щоб швидкість лопаті зростала у напрямку до кінця кут вектора відносної швидкості вітру також повинен зростати у напрямку до кінця лопаті. Саме для цього лопаті певним чином вигинають по всій довжині. Але таке обертання досить повільне і його не можна передавати безпосередньо на генератор.

Тому перед підключенням до генератора швидкість обертання збільшують за допомогою редуктора з планетарним механізмом (мультиплікатором). ВЕУ зразу ж перетворюють кінетичну енергію вітру в струм «брудної частоти». Тобто струм у якого частота, форма і амплітуда постійно змінюються в процесі змін інтенсивності і напрямку повітряних потоків. «Брудний струм» випрямляється і перетворюється в постійний струм, який спрямовується на вхід інвертора. Інвертор перетворює постійний струм в змінний частотою 50 Гц, який для зменшення втрат в лініях електропередач поступає на первинну обмотку підвищувального трансформатора. Для призупинення обертання лопатей при надлишковому вітрові в гондолі ВЕУ передбачений анемометр і гальмівний механізм. Для максимального вироблення електроенергії вісь турбіни повинна знаходитися паралельно до вітру. Але напрямок вітру в будь який момент може змінитися. Щоб утримати вісь турбіни в зоні паралельного вітрового потоку на поверхні гондoli встановлюють давач, який постійно вимірює не тільки швидкість, але й напрямок вітру. При зміні напрямку вітру до електронного контролера поступає сигнал на поворотний механізм щоб відкоригувати положення турбіни. Таким чином турбіна завжди працює за напрямком вітру. В залежності від швидкості вітру кут повітряного потоку відносної швидкості вітру також змінюється. За цими змінами слідкує поворотний механізм лопатей, який при потребі обертає лопаті навколо їх осі, забезпечуючи точне вирівнювання лопатей у відповідності до вектору відносної швидкості вітру. Завдяки цьому лопаті завжди знаходяться під оптимальним кутом до вітрового потоку. Для того щоб отримати дані щодо ККД ВЕУ необхідно виміряти швидкість вітру перед і після турбіни. Очевидно що швидкість вітру після турбіни буде меншою ніж перед нею. Це обумовлено тим, що лопаті поглинають частину кінетичної енергії вітру яка перетворюється механічну енергію обертання. Якщо б ВЕУ поглинула 100% доступної швидкості вітру, то за турбіною вона б дорівнювала нулю. Але фізично це реалізувати неможливо. Нульова швидкість вітру за турбіною вказує на те, що весь потік зупинився. Якщо це було б так, то ВЕУ також зупинилася б. Щодо ККД, то вже доведено, що теоретична межа ефективності яку можуть досягти вітрогенератори це 59,3 % – межа Беца. Вона встановлює верхню межу енергії, яку можна отримати за рік від вітрогенератора. Навіть якщо гіпотетичний повітряний потік дув би постійно протягом усього року, все одно неможливо отримати енергії більше, ніж значення за законом Беца. На практиці річний коефіцієнт потужності вітру на вітрогенераторі коливається в межах від 25% до 40% енергії, яка може бути згенерована постійним вітровим потоком. В теперішній час потужні трьох лопатеві ВЕУ досягають значень коефіцієнта потужності C_p від 0,45 до 0,50, тобто 75-85% від максимально можливого значення за законом Беца. Потужність ВЕУ визначається розмірами їх лопатей. Чим більший розмір лопатей, тим більшу потужність вони будуть генерувати, виходячи з кубічної залежності інтенсивності вітрового потоку. Якщо вітровий потік зі швидкістю 6 м/с забезпечує потужність ВЕУ 100 Вт, то при збільшенні швидкості вітру всього в 2 рази (до 12 м/с) потужність зростає у 8 разів ($100 \cdot 2^3 = 100 \cdot 8$) тобто до 800 Вт, а при зростанні швидкості вітру у три рази (до 36 м/с) потужність зростає у 27 раз тобто до 2,7 кВт. Якщо одночасно збільшити у 2 рази не тільки розміри лопатей, але й швидкість вітрового потоку, то потужність зростає у $(8+4)=12$ раз до 1200 Вт. В теорії, ефективність роботи вітрогенераторів залежить і від кількості лопатей ротора: **чим більше, тим ефективніше**. Але, як не дивно, вітроколеса з малою кількістю лопатей мають більший ККД, ніж з великою. Це обумовлено тим, що при великій кількості лопатей вони заважають одна одній. Від чого суттєво залежить ефективність ВЕУ, так це

від довжини лопатей в квадраті і швидкості вітрового потоку в кубі. Саме тому суттєво вплинути на ККД можна саме за рахунок зміни цих параметрів. Середні швидкості вітру на території України улітку знаходяться в діапазоні від 3-6 м/с, усереднене значення до 5 м/с. Узимку 5-8 м/с. На висоті 500 м вона вдвічі більша і приблизно дорівнює 7 м/с.

Енергоефективність існуючих ВЕУ. Відомо, що ефективність роботи вітроенергетичних установок залежить від коефіцієнта швидкохідності Z_o , тобто від відношення швидкості на кінцях лопатей ВЕУ (v_{KL}) до швидкості вітру (v_B) наступним чином

$$Z_o = v_{KL} / v_B = R \cdot \omega_o / v,$$

де R – радіус вітроколеса, м;

v_{KL} – швидкість кінців лопатей ВЕУ м/с;

v_B – швидкість вітру, м/с;

ω_o – кутова швидкість вітроколеса ВЕУ рад/с.

Оптимальну швидкохідність для n -лопатевої ВЕУ приблизно можна визначити за наступною формулою

$$Z_o \approx 4 \cdot \pi / n, \text{ де } n \text{ – кількість лопатей вітроколеса ВЕУ.}$$

Як випливає з формули чим менше лопатей у ВЕУ, тим більше коефіцієнт швидкохідності і навпаки, чим більше лопатей, тим менше коефіцієнт швидкохідності. Так у одно лопатевої ВЕУ коефіцієнт швидкохідності найбільший – $Z_o \approx 4 \cdot \pi / n = 4 \cdot 3,14 / 1 = 12,56$. Для 2-х лопатевих ВЕУ – $Z_o \approx 4 \cdot \pi / n = Z_o \approx 4 \cdot \pi / 2 \approx 6$. Для 3-х і 4-х лопатевих ВЕУ $Z_o \approx 4 \cdot \frac{\pi}{3} \approx 4,2$; $Z_o \approx 4 \cdot \pi / 4 \approx 3,14$. У зв'язку з тим, що густина повітря досить мала (вона майже в **997/1,29=773** рази менше густини води) виникає бажання збільшити концентрацію енергії повітряного потоку за допомогою такого простого пристрою як конфузор, в якому відбувається з'єднання і плавний перехід більшого січення в менше. На практиці у відповідності з законом Бернуллі це реалізувати не вдається. Це обумовлено не тільки тим, що ускладнюється конструкція ВЕУ (конфузори потрібно не тільки закріпити на ВЕУ, але ще й розвертати за вітром при досить високій парусності: установки малої потужності за допомогою хвоста флюгера, а агрегати середньої і великої потужності за допомогою спеціальної системи орієнтації на вітер, яка встановлена на гондолі ВЕУ) [9]. Саме тому ні одна з крупних компаній світу не займається виробництвом потужних ВЕУ з конфузорами і конфузорними каналами. Хоча патентів пов'язаних з цим питанням дуже багато. Один із цікавих підходів використання модифікованого варіанту конфузора компанії Sheer Wind, який поведе себе згідно з парадоксом вигнутої труби представлений на рис. 2. Компанія Sheer Wind стверджує, що вона розробила оригінальну вітроенергетичну установку INVELOX, яка виробляє на 600% більше електроенергії ніж традиційні установки (рис.2). Дійсно ВЕУ відрізняється незвичайним дизайном і являє собою вигнуту трубу змінного перерізу, яка (за їх твердженням) ефективно утилізує енергію вітру. Фактично, це набір розтрубів-повітряозабірників, які захоплюють вітер і через трубу, що звужується, підводять його до лопатей електрогенератора. Конструкція безпечна, оскільки у неї немає величезних відкритих лопатей. Вона проста у спорудженні та експлуатації. Вихідний повітряний потік з турбіни більше вхідного і вважається корисним, тобто може бути використаним для вентиляції автомобільних тунелів. Більше того, за заявою розробників, така ВЕУ виробляє набагато більше енергії. Завдяки стисненню та прискоренню повітряного потоку, а також меншій масі рухомих частин.

Так, якщо швидкість вітрового потоку на вході складає 16 км/год (4,44 м/с), то у трубі ВЕУ вона зростає до 64 км/год (17,78 м/с), а на виході з турбіни - 24 км/год (6,67 м/с). INVELOX більш прийнятна до навколишнього середовища, ніж звичні ВЕУ. Вона менша за розмірами, менше шумить і менш небезпечна для птахів. Крім того, встановлення INVELOX дешевше за звичні ВЕУ - близько \$750 за 1 кВт потужності, що генерується або всього 1 цент за кВт × год. Насправді це модифікований варіант конфузора, який поводить себе згідно з парадоксом вигнутої труби.

Розглянемо також ефективність похідної шестерної ВЕУ Ігоря Білецького для зарядки мобільних телефонів в похідних умовах [10], яка складається з шести вітротурбінок закріплених на алюмінієвому профілі а посередні конструкції встановлений електромотор-генератор таким чином, щоб зліва і справа в зчепленні з ним знаходилося по три шестерних турбінок. Лопаті вітротурбінок зроблені під кутом 45 градусів, що дає можливість роботи вітрогенератора в двох прямо протилежних напрямках. Після випробувань такого вітрогенератора з'ясувалося що їх сумісна робота супроводжується досить сильним шумом, але потужність на виході не зростає, не зважаючи на те, що генератор складається не з одної а з шести вітротурбінок. Очікування того, що три турбіни справа і три зліва передадуть свою енергію електромотору-генератору виявилися марними. При випробуваннях з'ясувалося, що кількість енергії яку

виробляє одна турбінка мало чим відрізняється від кількості енергії, яку виробляє власне шестерний вітрогенератор.



Рис. 2. Рис. 3. ВЕУ Компанії Sheer Wind [10]

і взаємне затемнення лопатей. У загальному випадку для вертикальних ВЕУ в якості активної поверхні, що сприймає енергію вітрового потоку, використовують наступні основні види роторів: Савоніуса (рис. 3), Масгреву, Еванса та Дар'є (рис. 4).

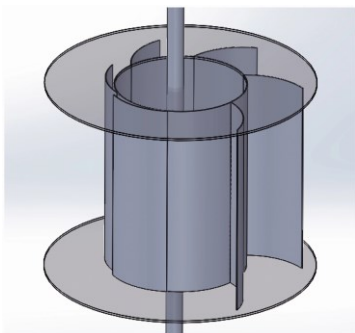
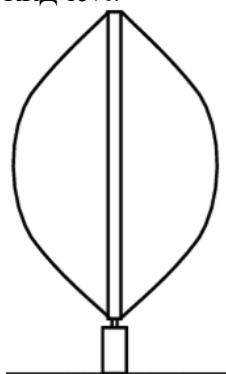


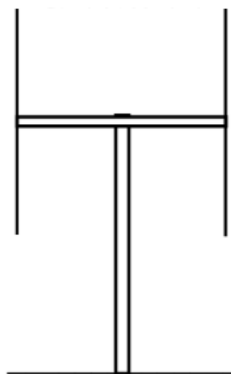
Рис. 3. Схема шарнірного ротора Савоніуса з 6 лопатями [11]

Ротор Савоніуса складається з щогли і двох або більше лопатей у формі порожнистих напівцилінрів, зміщених відносно один одного. Робота ротора побудована на різниці опорів, яка виникає при обтіканні повітряним потоком лопатей ротора. Рух лопатей навколо центральної осі виникає за рахунок опукло – увігнутої форми. Конструкція виконана так, що незалежно від напрямку повітряного потоку ротор завжди орієнтований на вітер, йому не страшна турбулентність яка виникає за вітроколесом. Але ротор має досить низький коефіцієнт використання енергії вітру, значну матеріалоємність та високу нерівномірність крутильного моменту на один оборот,

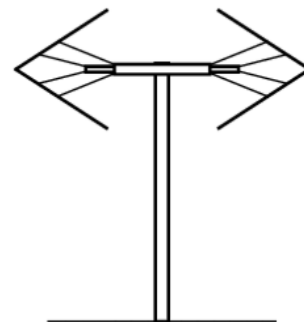
ККД 15%.



а)



б)



в)

Рис. 4. Мало лопатеві тихохідні ВЕУ з вертикальною віссю обертання: а) з вигнутими лопатями типу Дар'є з обертовою вежею б) вітроенергетичні установки з прямими лопатями Н-типу Масгреву в) вітроенергетичні установки з прямими лопатями Н-типу Масгреву з механізмом складання [12].

Обертовий момент у ВЕУ (рис. 4) також створюється підйомною силою двох вертикально розташованих лопатей з аеродинамічним профілем. Для їх запуску також потрібна розкрутка, а для зупинки - поворот лопатей навколо вертикальної осі. Ротор Масгреву також має лопаті з аеродинамічним профілем, які в початковий стартовий момент розташовані вертикально. У міру збільшення швидкості вітру лопаті починають складатися, зменшуючи підйомну силу за рахунок зменшення захопленої площі. При максимальній розрахунковій швидкості вітру вітроколесо зупиняється при повному складанні лопатей (рис. 4). Як і ротору Дар'є, цьому ротору необхідно дати початкове обертання. Ротори з вертикальною віссю

обертання (рис. 5) простіші у виготовленні і монтажу, оскільки їм не потрібно орієнтуватися за напрямком вітру, що призводить до зменшення матеріалоемності і складності при їх виготовленні та обслуговуванні.

Ротор Савоніуса має досить низький коефіцієнт використання енергії вітру, значну матеріалоемність та високу нерівномірність крутильного моменту на один оборот. Тим не менше, він достатньо поширений через простоту виготовлення та високий початковий крутильний момент. Завдяки цьому він часто застосовується як допоміжний для зрушення турбін, що мають низький початковий крутильний момент (наприклад ротор Дар'є рис. 5 с). У дволопатевої роторів Савоніуса значення енергетичних характеристик вище, ніж у трилопатевої. Існують моделі ротора з гвинтоподібними поверхнями, але такі моделі (рис. 5 б) є значно менш технологічними.

Дослідження 4-х і 12-ти лопатевої вертикальних ВЕУ показали, що 4-х лопатевої ВЕУ виготовлені з бочок обертаються постійно навіть при малому вітрі, а інколи і при його відсутності. Але як тільки їх навантажити, щоб почався процес виробітку електроенергії, вони зразу ж зупиняється. При сильних вітрах працюють ривками оскільки проміжки між лопатями звеликі. При збільшенні кількості лопатей до 12 шт ця конструкція починає обертатися краще і стабільніше, але виробіток електроенергії залишається мізерним. Додаткове встановлення направляючих крил ситуацію не змінює. Треба пам'ятати, що ефективність ВЕУ оцінюється не тим, як вона працює в режимі холостого ходу, а тим як вона працює під навантаженням, скажімо в оточенні потужних неодимових магнітів. Треба також мати на увазі, що опади, в залежності від їх інтенсивності, також знижують потужність ВЕУ: дощ – на 20 %, сніг на 30-40 %. Гелікоїдні ротори це також вертикальні ВЕУ, які мають хитромудру форму, лопаті у них закручені вздовж осі і виготовлені з авіаційною точністю. Це потрібно для того щоб значно зменшити навантаження на підшипники і щоглу з усіх сторін. Недоліком таких ВЕУ є складність виготовлення, а значить і висока вартість



Рис. 5. Вертикальні (карусельні) мало потужні вітроенергетичні установки: а) Ротор Савоніуса гвинтоподібний б) Об'єднання ротора Савоніуса і Дар'є [13]

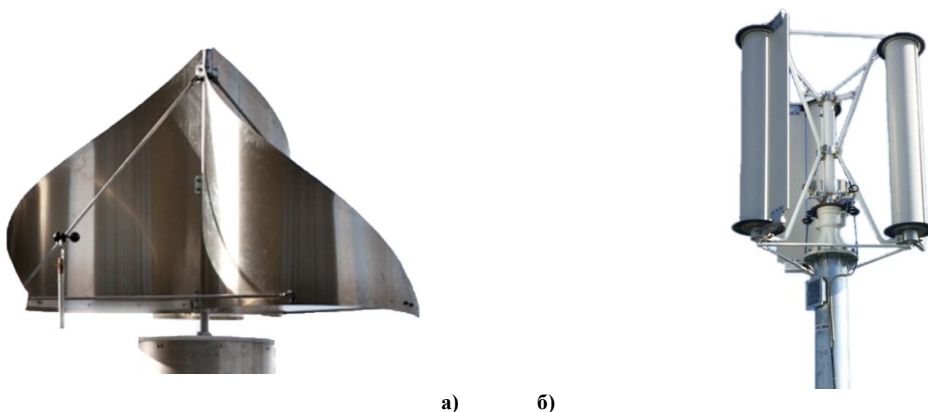


Рис. 6: а) Ісландська ВЕУ генерує до 1 кВт при швидкості вітру 10 м/с, безшумна, безпечна для птахів, вписується у будь-яке оточуюче середовище; б) Вертикальні вітроенергетичні установки на основі ефекту Магнуса [14]

Вертикальна вітроенергетична установка на основі ефекту Магнуса має просту конструкцію з міцними циліндричними лопатями, що дає можливість витримувати не тільки руйнівні тропічні циклони та руйнівну силу тайфунів (119 км/год – 33 м/с), але й перетворювати їх руйнівну енергію в електрику. Правда ефективність таких генераторів на чверть нижча, ніж у традиційних. Але при правильному їх використанні за один сезон тайфунів можна отримати таку кількість енергії, якої вистачить для Японії на 50 років. Конструкція схожа на ротор Н-Даре, але з циліндричними лопатям, що здешевлює їх виробництво у 2-3 рази.

Ротор Олексія Оніпко (рис. 7) розрекламований як інноваційний вітрогенератор шнекового типу для малих і середніх вітрів, винайдений українським вченим Олексієм Оніпко має форму конусоподібного шнека (уплітки), який зорієнтований вершиною проти вітру і здатен виробляти максимальну кількість енергії (від 3-х Вт до 3 кВт) при мінімальному вітрі. При цьому автор поняття «мінімальний вітер» не розшифровує і про величину ККД не згадує, демонструючи роботу вітрогенератора в режимі холостого ходу. В той же час як винахідник Ігор Білецький, при проведенні випробувань на семи моделях різної конфігурації (в тому числі і ротора Оніпко) довів, що ротор Оніпко є найгіршим із всіх розглянутих конструкцій. Це дійсно так і є, тому що: по перше з моменту винайдення цієї конструкції в 2008 році пройшло вже більше ніж 22 роки, але ніхто і ніде не організував хоча б мілко серійне виробництво; по друге немає ні однієї комерційної пропозиції, навіть офіційні сайти мовчать; по третє немає жодного відгуку про енергоефективність і вартість цієї конструкції. Відсутні матеріали щодо будь яких випробувань: стендових, полігонних, експлуатаційних тощо.



Рис. 7. Зовнішній вигляд ротора Оніпко[15]

Підкреслимо, що в режимі холостого ходу більшість конструкцій ВЕУ будуть обертатися досить жваво і легко, особливо у тому випадку, коли будуть виготовлені з легких матеріалів і враховані хоча б в якійсь мірі параметри аеродинамічних характеристик лопатей. У ротора Оніпко немає поверхонь виготовлених з використанням сучасних засобів аеродинамічного аналізу. Відсутні і результати заводських та відомчих випробувань за спеціальними програмами і методиками тощо. Правда є результати випробувань винахідника-блогера Андрія Тиртха, його висновок абсолютно негативний.

Вертикальна ВЕУ Ленца. За загальним виглядом вона нічим не відрізняється від звичайних вітроенергетичних установок подібного типу. Виглядає так само як і гелікоїдні та ортогональні установки. Принцип дії вертикального генератора Ленца (двох або трьох лопатевого) базується на використанні магнітної левітації, (закону електромагнітної індукції Лоренца-Ленца) коли замість звичайних підшипників, які часто виходять з ладу через постійне механічне навантаження, використовуються потужні неодимові магніти. Вони утримують ротор генератора у підвищеному стані в певній точці простору без тертя. При обертанні утворюються 3 види сил: підйомна, імпульсна і проста сила гальмування. Завдяки двом першим лопаті вітрогенератора обертаються, що сприяє створенню ротором магнітного поля, яке і виробляє електрику. Завдяки застосуванню магнітного підвісу такий вітрогенератор є одним з найефективніших. Він легко стартує, є тихохідним і зносостійким. Під час роботи не продукує електромагнітні випромінювання. Необхідна швидкість повітряного потоку для початку роботи установки повинна бути не менше 0,17 м/с. На номінальну потужність виходить при 3,4 м/с, на відміну від 7, 8 м/с. для горизонтальних установок [11]. Вітрогенератор Склярова це мобільна конструкція, в якій втілені декілька оригінальних технічних рішень. В першу чергу це форма кілець, які розсікають повітряний потік. Вона збільшує швидкість вітрового потоку в 6 раз виключно за рахунок профіля кілець і сопел. Крім того повітря зустрічає перепону у формі особливого потовщення, що також додає швидкості. Потужність зростає і за рахунок інших ноу-хау генератора. На зустрічних магнітних полях генератора, утворюючого вакуум позаду установки. Завдяки цьому він може працювати навіть у безвітряну погоду.

Вітрогенератори, що працюють у повітрі за принципом повітряного змія. Конструкції нагадують собою аероплан, що має горизонтально розташовані лопаті, які піднімають установку у повітря. При досягненні висоти близько 300 -500 м ВЕУ починають виробляти електроенергію. За попередніми даними ці ВЕУ будуть виробляти вдвічі більше електроенергії, ніж ті що працюють на землі. Постачання електроенергії буде здійснюється за допомогою металевого троса, що зв'язує агрегат з координаційною станцією, яка розташована на землі і забезпечує передачу енергії в загальну мережу. Вітрогенератори виготовляються з легкого матеріалу і оснащені новітнім програмним забезпеченням, розробленим з урахуванням передових технологій що дозволяє орієнтувати конструкцію в повітрі так, щоб максимально використовувати енергію вітру. Повітряні змії британської компанії Kite Power Solutions, на відміну від попередніх, рухаються по траєкторії у вигляді вісімки. Обладнання, що розташоване внизу, швидко розмотує «трос» літаючого змія, запускаючи його у висоту, а потім повільно змотує його назад. У цьому процесі виробляється енергія. Пілотні тести даної установки заплановані на червень цього року в Шотландії. Технологія привернула інвестиції від таких компаній як Shell, E.ON і Schlumberger. Вона розробляється консорціумом британських інженерів, який отримав 1 млн фунтів стерлінгів грантової допомоги від уряду. Потужність такого вітрогенератора близько 600 кВт [12]. Вітрогенератор з змінним кутом лопатей має три синхронізованих лопаті. В процесі обертання лопатей на кожну з них по черзі набігає вітровий потік, який при куті набігання 90 градусів є максимальним. В процесі обертання цей кут змінюється, але лопаті продовжують обертатися під тиском набігаючого вітрового потоку за годинникову стрілкою. Коли лопать дійде до мертвої точки вона вийде на назустріч вітру, тобто стане вздовж вітру поступово повертаючись

далі. Для зупинки ВЕУ лопаті автоматично піднімаються і стають вздовж повітряного потоку. Установка зупиняється. Як правило це відбувається при надмірно потужних вітрових потоках.

Вітроенергетична установка «Аероґрей» за твердженням розробників має коефіцієнт використання вітрового потоку у два рази вище ніж у його попередників. Цього вдалося досягти за рахунок заміни традиційних лопатей на короткі лопатки з полімерних матеріалів. Це призвело до турбінного принципу роботи (як у сегнерового колеса) вітроустановки як це відбувається в літаках. ВЕУ не потрібно орієнтувати на вітер. Корпус поглинає всі шуми, том установка працює майже безшумно. Хоча багато хто останнім часом робить ставку на сонячну енергію, у деяких місцевостях із сильними вітрами набагато краще покажуть себе безлопатеві повітряні турбіни. Тому дітище Університету Х'юстона компанія Aeromine Technologies розробила дуже незвичайний вітрогенератор [13]. Компактні «нерухомі» вітрогенератори виробляють на 50% більше енергії, ніж сонячні панелі за тією самою ціною. Компанія Aeromine представила унікальні «нерухомі» вітрогенератори, які призначені для встановлення на дахах будівель. Вони потенційно здатні виробляти на 50% більше енергії, ніж сонячні панелі порівнянної вартості, займаючи при цьому лише 10% площі, яку покрили б сонячні панелі. «Енергокороби» Aeromine займають досить мало місця на дахах, хоча їхня висота може досягати 3 м. Турбіни майже безшумні та не мають небезпечних для експлуатації на даху лопатей. Спеціальні панелі, схожі на автомобільні спойлери з отворами, розташованими з боків від круглої опори створюють усередині конструкції область низького тиску. Виникає рух повітря яке, обертає пропелер діаметром 0,91 м, приводячи в рух вал генератора. Для їх створення не потрібні спеціальні матеріали на зразок вуглеволокна. Кожна установка, здатна виробляти до 5 кВт потужності, що еквівалентно комплекту з 21 сонячної панелі, генеруючи щорічно до 14,3 МВт · год електроенергії [17]. Такі установки здатні працювати на даху в комбінації із сонячними панелями, цілодобово виробляючи енергію. Їх недоліком є те, що установки потрібно монтувати у місцях із постійним напрямком вітру, оскільки конструкція не має пристроїв для зміни кутів нахилу. Крім того, ці ВЕУ досить високі і здатні не лише зіпсувати зовнішній вигляд будівель, але й відкидати довгі тіні.



Рис. 8. Нерухомі вітрогенератори [16]

Для нормальної роботи ВЕУ турбінного типу необхідні повітряні потоки що рухаються зі швидкістю від 2 до 60 м/с. Установка самостійно вловлює напрямок вітру, повертаючись в потрібну сторону, має високу чутливість до повітряних потоків. Мінімальна швидкість для приведення лопатей в рух від 2 м/с. Для ВЕУ інших типів потрібна швидкість від 4 м/с. ККД майже вдвічі перевищує ККД ВЕУ, що мають незахищені лопаті [18]. За рахунок сопельної конструкції обтічника, турбінні ВЕУ значно потужніші за агрегати інших конструкцій, безпечні для птахів та кажанів, не продукують інфразвук, згубний для людей та тварин. Їх можна встановлювати поряд із житловими будинками.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Аналіз показав, що ВЕУ компанії Sheer Wind INVELOX (див. рис. 2) це модифікований варіант конфузора, який поводить себе згідно з парадоксом вигнутої труби, у якої вхідний вітровий потік в конфузоре малий (4,44 м/с) потім він в трубі зростає до 17,78 м/с і на виході з труби (дифузора) знову зменшується до 6,67 м/с. Підсилення відбувається всього в $6,67 / 4,44 = 1,5$ рази а не в 6 разів (на 600%) як стверджує компанія. До того ж в конфузоре ВЕУ INVELOX (так як вона представлена на рис. 3) вітровий потік одночасно може попасти як в конфузоре (знаходиться вгорі) так і в дифузоре (знаходиться внизу), що буде сприяти переходу ламінарного потоку в турбулентний. Цьому буде сприяти і зміна швидкостей від 4,44 м/с до 17,78 м/с, а потім до 6,67 м/с.

2. Дослідження показали, що енергоефективність похідного вітрогенератора не може бути високою за рахунок того що три турбіни справа і три зліва будуть передавати свою енергію мотор-генератору, який знаходиться по центру установки. В процесі випробувань з'ясувалося, що кількість енергії яку виробляє одна турбінка мало чим відрізняється від кількості енергії, яку виробляє власне шестерний вітрогенератор. Тобто енергоефективність такого генератора близька до нуля.

3. Збільшити ефективність вітроустановок за допомогою використання конфузорові за законом Бернуллі практично неможливо.

4. Вважається що ВЕУ з вертикальним розташуванням осі це низько ефективні установки, які використовувати не рекомендується, але аналіз чисельних досліджень показав, що ефективність ВЕУ визначається не тим як розташована вісь (горизонтально чи вертикально), а тим яка конфігурація у лопатей. Якщо лопаті розроблені з використанням самих сучасних засобів аеродинамічного аналізу та обладнання, яке підвищує їх продуктивність, то ефективність буде залежати виключно від довжини лопатей в квадраті і швидкості вітрового потоку в кубі. Суттєво вплинути на ККД можна саме за рахунок зміни цих параметрів.

5. Про ККД ВЕУ можна говорити тільки при їх роботі в режимі номінального навантаження.

6. Використання дирижаблей наповнених гелієм для вироблення електроенергії на висоті 500 м дуже вигідно тому, що там швидкість вітру вдвічі більша ніж на стандартній висоті 10 м. Завдяки цьому кількість виробленої енергії зростає в 2^3 раз.

7. Очевидно, що вітрогенератор Складярова не має аеродинамічних лопатей. Не зрозуміло як утворюється вакуум, який забезпечує роботу ВЕУ в безвітряну погоду. Чому швидкість вітру зростає саме у 6 раз як і у ВЕУ рис.2 Компанії SheerWind.

8. Літаючі вітрогенераторні установки каліфорнійської компанії Makani Power дуже цікаві і перспективні, але потребують тривалої апробації. Невідомо як вони будуть себе поводити в реальних умовах експлуатації: шквальні переривчасті вітрові потоки, зіткнення з іншими літальними апаратами, птахами, в різних погодних умовах.

9. Перед тим як заявляти про високу енергоефективність вітроенергетичної установки необхідно визначити коефіцієнт використання енергії вітру (КВВ). Він розраховується як відношення потужності, отриманої на валу вітрогенератора, до потужності вітрового потоку, що діє на поверхню вітроколеса. Це зауваження відноситься до всіх хто хоче створити власну вітроенергетичну установку і в першу чергу до винахідника Олексія Оніпка, який цього не зробив, хоча і отримав патент.

10. Нерухомі ВЕУ (рис. 8) та генератори турбінного типу найбільше підходять для встановлення в приватному секторі.

Література

1. Дописувачі Вікіпедії. Проблема вичерпання природних ресурсів.[Електронний ресурс]. *Українська Вікіпедія*. 22 січня 2023, 14:34 UTC [цитовано 22 січня 2023]. Доступно із: URL: <https://cutt.ly/I9ajlfc>.
2. Володимир Омельченко. «Сектор Відновлюваної Енергетики України До, Під Час Та Після Війни.» [Електронний ресурс]. Доступно із URL: <https://Razumkov.org.ua/Statti/Sektor-Vidnovlyuvanoyi-Energetyky-Ukrayiny-Do-Pid-Chas-Ta-Pislya-Viynu>, 11 Лист. 2022.
3. Ярослав Ярош. «ВЕС і СЕС: перерваний прогрес». [Електронний ресурс]. Доступно із URL: <https://minprom.ua/articles/291806.html?swcfpc=1>, Минпром., 09 Лист 2023.
4. Дописувачі Вікіпедії. Вітер. [Електронний ресурс]. *Українська Вікіпедія*. 07 червня 2022, 14:34 UTC [цитовано 09 лютого 2023]. Доступно із: URL: <https://cutt.ly/x3gbiru>.
5. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков. Основи вітроенергетики: підручник. Дніпропетровськ, Нац. гірн. ун-т, 2015.
6. С. Сиротюк, В. Боярчук, В. Гальчак. Альтернативні джерела енергії. Енергія Вітру: навчальний посібник. – Львів: «Магнолія 2006», 2018.
7. .Wind Profile Calculator. «The Swiss Wind Power Data Website». [Online]. URL: <https://wind-ata.ch/tools/profile.php?lng=en>. 09 Feb. 2023.
8. О.В. Побігун, Б.М. Лижичка, Н.В. Фоменко. «Вітроенергетичні установки як альтернатива використання нафтогазових ресурсів», *Наука і сучасні технології*, № 2(13), с. 93-96, 2010.
9. . M. L. Kubik, P. J. Coker, C. Hunt, Using meteorological wind data to estimate turbine generation output, a sensitivity analysis, 2011
10. Оригінальний вітряк-турбіна до 6 разів ефективніший за звичайні: веб-сайт. URL: <https://infonova.org.ua/technology/oryhinalnyj-vitryak-turbina-do-6-raziv-efektyvnishyj-za-zvyčajni.html> (дата звернення 22.02. 2023)
11. Iham Satrio Utomoa, Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjanab, Syamsul Hadic. “Experimental studies of Savonius wind turbines with variations sizes and fin numbers towards performance” AIP Conference Proceedings 1931, 030041 (2018); doi: 10.1063/1.5024100
12. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001), Wind energy. Handbook./[West Sussex], England, 643 p.
13. Windturbine, 900 W, 12 V, 24 V, 48 V, 220 V, verticale windgenerator met controller, Maglev windturbine generator (12 V) URL:<https://www.amazon.nl/Windturbine-verticale-windgenerator-controller-windturbine/dp/B09P8J7VHH> (дата звернення 22.02. 2023)
14. This typhoon turbine could power Japan for 50 years: <https://www.weforum.org/agenda/2016/10/typhoon-turbine-japan-electricity-50-years/> (дата звернення 22.02. 2023)
15. Дописувачі Вікіпедії. Ротор Оніпка. [Електронний ресурс]. *Українська Вікіпедія*. 22 лютого 2023, 14:34 UTC [цитовано 22 січня 2023]. Доступно із: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%9E%D0%BD%D1%96%D0%BF%D0%BA%D0%B0.
16. Small Wind: Planning and Building Successful Installations. Nolan Clark Ed. Academic Press, 2013
17. Б. Г. Тучинський, В. А. Точений, І. В. Іванченко. “Аналітичний огляд тенденцій технічних параметрів вітрових електричних установок”, *Відновлювана енергетика*, No 3, с. 14–17, 2009.
18. Офіційний сайт Світової асоціації вітрової енергетики [Електронний ресурс]. – режим доступу: <http://www.wwindea.org>.

References

1. Dopysuvachi Vikipedii. Problema vycherpannia pryrodnykh resursiv.[Online]. Ukrainska Vikipediia. 22 sichnia 2023, 14:34 UTC [tsytovano 22 sichnia 2023]. Dostupno iz: URL: <https://cutt.ly/19ajlfc>.
2. Volodymyr Omelchenko. «Sektor Vidnovlyuvanoi Enerhetyky Ukrainy Do, Pid Chas Ta Pislia Viiny.» [Online]. Dostupno iz URL: <https://Razumkov.org.ua/Statti/Sektor-Vidnovlyuvanoi-Enerhetyky-Ukrainy-Do-Pid-Chas-Ta-Pislia-Viyny>, 11 Lyst. 2022.
3. Yaroslav Yarosh. «VES i SES: perervanyi prohres». [Online]. Dostupno iz URL: <https://minprom.ua/articles/291806.html?swcfpc=1>, Mynprom., 09 Lyst 2023.
4. Dopysuvachi Vikipedii. Viter. [Online]. Ukrainska Vikipediia. 07 chervnia 2022, 14:34 UTC [tsytovano 09 liutoho 2023]. Dostupno iz: URL: <https://cutt.ly/x3gbiru>.
5. H. Pivniak, F. Shkrabets, N. Noiberher, D. Tsyplenkov. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk. Dnipropetrovsk, Nats. him. un-t, 2015.
6. S. Syrotiuk, V. Boiarchuk, V. Halchak. Alternatyvni dzherela enerhii. Enerhiia Vitru: navchalnyi posibnyk. – Lviv: «Mahnoliia 2006», 2018.
7. Wind Profile Calculator. «The Swiss Wind Power Data Website». [Online]. URL: <https://wind-ata.ch/tools/profile.php?lng=en>. 09 Feb. 2023
8. O.V. Pobihun, B.M. Lyzhychka, N.V. Fomenko. «Vitroenerhetychni ustanovky yak alternatyva vykorystannia naftohazovykh resursiv», Nauka i suchasni tekhnolohii, № 2(13), s. 93-96, 2010.
9. M. L. Kubik, P. J. Coker, C. Hunt, Using meteorological wind data to estimate turbine generation output, a sensitivity analysis, 2011
10. Oryhinalnyi vitriak-turbina do 6 raziv efektyvnishyi za zvychai: veb-sait. URL: <https://infonova.org.ua/technology/oryhinalnyj-vitryak-turbina-do-6-raziv-efektyvnishyi-za-zvychajni.html> (data zvernennia 22.02. 2023)
11. Ilham Satrio Utomoa, Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjanab, Syamsul Hadic. “Experimental studies of Savonius wind turbines with variations sizes and fin numbers towards performance” AIP Conference Proceedings 1931, 030041 (2018); doi: 10.1063/1.5024100
12. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001), Wind energy. Handbook./[West Sussex], England, 643 p.
13. Windturbine, 900 W, 12 V, 24 V, 48 V, 220 V, verticale windgenerator met controller, Maglev windturbine generator (12 V) URL:<https://www.amazon.nl/Windturbine-verticale-windgenerator-controller-windturbine/dp/B09P8J7VHH> (data zvernennia 22.02. 2023)
14. This typhoon turbine could power Japan for 50 years: <https://www.weforum.org/agenda/2016/10/typhoon-turbine-japan-electricity-50-years/> (data zvernennia 22.02. 2023)
15. Dopysuvachi Vikipedii. Rotor Onipka. [Elektronnyi resurs]. Ukrainska Vikipediia. 22 liutoho 2023, 14:34 UTC [tsytovano 22 sichnia 2023]. Dostupno iz: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%9E%D0%BD%D1%96%D0%BF%D0%BA%D0%B0
16. Small Wind: Planning and Building Successful Installations. Nolan Clark Ed. Academic Press, 2013
17. B. H. Tuchynskyi V. A. Tochenyi, I. V. Ivanchenko. “Analitychnyi ohliad tendentsii tekhnichnykh parametriv vitrovykh elektrychnykh ustanovok”, Vidnovlyuvana enerhetyka, No 3, p. 14–17, 2009.
18. Ofitsiinyi sait Svitovoi asotsiatsii vitrovoi enerhetyky [Elektronnyi resurs]. [– rezhym dostupu: <http://www.wwindea.org>.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37

Підп. до друку 27.04.2023 р. Ум.друк.арк. 54,31 Обл.-вид.арк. 51,67
 Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
 Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету” редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63