

АНОТАЦІЯ

Рожкевич А.О. Розробка удосконаленого методу розрахунку вітроенергетичних агрегатів з вертикальною віссю обертання. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара, Дніпро, 2023.

Дисертацію присвячено теоретичним дослідженням нового удосконаленого методу розрахунку вітроенергетичних агрегатів з вертикальною віссю обертання, а саме, роторів Дар'є, котрий ґрунтується на урахуванні змінності локального числа Рейнольдса набігаючого вітрового потоку при обтіканні елементів лопатей вітроустановки.

Сучасний світ стикається з низкою глобальних проблем, які роблять вітроенергетику невід'ємною частиною стратегії забезпечення енергетичної безпеки та стійкості.

Одна з самих великих проблем 21-го століття – це глобальна зміна клімату. Збільшення викидів парникових газів, спричинених спалюванням викопних палив, є основною причиною цієї проблеми. Енергія вітру надає можливість перейти до використання екологічно чистих джерел енергії та знизити залежність людства від викопних палив. Це зменшує викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, котрі супроводжують викопні палива сприяючи, таким чином, успіху у боротьбі зі зміною клімату.

Природні копалини палива, такі як нафта і природний газ, є обмеженими ресурсами, і їх запаси зменшуються з кожним днем. Енергія вітру, навпаки, забезпечує ресурсну стійкість і дозволяє гарантувати стабільне енергопостачання у майбутньому, попри обмеженість викопних ресурсів.

Залежність від імпорту нафти і газу створює вразливість економік багатьох країн, оскільки ціни та доступність цих ресурсів піддаються коливанням та зовнішнім факторам. Дуже гостро ця проблема відчувається в Україні. Ця залежність пов'язана переважно з імпортом природного газу, нафти та вугілля, а також електроенергії. Створення на півдні України вітроелектростанцій могло б

значно знизити залежність енергоресурсів від інших країн. У минулому Україна була сильно залежна від постачання газу з росії, проте після подій анексії Кримського півостріву та повномасштабного вторгнення росії, Україна укладає угоди про постачання газу з різними постачальниками, включаючи Європейський Союз та США.

Вітроенергетика також сприяє створенню нових робочих місць у сільських та міських районах, де будуються вітряні ферми та виробничі центри. Це сприяє економічному зростанню та зменшенню безробіття, а також створює можливості для навчання та розвитку навичок у сфері використання відновлюваної енергії.

Розвиток вітроенергетики супроводжується постійним технологічним прогресом. Завдяки інноваціям та новим технологічним дослідженням вдається підвищувати ефективність та надійність вітряних турбін, а також знижувати вартість виробництва вітрової енергії. Це робить вітроенергію більш доступною та конкурентноспроможною.

Багато урядів країн світу визнають важливість розвитку вітроенергетики та надають різні види підтримки, включаючи фінансові стимули та податкові пільги. Це допомагає прискорити зростання цієї галузі та зробити її більш привабливою для інвесторів та підприємств.

З урахуванням усіх вищезгаданих аспектів, вітроенергетика стає більш невід'ємною та актуальною частиною сучасної енергетичної системи багатьох країн. Вона не тільки сприяє екологічній стійкості, але також і сприяє зміцненню енергетичної безпеки та економічному розвитку, що робить її необхідною для майбутнього планети та людства.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному: в дводисковій одноструменевій аеродинамічній моделі течії повітря навколо вітроагрегата вперше враховано наявність траверс як елементів вітроустановки у вигляді різних класичних симетричних профілів, таких, як, наприклад, профілі NASA 0012, 0015, 0018, 0021, також враховано вплив змінності локального числа Рейнольдса обтікання елементів лопаті, котре змінюється як від положення лопаті у вітроколесі, так і від відносної швидкості

набігання вітрового потоку безпосередньо на кожний елемент лопаті в зоні окресленого об'єму у вітроколесі. Створено програмний модуль для розрахунку вітрогенератора типу Дар'є, котрий дозволяє задавати тільки глобальні геометричні параметри вітроустановки та обирати профіль із вже опрацьованих, а саме: NASA 0012, 0015, 0018, 0021, а також додати нові профілі – шляхом вносу їх аеродинамічних коефіцієнтів до вже створеної бази аеродинамічних характеристик аеродинамічних профілів NASA. Проаналізовано вплив на енергетичні характеристики ВЕУ кута установки лопатей, їх кількості, довжини хорди, тощо.

У даній дисертаційній роботі розроблено нову, удосконалену, порівняно з відомими раніше методиками розрахунку енергетичних характеристик ротору Дар'є з урахуванням залежності локальних аеродинамічних характеристик елементів лопаті від локального числа Рейнольдса, тоді як у попередній «класичній» дводисковій схемі розрахунку ВОВД не враховується той факт, що окремі елементи лопаті обтікаються кожен зі своєю відносною швидкістю набіжного потоку і тому кожен елемент лопаті має своє особисте локальне місцеве число Рейнольдса. Вітровий потік в окресленому об'ємі вже є дещо “пом'ятим”, він втрачає деяку частку своєї незбуреної швидкості за рахунок роботи по переміщенню лопатей ВЕУ і передачі їм частини своєї кінетичної енергії.

Отримані аналітичні вирази та програмні коди допомогли дослідити вплив різних геометричних параметрів на роботу моделі вітроустановки. Отримані теоретичні та аналітичні дані можуть бути взяті за основу при проведенні подальших експериментальних досліджень у галузі вітроенергетики.

Було встановлено, що варіювання кута установки лопаті можуть бути рекомендовані для підвищення ефективності роботи вітротурбіни. Запропонована методологія може бути використана для подальших досліджень, пов'язаних з проектуванням та функціонуванням вертикально-осьових вітрогенераторів.

За період навчання в аспірантурі було критично вивчено існуючі раніше підходи до розрахунку ВОВД і створено програмний модуль для розрахунку вітроустановки, який дозволяє отримати основні енергетичні параметри вітроустановки в залежності від основних глобальних геометричних параметрів вітродвигуна, швидкості незбудженого набігаючого потоку повітря для різних класичних симетричних профілів серії НАСА: 0012, 0015, 0018 та 0021.

Ключові слова: вертикально-осьова вітроустановка, ротор Дар'є, дводискова імпульсна модель, лопать, число Рейнольдса, математичне моделювання, коефіцієнт швидкохідності, вітровий потік, коефіцієнт моменту, коефіцієнт потужності, аеродинамічний профіль.

ANNOTATION

Anton Rozhkevych. Development of an improved method of calculating wind energy units with a vertical axis of rotation. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 113 Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, 2023.

The dissertation is devoted to theoretical studies of a new and improved method of calculating wind power units with a vertical axis of rotation, namely, Darrieus rotors, which is based on taking into account the variability of the Reynolds number of the oncoming wind stream when flowing around the blade of a wind turbine.

The modern world is faced with a number of global problems that make wind energy an integral part of the strategy of ensuring energy security and sustainability.

One of the biggest problems of the 21st. century is climate change. The increase in greenhouse gas emissions caused by the burning of fossil fuels is the main cause of this problem. Wind energy provides an opportunity to transition to clean energy sources and reduce dependence on fossil fuels. This reduces emissions of carbon dioxide and other harmful substances, contributing to the fight against climate change.

Natural fossil fuels, such as oil and natural gas, are finite resources, and their reserves are dwindling every day. Wind energy, on the contrary, provides resource sustainability and allows to guarantee a stable energy supply in the future, despite the limitation of fossil resources.

Dependence on oil and gas imports creates vulnerability for many countries, as prices and availability of these resources are subject to fluctuations and external factors. This problem is most acutely felt in Ukraine. This dependence is mainly related to the import of natural gas, oil and coal, as well as electricity. The creation of wind power plants in the south of Ukraine could reduce the dependence of energy resources on other countries. In the past, Ukraine was heavily dependent on gas supplies from Russia, however, following the events of the annexation of the Crimean Peninsula and the full-scale invasion of Russia, Ukraine is entering into gas supply agreements with various suppliers, including the European Union and the United States.

Wind energy is also helping to create new jobs in rural and urban areas where wind farms and manufacturing centers are being built. This contributes to economic growth and reduced unemployment, and creates opportunities for training and skills development in the field of renewable energy.

The development of wind energy is accompanied by constant technological progress. Thanks to innovation and research, it is possible to increase the efficiency and reliability of wind turbines, as well as reduce the cost of production. This makes wind energy more affordable and competitive.

Many governments around the world recognize the importance of wind energy development and provide various types of support, including financial incentives and tax breaks. This helps to accelerate the growth of this industry and make it more attractive to investors and businesses.

Taking into account all the above-mentioned aspects, wind energy becomes a more integral and relevant part of the modern energy system. It not only contributes to environmental sustainability, but also contributes to strengthening energy security and economic development, making it necessary for the future of the planet and humanity.

The scientific novelty of the obtained results of the dissertation work: in the two-disk aerodynamic model, for the first time, the presence of a traverse as elements of a wind turbine in the form of various classic symmetrical profiles NACA 0012, 0015, 0018, 0021 is taken into account, the influence of the variability of the local Reynolds number of the flow around the blade elements is also taken into account, which changes from the position of the blade in wind wheel and the relative velocity of the wind flow directly on each element of the blade in the zone of the outlined volume in the wind wheel. A software module was created for the calculation of a Darrieus type wind generator, which allows you to set only the global geometric parameters of the wind turbine and choose a profile from the ones that have already been worked out, namely: NACA 0012, 0015, 0018, 0021, as well as add new profiles - by entering aerodynamic coefficients into already created database of aerodynamic characteristics of aerodynamic profiles. The influence of the blade installation angle, the number of

blades, their length, etc., on the energy characteristics of wind turbines has been analyzed.

In this dissertation work, a new and improved method of calculating the energy characteristics of the Darrieus rotor depending on the local Reynolds number was obtained. In the classical two-disc scheme for calculating the air flow, the fact that individual elements of the blade flow around each one with its relative velocity of the oncoming flow is not taken into account, so each element of the blade has its own local Reynolds number. The wind flow in the defined volume is already somewhat "crumpled", it loses some part of its undisturbed speed due to the work of moving the wind turbine blades and transferring part of its kinetic energy to them.

The obtained analytical expressions and program codes helped to investigate the influence of various geometric parameters on the operation of the wind turbine model. The obtained theoretical and analytical data can be taken as a basis for further experimental research in the field of wind energy.

It has been also established that a variation of the installation angle of the blades can be recommended to increase the efficiency of the turbines. The proposed methodology can be used for further research related to the design and operation of a vertical-axial wind turbine.

Key words: *vertical-axis wind turbine, Darrieus rotor, two-disk impulse model, blade, Reynolds number, mathematical simulation, speed coefficient, wind flow, torque coefficient, power coefficient, aerodynamic profile.*

Основні наукові результати дисертації опубліковано у роботах

1. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

Scopus

DOI: 10.1088/1755-1315/897/1/012001.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/897/1/012001>

2. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti, Volodymyr Karplyuk. Improving the efficiency of Darrieus rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*. 2022. Volume 8. P. 788 – 794.

Scopus, видання, віднесене до другого квартиля Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.162>

3. Гоман О.Г., Рожкевич А.О. Аеродинамічний розрахунок вітрової турбіни Дар'є в залежності від різних типів профілів та місцевого числа Рейнольдса. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2023. В.36. С.40 – 48.

Видання категорії Б.

<https://doi.org/10.15421/4223104>

Тези наукових доповідей

1. Рожкевич А.О., Л.И. Кныш. Использование двухдисковой импульсной теории для расчёта вертикально-осевого ветрогенератора. *Матеріали XIX Міжнародної молодіжної конференції «Людина і космос»*. м. Дніпро. 2017. С.123.

2. Rozhkevych A.O., Goman O.G., Tsvetaeva O.V. The use of a double-disk impulse theory to calculate the vertical – axis wind turbine. *МАТЕРІАЛИ ІХ Регіональної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Сучасні науково – технічні дослідження у контексті мовного простору» (іноземними*

мовами). Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. м.Дніпро. 23-24 квітня 2020 року. С.55–57.

3. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *4th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 27-30 August 2021, Florence, Italy (Virtual). Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

4. Рожкевич А.О. Моделювання аеродинаміки ротора Дар'є. *VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка»*. Інститут гідромеханіки Національної академії наук. м. Київ, 27-28 вересня 2022. С.66–68.

**Статті у наукових виданнях України, що додатково відображають
результати дисертації**

1. Рожкевич А. О., О.Г. Гоман, Л.І. Книш. Оцінка впливу кількості лопатей на енергетичні показники вітроагрегату з вертикальною віссю обертуту. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка. Вип. 26. т.5*. 2018. С. 16 – 24.

2. Гоман О.Г., Рожкевич А.О., К.В. Геті. Розрахунок ротору Дар'є в залежності від змінного числа Рейнольдса. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка.2020. Вип. 24.С. 69–79*.