

Серілко Л. С., к.т.н., доцент, Стадник О. С., к.т.н., доцент, Сасюк З. К., к.с.-г.н., доцент, Серілко Д. Л., к.т.н., доцент, Ігнатюк Р. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОТОРА ДАР'Є

Метою даної роботи було вирішення проблеми самозапуску ротора Дар'є без оснащення його додатковим ротором Савоніуса. В запропонованій конструкції вітроенергетичної установки (ВЕУ) лопаті встановлені з можливістю обертатися навколо вертикальних осей. В період пуску ВЕУ працює як лопатевий вітродвигун, а при досягненні необхідної частоти обертання переходить в режим ротора Дар'є. Для визначення коефіцієнта опору лопаті, яка має профіль NASA 0015, був проведений розрахунок поля швидкостей турбулентного поля повітря, який включав чисельне розв'язання рівнянь Рейнольдса для нестисливого потоку газу. Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції та адекватності отриманих аналітичних залежностей було виготовлено експериментальну установку. Проведені дослідження показали, що запропонована конструкція з рухомими лопатями дозволяє підвищити коефіцієнт використання енергії вітру на 25–33% та зменшити матеріаловитрати на 18–23%.

Ключові слова: ротор Дар'є; ротор Савоніуса; крутний момент; частота обертання; швидкість вітру.

Нині генерація вітрової енергії відбувається за допомогою вітроенергетичних установок (ВЕУ) з горизонтальною або вертикальною осями обертання. У ВЕУ з горизонтальною віссю обертання профіль лопаті має складну форму, яка виготовляється з авіаційною точністю, що призводить до збільшення її вартості. Крім того, вісь ротора потрібно спрямовувати в напрямку вітру за допомогою спеціальних механізмів.

ВЕУ з вертикальною віссю обертання в основному оснащені ротором Дар'є, основним недоліком яких є наявність малого стартового крутного моменту, в результаті чого виникає проблема

запуску цих пристроїв. Для того, щоб розкрутити ротор до необхідної частоти, генератор приводять в режим двигуна. Це потребує використання енергії ззовні і ускладнює систему керування ВЕУ. Деякі конструкції для запуску комплектують додатково роторами Савоніуса. Останні мають значний стартовий крутний момент, який необхідний для розгону ротора до необхідної частоти обертання. При збільшенні коефіцієнта швидкохідності лопаті Савоніуса створюють гальмівний момент, який негативно впливає на загальну енергетичну ефективність ВЕУ [1; 2]. Вирішення цієї проблеми сприятиме зменшенню вартості ВЕУ та витрат на її експлуатацію.

В результаті аналізу аеродинаміки ротора Дар'є [3] встановлено, що збільшення кута атаки лопаті від 0° до 4° призводить до збільшення коефіцієнта потужності з 0,4 до 0,61, тобто в 1,5 рази. Оптимізація геометричних параметрів таких ВЕУ може призвести до збільшення коефіцієнта потужності до величини 0,72, що є значно більшим від максимального теоретичного значення для ВЕУ з горизонтальною віссю обертання.

В роботі [4] проведено дослідження аеродинаміки ВЕУ, яка оснащена роторами Дар'є та Савоніуса. Встановлено, що розміщення ротора Савоніуса в центральній частині установки призводить до суттєвого зниження крутного моменту.

Визначення впливу безрозмірного радіуса RL (відношення радіусів ротора Савоніуса до ротора Дар'є при їх однаковій висоті) на потужність та крутний момент ВЕУ приведено в роботі [5]. Встановлено, що чим більша величина RL , тим менший коефіцієнт потужності і вищий коефіцієнт крутного моменту ВЕУ.

В роботі [6] наведено результати експериментальних досліджень комбінованої ВЕУ на основі роторів Дар'є та Савоніуса, які встановлені під ротором Дар'є та над ним. Оснащення ВЕУ роторами Савоніуса призводить до збільшення стартового моменту, але при цьому її потужність зменшується на 20–25%.

Результати експериментальних досліджень гібридної турбіни, в якій ротор Савоніуса розміщений всередині ротора Дар'є, наведено в роботі [7]. Відношення висоти ротора Савоніуса до ротора Дар'є δ змінювалося в межах від 1,5 до 0,5. Встановлено, що при $\delta=1,4$ турбіна має коефіцієнт потужності $C_p=0,2$ і коефіцієнт крутного моменту $C_T=0,129$. У такій гібридній турбіні, в порівнянні з ротом Дар'є потужність збільшується на 48%, а крутний момент на 29%.

Дослідження роботи комбінованої ВЕУ з роторами Дар'є і Савоніуса [8] показали, що закріплення ротора Савоніуса посередині ротора Дар'є дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії турбіни до 20%. Схожі результати теоретичних досліджень роботи ротора Дар'є – Савоніуса наведено в роботах [9; 10; 11]. Один із варіантів підвищення стартового крутного моменту ротора Дар'є запропоновано в роботі [12].

Для вирішення проблеми самозапуску ротора Дар'є без встановлення додаткового ротора і зменшення потужності авторами була запропонована конструкція ВЕУ з рухомими лопатями, зображена на рисунках 1–5 [13].

Ротор 1 ВЕУ встановлений у втулці 2 містить паралельні траверси 3, в цапфах яких шарнірно закріплені лопаті 4, які мають аеродинамічний профіль. На траверсах 3 розміщені стержні 5 та 6, які обмежують рух лопатей.

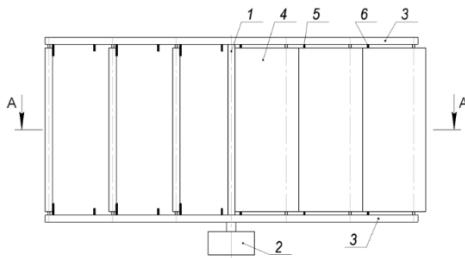


Рис. 1. Схема ВЕУ при роботі в режимі вітроподвигуна

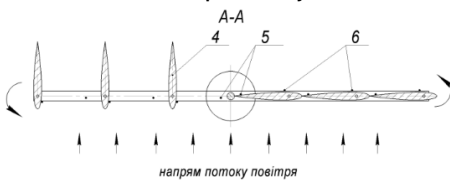


Рис. 2. Горизонтальний переріз А-А

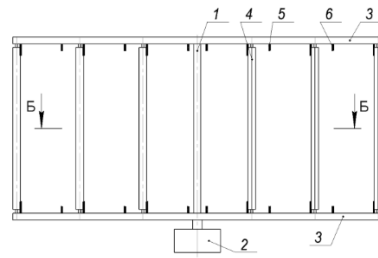


Рис. 3. Схема ВЕУ при роботі в режимі ротора Дар'є

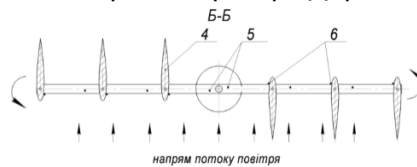


Рис. 4. Горизонтальний переріз Б-Б

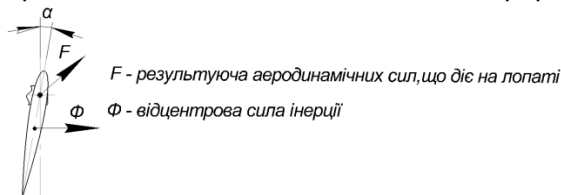


Рис. 5. Схема сил, що діють на лопать ВЕУ

Принцип роботи ВЕУ. При мінімальній швидкості вітру лопаті 4, які знаходяться з одного боку ротора 1, повертаються навколо осей, опираються на стержні 5 і сприймають вітровий потік, внаслідок чого ротор починає обертатися. Лопаті, які знаходяться з іншого боку ротора, повертаються навколо своїх осей, займають флюгерне положення і пропускають потік повітря, але, оскільки вони мають аеродинамічний профіль, то внаслідок піднімальної сили на роторі виникає додатковий позитивний крутний момент. При збільшенні швидкості вітру, а отже, і частоти обертання ротора, внаслідок відцентрової сили інерції Φ , лопаті, які були паралельні до траверси, повертаються навколо осей і опираються на стержні 6, які встановлені таким чином, щоб забезпечити оптимальний кут атаки α . Таким чином, в цьому випадку вітроенергетична установка буде працювати як ротор Дар'є, який має значно більший ККД (0,4–0,5) ніж ВЕУ з ротором лопатевого типу. При зменшенні швидкості вітру, а отже, і частоти обертання ротора зменшується і відцентрова сила інерції, яка діє на лопаті, які під дією вітрового потоку знову повертаються у положення, коли будуть паралельними до траверс. Отже, при незначній швидкості вітру ВЕУ працює як лопатевий вітродвигун, а при збільшенні швидкості вітрового потоку і частоти обертання ротора переходить у режим роботи ротора Дар'є.

Теоретичні дослідження величини піднімальної сили лопаті проведено для простих профілів (тонка пластинка, дужка) при кутах атаки α до 20° [14]. При цьому встановлено, що коефіцієнт опору пропорційний $\sin^2 \alpha$.

Для визначення максимального крутного моменту від тиску вітру на лопать в момент пуску, розглянемо положення ротора, зображене на (рис. 6). Якщо лопать нерухома, то сила тиску буде дорівнювати виразу (1) [15].

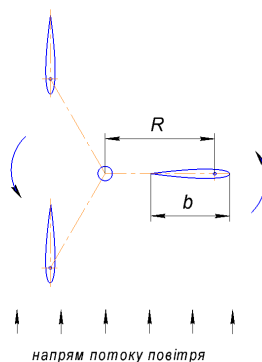


Рис. 6. Схема положення ротора при визначенні максимального крутного моменту

$$F = C_x \frac{\rho S}{2} V^2, \quad (1)$$

де F – сила тиску повітряного потоку (Н), ρ – густина повітря $1,29$ (кг/м³), C_x – коефіцієнт опору, який залежить від форми поверхні, значення якого для деяких тіл наведено в [15; 16].

Для аеродинамічного профілю NASA такі дані відсутні, тому були проведені розрахунки в полі швидкостей турбулентного потоку при обтіканні лопаті вітрогенератора. Ці розрахунки включали чисельне розв'язання рівняння Рейнольдса для нестисливого потоку газу з врахуванням гіпотези Бусінеска і рівняння k - ε моделі турбулентності [17].

Рівняння Рейнольдса (рівняння Нав'є – Стокса усереднені по Рейнольдсу) для нестисливого потоку газу з врахуванням гіпотези Бусінеска:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \nu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f, \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0, \text{ с}^{-1}, \quad (3)$$

де u_i, u_j – усереднені компоненти вектора швидкості, м/с; t – час, с; p – усереднений тиск, Па; ρ – густина повітря, кг/м³; k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ν – кінематична в'язкість, м²/с; ν_t – турбулентна кінематична в'язкість, м²/с; f – вектор зовнішніх сил (враховує силу тяжіння, відцентрову силу та силу Коріоліса), м/с²; $i=1...3, j=1...3$.

Кінематична турбулентна в'язкість визначалася за формулою

$$\nu_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (4)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ε – дисипація турбулентної енергії, м²/с³; $C_v=0,09$.

Значення k та ε визначалися з відомих k - ε моделей турбулентності

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t G + \varepsilon, \text{ м}^2/\text{с}^3, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t G + C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \text{ м}^2/\text{с}^4, \quad (6)$$

де G – турбулентна енергія; $\sigma_k=1$, $\sigma_\epsilon=1,3$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$ – параметри моделі.

Турбулентна енергія визначалася за формулою

$$G = \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{k}{\nu_t} \right) \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (7)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Моделювання руху газу виконувалося із застосуванням програмного забезпечення FlowVision 2.5.4 та КОМПАС 3D-V18. На рисунках 7, 8 наведено результати розрахунку поля швидкостей вітрового потоку для профілю NASA 0015 при величині $V=70$ мм.

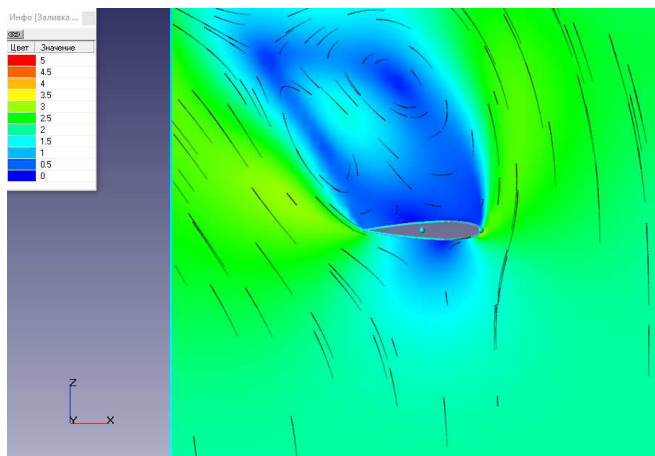


Рис. 7. Поле швидкостей вітрового потоку при швидкості вітру $V=2$ м/с

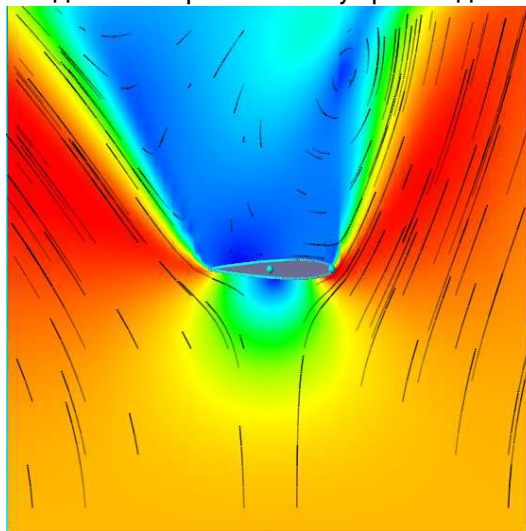


Рис. 8. Поле швидкостей вітрового потоку при швидкості вітру $V=4$ м/с

Залежності коефіцієнта опору від різних швидкостей вітрового потоку наведено на рис. 9.

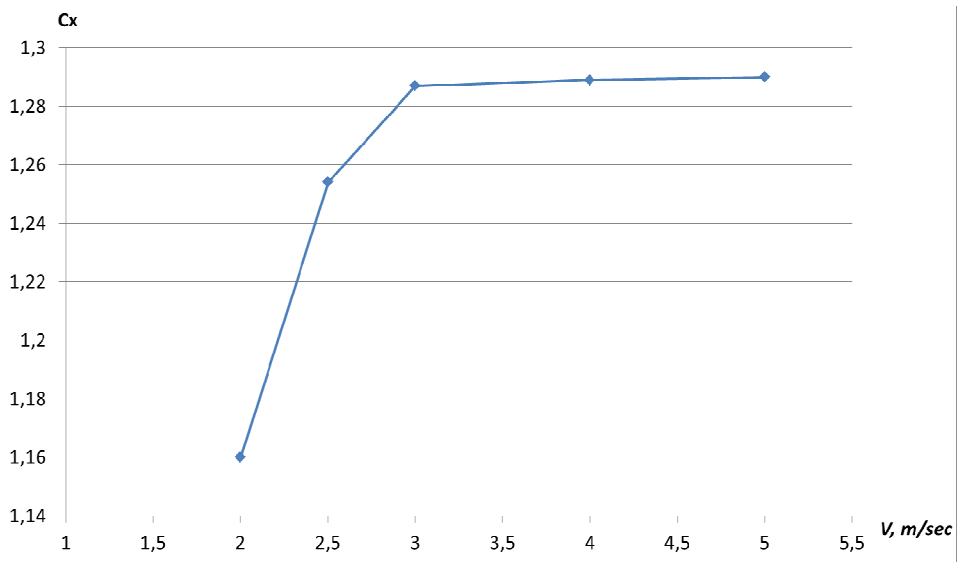


Рис. 9. Залежність коефіцієнта опору лопаті швидкості вітрового потоку

Як видно з рис. 9, коефіцієнт опору залежить від швидкості вітрового потоку і стає постійною величиною при швидкості 3 м/с.

Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції та адекватності теоретичних досліджень було виготовлено експериментальну установку, загальний вигляд якої наведено на рис. 10.

Експериментальна установка складається з вала 1, який закріплений у підшипниковому вузлі 2. Для зменшення сили опору траверси виготовлені у вигляді двох тонких дисків 3, в яких встановлені шпильки 4 з розміщеними лопатями 5. Для обмеження повороту лопатей або їх фіксації на дисках 3 закріплені стержні 6. До траверси 3 прикріплений канат 7, який перекинута через блок 8. До другого кінця канату прикріплена чаша з вантажами 9.

На першому етапі експериментальних досліджень визначали мінімальну швидкість вітрового потоку, при якому ротор починає обертатися. Швидкість вітрового потоку визначалася за допомогою анемометра. При цьому розглядалися два варіанти:

1 – лопаті ротора нерухомі, тобто класична схема ротора Дар'є;

2 – лопаті могли обертатися навколо власних осей, тобто на початку роботи ротор починав працювати в режимі лопатевого вітродвигуна.



Рис. 10. Загальний вигляд експериментальної установки

На другому етапі визначалася сила тиску на лопать в залежності від швидкості вітру. В результаті проведеного експерименту встановлено, що необхідна швидкість вітру для запуску запропонованої конструкції ВЕУ знаходиться в межах 0,9–1,2 м/с, тоді як для запуску класичного ротора Дар'є становить 3,9–4,1 м/с.

Значення крутного моменту, отримані експериментальним шляхом, дещо менші від теоретичних, оскільки не було враховано тертя в підшипниках.

Висновки: 1. Запропонована конструкція ротора Дар'є з рухомими лопатями дозволяє збільшити величину стартового крутного моменту, що вирішує проблему самозапуску ВЕУ і призводить до збільшення виробленої енергії.

2. Старт ротора Дар'є з рухомими лопатями розпочинається при швидкості вітру 0,9–1,2 м/с, а з нерухомими лопатями при 3,9–4,1 м/с.

3. Коефіцієнт опору лопаті профілю NASA 0015 залежить від швидкості вітру і змінюється від 1,16 до 1,289, що наближається до коефіцієнта опору прямокутної пластинки.

4. Потужність запропонованої конструкції ВЕУ на 25%–33% більша потужності гібридної установки, яка оснащена додатковими роторами Савоніуса, а матеріалоемність менша на 18–23%.

1. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д. Довідник з основ вітроенергетики / під ред. технологічного університету. Дніпро : НГУ, 2015. 335 с. 2. Горелов Д. Н. Полуэмпирический метод расчета оптимальных геометрических параметров ротора Дарье. *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. № 3. Т. 56. С. 96–104. 3. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Анализ аэродинамических параметров и энергетической эффективности вертикально-осевых ветроустановок. *Вестник Астраханского государственного технического университета* / ред. Н. Т. Берберова. Астрахань : Астраханский государственный технический университет (АГТУ), 2018. № 1(65). Рр. 76–77. 4. Дзензерський В. А., Тарасов С. В. Математичне моделювання аеродинаміки вертикально-осьової вітрової електростанції з ротором Дар'є і Савоніуса Ж. *Проблеми чисельної механіки та механічного проектування*. Дніпропетровськ, 2012. С. 96–97. 5. Sahim K., Santoso D., Puspitasari D. Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius. *2 International Journal of Rotating Machinery*. Indonesia, 2018. Vol. 2018. 6. Шишкин Н. Д. Оценка параметров вертикально-осевых ветродвигателей для энергоустановок маломерных судов. Судовые энергетические установки и машинно-двигательные комплексы. *Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология*. 2018. № 3. С. 93–100. 7. Puspitasari D., Sahim K. Effect of Savonius blade height on the performance of a hybrid Darrieus-Savonius wind turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. Vol. 13, Issue 4. Pp. 5832–5847. 8. Siddiqui A. S., Alam M., Memon A. H., Mian S. N., Haq M. S., Jamil M. S. Experimental study to assess the performance of combined Savonius Darrieus vertical axis wind turbine at different arrangements *Pakistan 21st IEEE Inter : Multi-Topic Conf. (INMIC)*. (Karachi: Hamdard Univ, Fac Engn Sci & Technol), 2018. 9. Fertahi S., Bouhal T., Rajad O., Kousksou T., Arid A., Jamil A., Benbassou A. CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus *J. Energy conversion and management*. 2018. Vol. 169. Pp. 266–278. 10. Xiaoting L., Sauchung F., Baoxing O., Chili W., Christopher Ch., Kaihong P. A computational study of the

effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. *Renewable Energy, Elsevier*. 2018. Vol. 113. Pp. 329–334. **11.** Wakui T., Tanzawa Y., Hashizume T., T. Nagao. Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems *J. Electrical engineering in Japan*. 2005. Vol. 150(4). Pp. 13–22. **12.** Schatter W. Is the use of wind energy inland of interest – Project wind energy of the technical-college-wiesbaden: *Brennstoff-warme-kraft*. 1993. Vol. 45, Issue 1–2. Pp. 60–61. **13.** Вітроелектростанція з вертикальним ротором: пат. № 136289 Україна: Опубл. 12.08.19, Бюл. № 15. / Серілко Л. С., Сасюк З. К., Лук'яничук О. П., Серілко Д. Л., Стадник О. С. **14.** Лоицианский Л. Г. Механика жидкости и газа. Основная редакция физико-математической литературы издательства. М. : Наука, 1973. 847 с. **15.** Фатев Э. М. Ветрогенераторы и ветрогенераторы. М. : Сельхозиздат, 1956. 535 с. **16.** Ershina A. K., Kaptagay G. A. Theory of sailing wind turbine. *Inter. J. of Appl. and Basic Res.* 2011. Vol. 6. Pp. 128–131.

REFERENCES:

1. Pivniak H., Shkrabets F., Noiberher N., Tsyplenkov D. Dovidnyk z osnov vitroenerhetyky / pid red. tekhnolohichnoho universytetu. Dnipro : NHU, 2015. 335 s. **2.** Gorelov D. N. Poluempiricheskii metod rascheta optimalnykh geometricheskikh parametrov rotora Dare. *Prikladnaya mehanika i tehniceskaya fizika*. 2015. № 3. T. 56. S. 96–104. **3.** Shishkin N. D., Ilin R. A. Analiz aerodinamicheskikh parametrov i energeticheskoy effektivnosti vertikalno-osevykh vetroustanovok. *Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta / red. N. T. Berberova*. Astrahan : Astrahanskiy gosudarstvenniy tehniceskii universitet (AGTU), 2018. № 1(65). Pp. 76–77. **4.** Dzenzerskyi V. A., Tarasov S. V. Matematychno modeliuвання aerodynamiky vertykalno-osovoi vitrovoi elektrostantsii z rotorom Darie i Savoniusa Zh. *Problemy chyselnoi mekhaniky ta mekhanichnoho proektuvannya*. Dnipropetrovsk, 2012. S. 96–97. **5.** Sahim K., Santoso D., Puspitasari D. Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius. *2 International Journal of Rotating Machinery*. Indonesia, 2018. Vol. 2018. **6.** Shishkin N. D. Otsenka parametrov vertikalno-osevykh vetrodvigateley dlya energoustanovok malomernykh sudov. Sudovyye energeticheskie ustanovki i mashinno-dvijitelnyye kompleksyi. *Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tehnika i tehnologiya*. 2018. № 3. S. 93–100. **7.** Puspitasari D., Sahim K. Effect of Savonius blade height on the performance of a hybrid Darrieus-Savonius wind turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. Vol. 13, Issue 4. Pp. 5832–5847. **8.** Siddiqui A. S., Alam M., Memon A. H., Mian S. N., Haq M. S., Jamil M. S. Experimental study to assess the performance of combined

Savonius Darrieus vertical axis wind turbine at different arrangements *Pakistan 21st IEEE Inter : Multi-Topic Conf. (INMIC)*. (Karachi: Hamdard Univ, Fac Engn Sci & Technol), 2018. **9.** Fertahi S., Bouhal T., Rajad O., Kousksou T., Arid A., Jamil A., Benbassou A. CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus *J. Energy conversion and management*. 2018, 169. Pp. 266–278. **10.** Xiaoting L., Sauchung F., Baoxing O., Chili W., Christopher Ch., Kaihong P. A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. *Renewable Energy, Elsevier*. 2018. Vol. 113. Pp. 329–334. **11.** Wakui T., Tanzawa Y., Hashizume T., T. Nagao. Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems *J. Electrical engineering in Japan*. 2005. Vol. 150(4). Pp. 13–22. **12.** Schatter W. Is the use of wind energy inland of interest – Project wind energy of the technical-college-wiesbaden: *Brennstoff-warme-kraft*. 1993. Vol. 45, Issue 1–2. Pp. 60–61. **13.** Vitroelektrostantsiia z vertykalnym rotorom: pat. № 136289 Ukraina: Opubl. 12.08.19, Biul. № 15. / Serilko L. S., Sasiuk Z. K., Lukianchuk O. P., Serilko D. L., Stadnyk O. S. **14.** Loitsianskiy L. G. *Mehanika jidkosti i gaza. Osnovnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literaturyi izdatelstva. M. : Nauka, 1973. 847 s.* **15.** Fatev E. M. *Vetrogeneratoryi i vetrogeneratoryi. M. : Selhozizdat. 1956. 535 s.* **16.** Ershina A. K., Kaptagay G. A. Theory of sailing wind turbine. *Inter. J. of Appl. and Basic Res*. 2011. Vol. 6. Pp. 128–131.

Serilko L. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Stadnyk O. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Sasiuk Z. K., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Serilko D. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Ihnatiuk R. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

ANALYSIS AND STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE DARRIEUS ROTOR

Wind turbines with a vertical axis of rotation are mainly equipped with a Darrieus rotor, the main disadvantage of which is the presence of a small starting torque, which causes the problem of starting these devices. To spin the rotor up to the required rotation speed, the generator is brought into engine mode. Some designs of

wind turbines for start-up are additionally equipped with Savonius rotors. Such rotors have a significant starting torque, which is necessary to accelerate the rotor to the required speed of rotation. When the speed coefficient increases, the Savonius blades create a braking moment, which negatively affects the overall energy efficiency of the wind power plant. Equipping the wind turbine with Savonius rotors, which are placed above or below the Darrieus rotor, leads to an increase in the starting torque, but at the same time its power decreases by 20–25%. Studies of the operation of a combined wind turbine with Darrieus and Savonius rotors have shown that fixing the Savonius rotor in the middle of the Darrieus rotor makes it possible to increase the efficiency of the turbine by up to 20%.

The purpose of this work was to solve the problem of self-starting the Darrieus rotor without equipping it with an additional Savonius rotor.

In the proposed design of the wind turbine, the blades are installed with the ability to rotate around vertical axes. During the start-up period of the wind power plant, it works as a bladed wind engine, and when the required rotation frequency is reached, it switches to the Darrieus rotor mode. To determine the drag coefficient of the blade, which has a NASA 0015 profile, the calculation of the velocity field of the turbulent air flow was carried out, which included the numerical solution of the Reynolds equations for an incompressible gas flow. To confirm the operability of the proposed design and the adequacy of the obtained analytical dependencies, an experimental setup was made. Conducted studies have shown that the proposed design with moving blades allows to increase the coefficient of wind energy utilization by 25–33% and reduce material consumption by 18–23%.

Keywords: Darrieus rotor; Savonius rotor; torque; rotation speed; wind speed.
