

## МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.548.5

**Лук'янчук О. П., к.т.н., доцент, Серілко Д. Л., к.т.н., асистент, Єрмолін А. Р., студент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНИМ РОТОРОМ**

Метою статті є дослідження варіантів збільшення ефективності роботи вітроподвигуна вітроенергетичної установки (ВЕУ). Проаналізовано можливі варіанти конструкції вітроподвигуна. Створено модель конструкції вертикальної ВЕУ і проведено відповідні теоретичні дослідження. Визначено вагомість впливу конструктивних параметрів на ефективність робочого процесу. Визначено раціональні значення параметрів вітроподвигуна.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, ротор, енергія вітру, лопать, конструкція.

**Постановка проблеми.** Головне призначення вітроенергетичних установок – це перетворення енергії вітру в електроенергію. Постійно зростаюча ціна на електроенергію та іншу енергетичну сировину зробить вітроелектричні установки звичайним обладнанням для постачання житла людини електрикою. Спрощено, ВЕУ складається з ротора, генератора і щогли, на якій закріплена ця конструкція. При розгляді всього комплексу, в якому ВЕУ займає головне місце, додаються: контролер заряду блоку акумуляторів, акумуляторні батареї, інвертор, електрична мережа. Тривалість роботи мережі споживачів визначається кількістю акумуляторів і їх місткістю [1].

Загальний коефіцієнт корисної дії існуючих ВЕУ невеликий і приблизно однаковий: вертикальних 20-30% і горизонтальних 25-35%. Незважаючи на те що у вітряків з горизонтальною віссю обертання трохи вище ККД і нижча швидкість початку обертання, у вертикальних вітряків вищий коефіцієнт використання енергії вітру [2; 3].

Вертикальні ВЕУ мають деякі ключові переваги: 1) можливість обертання без залежності від напрямку вітру; 2) потужність установки обмежується тільки висотою щогли і потужністю інвертора; 3) набагато нижчий шумовий фон (до 20-50 дБ); 4) менша небезпека для птахів, бджіл та доквілля; 5) висока стійкість до сильних поривів віт-

ру; 6) легка і проста конструкція для транспортування та спорудження; 7) використання у ширшому діапазоні швидкостей вітру (2–50 м/с); 8) порівняно невелика швидкість обертання ротора збільшує ресурс роботи окремих елементів установки тощо.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження вітроенергетичної установки з вертикальним ротором присвячена велика кількість наукових робіт. Тут слід відмітити роботи Овчарова С. В., Телюти Р. В., Буряка А. В. [1; 2].

Недоліком існуючих конструкцій ВЕУ з вертикальним ротором є наявність моменту сил опору, який виникає внаслідок протидії вітровому потоку долішньої частини лопаті при її переході з робочого у флюгерне положення, що призводить до зменшення потужності вітродвигуна [2].

**Методика досліджень.** Теоретичні дослідження базувались на загальних положеннях теоретичної механіки та динаміки вітряного потоку. Аналітично-графічний аналіз виконувався з допомогою ЕОМ з використанням прикладних програм із застосуванням методів статистичного опрацювання результатів досліджень.

**Результати досліджень.** Для зменшення моменту сил опору, а отже, збільшення ефективності роботи вітродвигуна було розроблено ряд конструкцій, які захищені патентами на корисні моделі [4–6]. На даний час проводяться дослідження щодо вдосконалення конструкції ротора з метою максимізації загального ККД ВЕУ.

В досліджуваних ВЕУ новою є конструкція ротора. Ротор 1 містить лопаті 2, кожна з яких зв'язана з втулкою 3 ротора, за допомогою траверс 4 і цапф 5 і 6, а втулка 3 підшипника 7 і 8 з'єднана з нерухомим вертикальним валом 9, який закріплений на нерухомій платформі 10 (рис. 1). На траверсах 4 розміщені стержні 11, які обмежують повертання лопатей у робочому положенні.

ВЕУ працює наступним чином. При мінімальній швидкості вітру лопаті 2, які знаходяться на одній частині ротора, повертаються навколо вертикальних осей і займають флюгерне положення і пропускають потік повітря, а лопаті, які знаходяться на іншій частині ротора, опираються на стержні 11 і сприймають потік повітря, внаслідок чого ротор починає обертатись. Працездатність конструкції ротора ВЕУ підтверджена на дослідній моделі (рис. 2). Оскільки сумарний момент інерції декількох лопатей з малим відношенням ширини лопаті до її висоти менший ніж момент інерції однієї лопаті, яка має таку саму площу, то окремі лопаті будуть швидше займати флюгерне

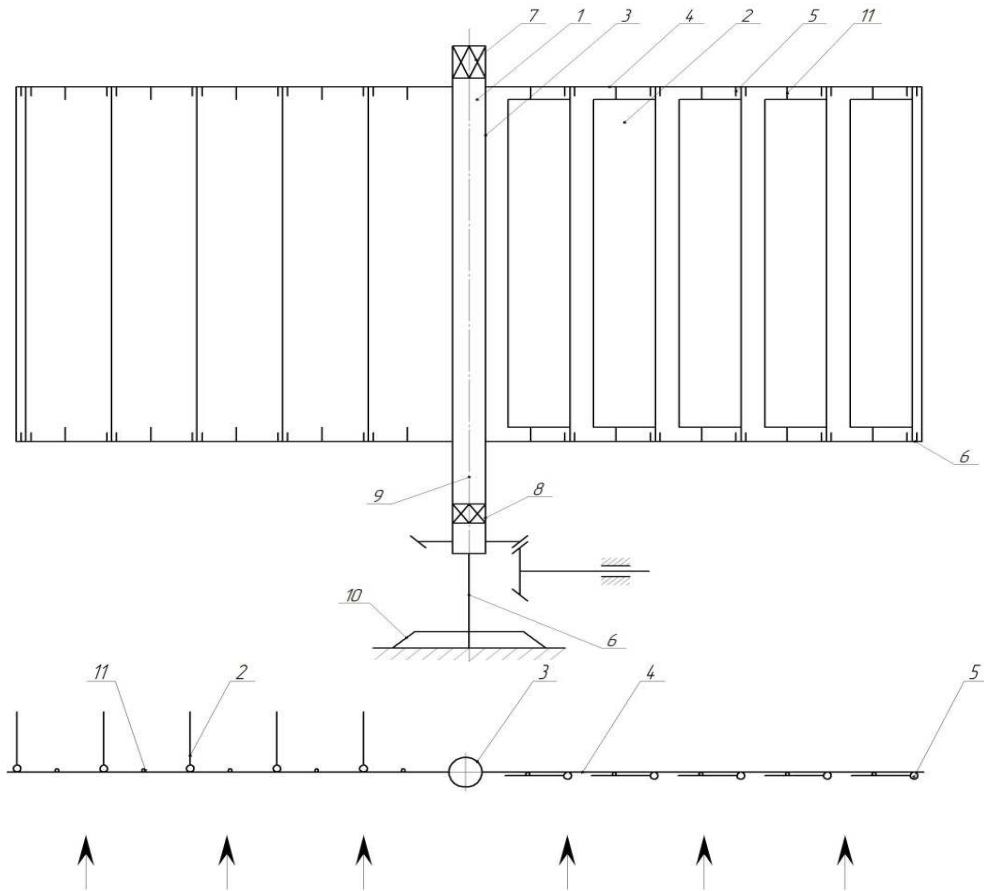


Рис. 1. Конструкція ротора ВЕУ

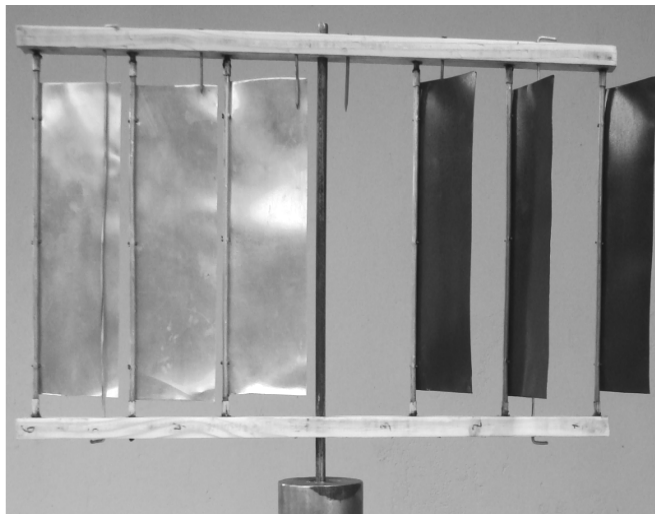


Рис. 2. Дослідна модель ротора ВЕУ  
положення в неактивній частині, тим самим зменшиться момент сил

опору, що збільшує ефективність роботи вітроенергетичної установки. Виконання лопатей з малим відношення ширини лопаті до її висоти зменшує вітрове навантаження на окремі лопаті, що призводить до зменшення маси конструкції пристрою в цілому.

Розрахункова швидкість вітру для горизонтальних ВЕУ (ГВЕУ) переважно знаходиться у межах 12-15 м/с за умови міцності лопатей на інерційні навантаження. Проте для деяких районів із великим вітровим потенціалом такі значення інколи є недостатніми, оскільки при цьому виявляються недовикористаними надто великі вітроенергетичні ресурси. Конструкція вертикальних ВЕУ (ВВЕУ) така, що робочий діапазон швидкостей вітру може підвищуватися до 20-25 м/с, що надає їм перевагу в використанні у районах із високими середньорічними швидкостями вітру.

Відповідно до методики аналізу даних метеоспостережень встановлено, що для Рівненського регіону на висоті анемометра максимальна швидкість вітру  $V_{\phi}$  становить 13 м/с, а значення вітрового навантаження становить 500 Па.

Поверхня, яку охоплює вітроколесо ГВЕУ, визначається площею круга, який утворюється кінцями лопатей, що обертаються. Для ВВЕУ така поверхня визначається як площа прямокутника зі сторонами, що дорівнюють довжині лопаті та діаметру турбіни. Отже, поверхня, яку охоплює ВВЕУ, утворюється вигіднішим способом, оскільки прямокутна поверхня може змінюватися не тільки за рахунок зміни довжини лопатей, але й за рахунок діаметра їх обертання, що розширює можливості зміни параметрів ВЕУ під час її проектування та експлуатації [2].

Енергія повітряного потоку, яка відбирається з одиниці довжини лопаті ГВЕУ, незважаючи на закручування лопаті, значно змінюється від місця закріплення до зовнішнього краю лопаті через збільшення швидкості. У ВВЕУ значення цієї енергії також дещо змінюється за довжиною лопаті, однак ця зміна залежить тільки від якості енергії вітрового потоку: наявності поривів вітру, нерівномірності швидкості вітру за висотою.

Проте у ВВЕУ є й інші причини втрат енергії, яка відбирається з потоку повітря: неоптимальні кути атаки в різних положеннях лопаті на колі обертання, зменшення обертових моментів у положеннях, коли лопать рухається вздовж потоку повітря або коли проходить «аеродинамічну тінь» башти [2].

Ще одним джерелом втрат енергії у ВВЕУ є горизонтальні або нахилені траверси, на яких встановлюються лопаті. Коефіцієнт лобо-

вого тиску, наприклад циліндричної траверси, – 0,35-0,45. Отже, потрібно констатувати, що ефективність відбору енергії вітру лопатями установок обох типів є приблизно однаковою.

Енергетичний потенціал визначається рівнем питомої потужності вітрового потоку, тобто потужністю, віднесеною до 1 м<sup>2</sup> площі та перпендикулярній напрямку вітру [1; 2]:

$$N(V) = k_m \cdot \rho \cdot V^3,$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість вітру, м/с.  $k_m$  – метеорологічний коефіцієнт.

В середньому густина повітря становить  $\rho = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>, але вона відчутно залежить від температури та тиску. Якщо врахувати метеорологічні умови Рівненського регіону, то метеорологічний коефіцієнт набуває наступних значень: 0,559 – для зими, 0,527 – для весни та осені, 0,508 – для літа.

У випадку вітрового колеса з двома симетричними відносно осі рамками (рис. 3, а) вона визначається за формулою

$$P_{II} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^3}{2} \cos \alpha,$$

де  $F$  – площа поверхні, яку огинає ротор ВЕУ з радіусом  $R$ , м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – кут між лінією вітрового потоку і проекцією її на перпендикуляр до лопаті.

Із рівняння видно, що  $P_{II}$  буде max тоді, коли вітровий потік буде перпендикулярний до лопаті, тобто  $\alpha = 0^\circ$ , а мінімальне значення  $P_{II}$  буде рівне «нулю» при  $\alpha = 90^\circ$ , тобто при розташуванні рамок вздовж напрямку вітрового потоку. Це говорить про наявність миттєвого (так званого «мертвого положення») при запуску ВЕУ. Тому для усунення цього недоліку пропонуємо виконувати вітроколесо з кількістю рамок  $n > 2$  (рис. 3, б, в).

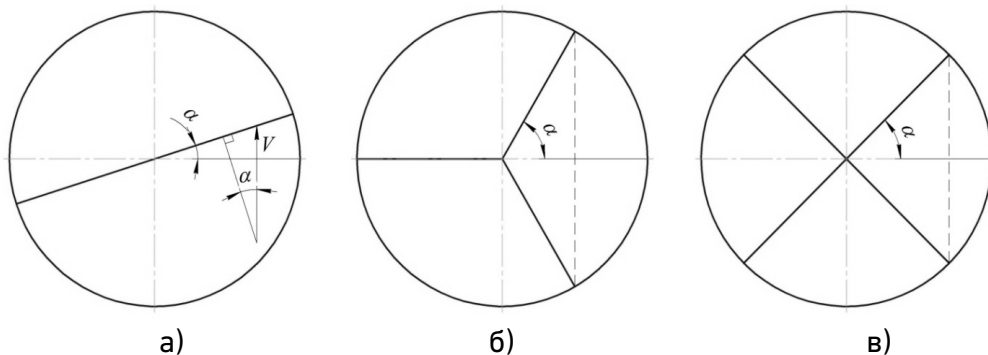


Рис. 3. Варіанти побудови вітроколеса ВЕУ:

а) –  $n = 2$ ; б) –  $n = 2$ ; в) –  $n = 2$

Побудуємо залежність потужності на вітроколесі від кута повороту при різній кількості рамок з лопатями. Для побудови графічної

залежності приймемо,  $F=8\text{ м}^2$ . Залежність  $P_{\Pi}$  від  $\alpha$  наведено на графіку (рис. 4).

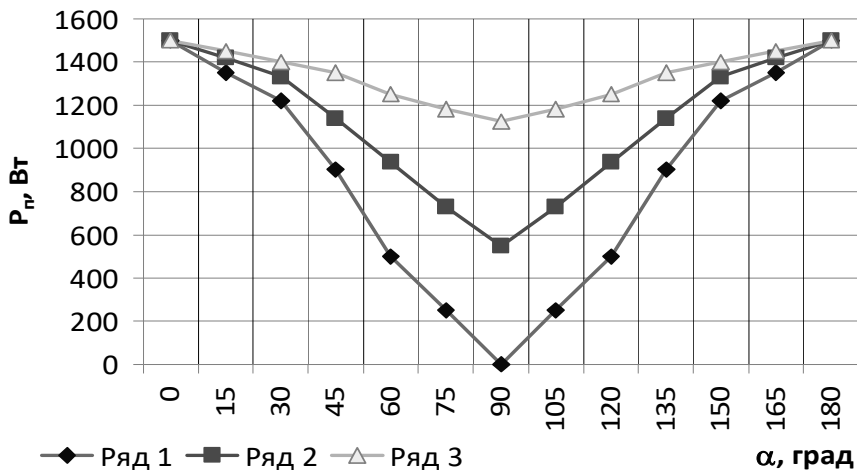


Рис. 4. Залежність потужності потоку від кута повороту ротора:  
Ряд 1 –  $n=2$ ; Ряд 2 –  $n=3$ ; Ряд 3 –  $n=4$

Як видно з побудованих графічних залежностей, збільшення кількості рамок вітроколеса не тільки усуває «мертве положення», а й вирівнює навантаження на ротор за рахунок взаємного перекриття підвітряних зон суміжними рамками. При чому кількість рамок більше 4 скоріше всього буде недоцільним.

$P_{\Pi}$  буде max так само тоді, коли вітровий потік буде перпендикулярний до лопаті, тобто  $\alpha=0^\circ$ , а от мінімальне значення  $P_{\Pi}$  буде отримуватись при  $\alpha=\pi/n$

$$P_{\Pi} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^3}{2} \cos \frac{\pi}{n}.$$

Під коефіцієнтом використання енергії вітру розуміється відношення механічної потужності, яка розвивається ВЕУ, до механічної потужності повітряного потоку, що протікає через простір, який огинається робочими поверхнями (крилами або лопатями) цього ВЕУ. В міжнародній вітроенергетиці прийнято позначити коефіцієнт використання енергії вітру  $C_p$  і називати «Сі Пі фактор». Теоретично доведено, що для ідеального вітродвигуна, в якому не враховуються ніякі втрати, величина  $C_p$  не може бути більшою 0,593. Ця величина отримала назву ліміт Бетца і за визначенням є величиною безрозмірною [3].

Повертаючись до рис. 3, можна оцінити максимальний ККД за-

пропонованої ВЕУ, він буде пропорційний розміру середньої за оберт підвітряної площі лопатей. Згідно рисунку ККД буде лежати в межах 35-45%, при  $n=2...4$ , максимальне значення 45% отримаємо при  $n=4$ .

Швидкохідність вітродвигуна – це відношення лінійної швидкості найбільш віддаленої від осі обертання вітродвигуна точки рамки (визначається радіусом ротора і його частотою обертання) до швидкості вітру, який прийнято позначити символом. Швидкохідність за визначенням є величиною безрозмірною. Рахується, що вітродвигун є тихохідний, якщо  $<2$ , і швидкохідний, якщо  $4$  [2].

Високий ступінь швидкохідності передбачає використання спеціальних пристроїв та систем для утримання кутової швидкості обертання у певних межах, що дуже ускладнює конструкцію установки. Стабільність доволі високої частоти обертання зумовлює спрощення трансмісійних зв'язків вітроколеса з генератором та доволі високу якість електроенергії без ускладнення перетворювальних електричних схем. Водночас максимальна кутова швидкість обертання вітроколеса обмежується міцністю лопатей у зв'язку із зростанням інерційних навантажень.

В усіх відомих експериментальних дослідженнях швидкохідність ВВЕУ не перевищувала 3,5 модулів, що спричиняло незначну кутову швидкість обертання. Тому для використання у складі ВВЕУ швидкохідних низькомоментних навантажень (електрогенератор, осьові та відцентрові компресори тощо) необхідною умовою є застосування мультиплікатора із значним передавальним відношенням, що знижує ККД установки, підвищує її питому матеріаломісткість та вартість виробленої енергії. Також необхідно відзначити, що у тихохідних ВВЕУ виникають значно більші крутні моменти. Це призводить до підвищення матеріаломісткості лопатей за рахунок довгих траверс, габаритної маточини та масивних трансмісій. Під час експлуатації вертикально-осьових установок необхідно враховувати нестабільність частоти обертання, що вимагає уведення в електричну схему спеціальних перетворювачів з метою покращення якості електроенергії. Конструктивно ВВЕУ може бути і швидкохідною, проте обмеженням у цьому випадку буде міцність лопатей за дії у їх попередньому перерізі інерційних навантажень [2].

Швидкохідність визначається за допомогою виразу:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V},$$

де  $\omega$  – швидкість обертання вітроколеса, рад/с;  $R$  – радіус вітроколеса;  $V$  – швидкість вітру [1; 2].

Максимальний крутний момент розраховують за допомогою наступного виразу:

$$M_{\max} = W_{\max} \cdot R, \quad W_{\max} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^2}{2},$$

де  $W_{\max}$  – максимальне навантаження, Н, яке діє на вітроколесо.

Крутний момент для запропонованої конструкції ВЕУ залежить від швидкості вітрового потоку в параболічній залежності (рис. 4).

Необхідний додатковий кількісний аналіз усього комплексу характеристик ВЕУ на основі теоретичних та модельно-експериментальних досліджень з метою отримання даних про ефективність використання вітроустановок в економічних та метеорологічних умовах конкретного регіону.

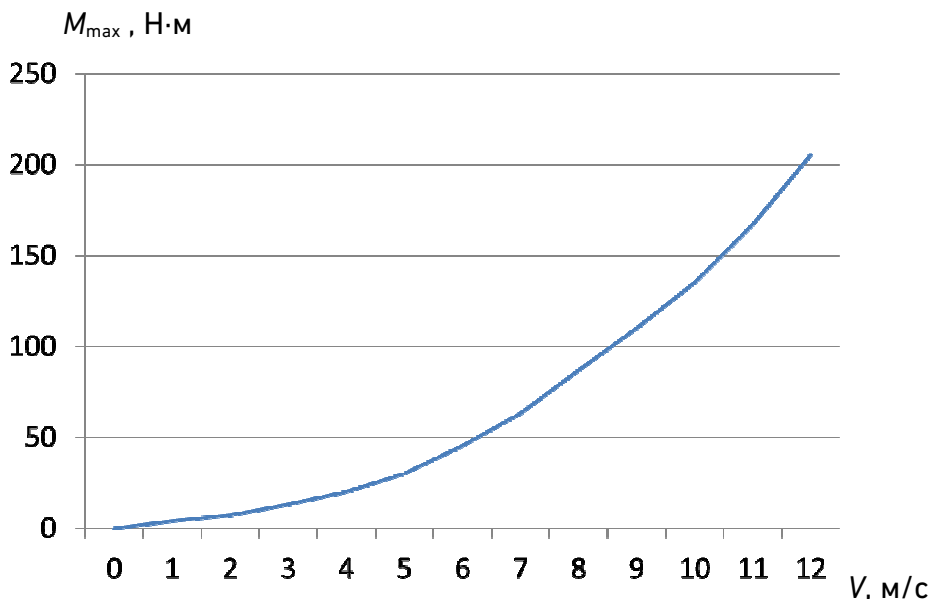


Рис. 4. Залежність максимального крутного моменту  $M_{\max}$ , Н·м від максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с

Однією схемою, як і одним типорозміром ВЕУ, неможливо задовольнити потреби всіх споживачів навіть однієї країни. Вітроенергетика як підгалузь енергетики стане конкурентоспроможною тільки за умови розвитку різних напрямків, які здатні створити державний ринок вітроенергетичної техніки.

**Висновки.** Для збільшення ефективності роботи вітрогенератора розроблено конструкцію ВЕУ з рухомими лопатями, вітроколесо якої пропонується виконувати з кількістю рамок  $n > 2$ .

Максимальне ККД ВЕУ можна отримати в межах 35-45%, при



$n=2...4$ , максимальне значення отримаємо при  $n=4$ , що є вищим ніж в існуючих вертикальних ВЕУ.

Виконання лопатей з малим відношення ширини лопаті до її висоти зменшує вітрове навантаження на окремі лопаті, що призводить до зменшення маси конструкції пристрою в цілому.

1. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д. Основи вітроенергетики : підручник. Д. : НГУ, 2015. 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.
2. Кузьо І. В., Корендій В. М. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 679. С. 61–68.
3. <http://www.energyland.info/analiticshow52412>.
4. Патент України № 83687, F03D3/00, Бюл. № 18, 2013.
5. Патент України № 82387, F03D3/00, Бюл. № 14, 2013.
6. Патент України № 73385, F03D3/00, Бюл. № 16, 2009.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С. В. (НУВГП)

---

**Lukianchuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Serilko D. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Assistant, Yermolin A. R., Senior Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **RESEARCH OF WIND TURBINE EQUIPMENT WITH VERTICAL ROTOR**

**The purpose of the work is to study the options for increasing the efficiency of wind turbine wind turbine operation. Possible variants of the construction of the wind turbine are analyzed. The construction model of the vertical wind turbine has been created and relevant theoretical studies have been carried out. The importance of the influence of constructive parameters on the efficiency of the work process is determined. The rational values of the parameters of the wind turbine are determined.**

**Theoretical research were based on the general provisions of theoretical mechanics and dynamics of wind flow. An analytical and graphical analysis was performed using a computer using application software with the use of methods for statistical processing of research results.**

**Keywords:** wind turbine equipment, rotor, wind energy, blade, construction.

---

**Лукьянчук А. П., к.т.н., доцент, Серилко Д. Л., ассистент,  
Ермолин А. Р., студент** (Национальный университет водного  
хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РОТОРОМ**

**Целью статьи является исследование вариантов увеличения эффективности работы ветродвигателя ветроэнергетической установки (ВЭУ). Проанализированы возможные варианты конструкции ветродвигателя. Создана модель конструкции вертикальной ВЭУ и проведены соответствующие теоретические исследования. Определена значимость влияния конструктивных параметров на эффективность рабочего процесса. Определены рациональные значения параметров ветродвигателя.**

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ротор, энергия ветра, лопасть, конструкция.

---