

УДК 620.92

## **ОЦІНКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО РЕЗУЛЬТАТУ ВДОСКОНАЛЕННЯ АВТОНОМНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

**М.І. Трегуб**, канд. техн. наук,  
**А.М. Рубець**, канд. техн. наук,  
**О.С. Василенко**, асист.  
*Білоцерківський НАУ*

*Теоретично проаналізовані методи розрахунку техніко-економічного результату вдосконалення автономної сільськогосподарської вітроенергетичної системи з мінімізованим пусковим опором безредукторної вітроустановки і адаптивним регулюванням навантаження з оцінкою статистичної моделі середніх швидкостей вітру на місцевості за розподілом Вейбула.*

**Ключові слова:** *стартові швидкості вітру, річна тривалість роботи ВЕУ, розподіл Вейбула, розрахунковий обсяг річного виробітку електроенергії, собівартість виробленої електроенергії, зведені витрати.*

**Актуальність.** Вирішення технічної проблеми підвищення ефективності використання низькопотенціальних вітрів дасть можливість розширити географію економічно доцільного застосування вітроустановок у сільській місцевості. Відомо, що протягом багатьох століть менш технічно досконалі вітрові млини в Україні працювали майже скрізь, навіть на місцевостях із середньорічною швидкістю вітру, близькою до 4 м/с, а тепер тут використання сучасних суттєво досконаліших вітроустановок часто вважається економічно недоцільним. Розробка безредукторних вітроенергетичних установок (БВЕУ) дозволяє [1] мінімізувати пусковий опір і починати роботу за мінімальних стартових швидкостей вітру, а система адаптивного регулювання навантаження [2] забезпечує енергоефективну роботу автономної вітроенергетичної системи в режимі змінних потужностей генерування і навантаження. За таких умов важливо оцінити очікуваний техніко-економічний результат на місцевостях із різними середньорічними швидкостями вітру.

**Стан проблеми.** Відомі методи оцінювання вітроенергетичного потенціалу місцевості не повністю враховували технічні можливості нових розробок безредукторних ВЕУ та систем адаптивного регулювання навантаження. У сучасній вітроенергетиці найбільш визнаною адекватною статистичною моделлю повторюваностей швидкостей вітру вважається теоретичний розподіл Вейбула [3], який забезпечує найбільш тісну кореляцію із результатами спостережень. Однак недостатньо висвітлені питання впливу поліпшених пускових характеристик ВЕУ на річну тривалість роботи та коефіцієнт використання встановленої потужності на підставі розрахунків за розподілом Вейбула. Крім того більшість відомих розрахунків потенціально можливого виробітку електроенергії з вітру не враховують можливостей адаптивно змінного електронавантаження.

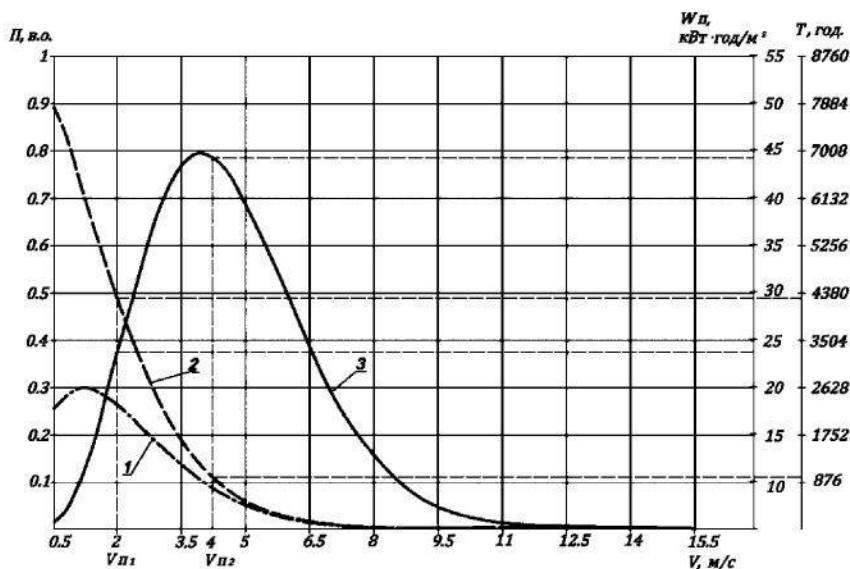
**Мета досліджень.** Обґрунтувати методи техніко-економічної оцінки результатів удосконалення автономної сільськогосподарської вітроенергетичної системи на базі безредукторної ВЕУ з адаптивним регулюванням навантаження.

**Методи досліджень.** Теоретичний аналіз техніко-економічних показників виконувався методом порівняння питомих зведених затрат різних варіантів ВЕУ із різними стартовими швидкостями вітру та використанням закону розподілу Вейбула на місцевостях із різною вітровою активністю. Дослідження проводились із використанням пакетів прикладних програм Mathcad 14 та Matlab R2007b.

**Результати досліджень.** Відомі методики оцінювання економічної ефективності впровадження наукових розробок [4] базуються на певних існуючих цінових показниках, а також можуть враховувати прогнозовану динаміку цін у межах терміну окупності. Специфіка оцінки нових технічних засобів повнолюваної енергетики викликана соціальним попитом, який проявляється у формі коефіцієнтів «зеленого» тарифу. Так, наприклад, для електроенергії, виробленої вітроелектростанціями, що складаються із вітроустановок одиначної встановленої потужності до 600 кВт, введених у експлуатацію до 31.12.2014р., коефіцієнт «зеленого» тарифу становить 1,20. Державна форма стимулювання розвитку вітроенергетики, крім тарифної політики, передбачає також пільгове оподаткування. Проте не менш важливим фактором є ринковий попит на вітроенергетичні установки. Для використання у якості автономних джерел енергозабезпечення індивідуальних будинків найбільший ринковий попит [5] мають типорозміри ВЕУ, які не підлягають оподаткуванню, а це такі, встановлена потужність яких не перевищує 5 кВт.

Тобто оцінювати економічну ефективність ВЕУ можна за різними методиками залежно від типу системи енергоживлення та наявних альтернативних варіантів для порівняння. Для різних варіантів використання ВЕУ відповідний рівень їх удосконалення має різну економічну вагомість. Найбільш відпрацьовані методики розрахунку економічних показників для великомасштабних вітроенергетичних проектів, де всі ВЕУ працюють на загальну електроенергетичну систему з відомими тарифами на передачу в мережу електроенергії. Електроенергетична система для приєднаних до неї ВЕУ відіграє роль акумуляційного навантаження необмеженої потужності. Однак вхід у систему досить жорстко регламентований за параметрами напруги і частоти ВЕУ. Особливо невизначеним вважається режим початку роботи ВЕУ на енергосистему за мінімальних пускових і робочих швидкостей вітру. З іншого боку за максимальних робочих швидкостей вітру такі ВЕУ повинні зберігати стан синхронізму із системою за рахунок обмеженого приймання наявної вітрової енергії підтриманням сталих обертів. Таким чином навіть сучасні найбільш енергоефективні електромережеві ВЕУ далеко не повністю використовують свої технічні можливості приймання вітрової енергії (ВЕ). Крім того передавання електроенергії ВЕУ в мережу ще не означає її повне ефективне використання там, оскільки момент підвищення швидкості вітру може не збігатися із графіком навантажень енергосистеми.

Адаптивна система на базі безредукторної АВЕУ порівняно навіть із описаною досконалою енергомережевою системою ВЕУ, за теоретичними розрахунками має принципову перевагу по енергоефективності. Першим вагомим аргументом є відсутність трансмісії, що у порівнянні з багатоступінчастими мультиплікаторами підвищує ККД не менше ніж на 20%. Другим важливим результатом є принципове підвищення ефективності використання низькошвидкісних вітрів за рахунок запропонованого нового типу генератора, у якому реалізовано нові системи електромеханічного перетворення вітрової енергії та мінімізації магнітного моменту потоків збудження. Тобто вітроустановка такого типу починає працювати за менших пускових швидкостей вітру, що кількаразово збільшує річний період роботи. Для прикладу це можна показати на графіку (рис. 1), як за рахунок кращих стартових показників БВЕУ збільшується річний термін її роботи в умовах Київської області, де середня річна швидкість вітру близько 4 м/с.



**Рис.1.** Статистичний розподіл повторюваності швидкостей вітру на місцевості з середньою річною швидкістю вітру близько 4 м/с за градацією Вейбулла (1) та розрахункова річна тривалість роботи ВУ (2) і залежність питомого річного виробітку електроенергії за різних стартових швидкостей вітру (3)

Диференційна повторюваність швидкостей вітру  $f(V)$  за градаціями Вейбулла описується залежністю:

$$f(V) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}}, \quad (1)$$

де  $V$  — швидкість вітру, м/с;  $\beta$  — параметр статистичного масштабу (чисельно близька величина до середнього річного значення швидкості вітру на місцевості за результатами спостережень);  $\gamma$  — параметр статистичної щільності (форми кривої розподілу).

Раніше подібні залежності будували за даними Поморцева і Гуллена [6], однак розподіл Вейбулла дає більш достовірні статистичні показники.

Річна тривалість роботи вітроустановки визначається інтегральною сумою добутків значення швидкості вітру на відносну річну тривалість її

повторюваності. Залежно від стартової швидкості вітру вітроустановка працюватиме відповідний період протягом року. Так, наприклад, якщо пускова швидкість однієї вітроустановки  $V_{II}$  становить 4 м/с, а іншої  $V_{III}$  відповідно 2 м/с., то річна тривалість роботи першої на даній місцевості становитиме близько 1157 годин, тоді, як другої близько 4283 годин, або у 3,7 разів більше. Даний приклад показує важливість технічного удосконалення вітроустановки для мінімізації стартових швидкостей вітру.

Питомий річний виробіток електроенергії для місцевого вітроенергетичного потенціалу також можна оцінити за графіком розподілу швидкостей згідно градації Вейбула. Потужність вітродвигуна діаметром  $D$  розраховується за відомим [6] виразом, що враховує сталу густину повітря:

$$N = 0.000481 \cdot D^2 \cdot V^3 \cdot \xi, \text{ кВт} \quad (2)$$

де  $\xi$  — аеромеханічний ККД вітродвигуна (коефіцієнт використання вітрового потоку), в.о.;  $D$  — діаметр вітродвигуна, м

А у розрахунку на  $1\text{ м}^2$  об'ємної площі вітродвигуна питома потужність буде:

$$N_n = 0.000481 \cdot V^3 \cdot \xi, \text{ кВт / м}^2 \quad (3)$$

Тоді питомий річний виробіток електроенергії визначатиметься сумою добутків питомої потужності на річну тривалість швидкостей вітру:

$$W_n = N_n \cdot t_p, \text{ кВт} \cdot \text{год. / м}^2 \quad (4)$$

Теоретичні дослідження показують, що при пуску за меншої швидкості вітру, наприклад, не 4 м/с, а 2 м/с, що можливо у випадку застосування безредукторної вітроенергетичної установки, річний питомий виробіток електроенергії зростає на 37,4 %.

Такий незаперечний фактор підвищення обсягів річного виробітку енергії, як збільшення річної тривалості роботи, особливо відчутно зростає при використанні розробленої і виготовленої пересувної ВЕУ на колісній платформі [7], яка дає можливість використовувати в польових умовах локальні вітрові максимуми денного посилення вітру. Третім важливим аргументом підвищення енергоефективності автономної вітроенергетичної системи є адаптивне регулювання селективного енергоутилізаційного навантаження [2], що дає можливість безперервно реалізовувати алгоритм максимального перетворення прийнятої енергії вітру в корисну роботу технологічного навантаження. За умови забезпечення ВЕУ різнотиповими групами енергоутилізаційного навантаження досить очевидною є технічна можливість безперервного приймання максимальної

ВЕ за рахунок самоорганізації адаптивної системи шляхом реалізації алгоритму максимальної енергоефективності. У порівнянні із енергомережевою вітроенергетичною системою (ВЕС) за рахунок адаптивного регулювання загальний ККД процесу перетворення ВЕ теоретично може бути вищим на 25...30%, що підтверджується даними розрахунків багатьох подібних систем.

При порівнянні економічної ефективності різних ВЕУ однакового призначення і класу найбільш універсальними є відносні та питомі показники. Так найбільш інтегральним економічним показником роботи ВЕУ є собівартість виробленої 1 кВт·год. електроенергії. Річний обсяг виробленої електричної енергії визначають [6] за формулою:

$$Wh = 4.81 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 (\sum V^3 \cdot t \cdot \xi \cdot \eta + \sum t) \cdot K_e \cdot K_n, \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (5)$$

де  $Wh$  — річний обсяг генерованої ВЕУ електроенергії, кВт·год.;  $D$  — діаметр кола обертання кінців лопатей вітродвигуна, м;  $V$  — швидкість вітру, м/с;  $\eta$  — загальний ККД електрогенератора, в.о.;  $t$  — тривалість роботи ВЕУ з навантаженням, год.;  $K_e$  — експлуатаційний коефіцієнт ВЕУ, в.о.;  $K_n$  — коефіцієнт передачі генерованої енергії до навантаження, в.о.

Даним виразом визначається обсяг виробленої електричної енергії лише за умови безперервного підключення енергоспоживача необмеженої потужності, наприклад, електромережі, або адаптивно-регульованого енергоутилізаційного навантаження. Однак певна складність виникає при визначенні ціни електричної енергії різної якості, виробленої автономною вітроенергетичною установкою (АВЕУ) і переданої у навантаження після різних стадій перетворення. Тому було прийнято для АВЕУ однакову ціну виробленої електроенергії, використаної у навантаженні. За таких умов оцінку економічної ефективності визначали у порівнянні розробленого та базового варіанту АВЕУ. За базовий варіант прийнято АВЕУ однакового типу і потужності традиційної конструкції з синхронним генератором, приєднаним до вітродвигуна через механічний мультиплікатор із передавальним числом 20. Це відповідає реальним технічним даним експериментальної моделі номінальною потужністю 5 кВт. Тоді згідно методики [4] розраховується річний економічний ефект за формулою:

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{[(C_1 + E_H \cdot K_1) - (C_2 + E_H \cdot K_2)]}{Wh_p}, \quad \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}, \quad (6)$$

де  $C_1, C_2$  — собівартість 1 кВт·год., виробленої відповідно на АВЕУ базової та нової розробленої конструкції;  $K_1, K_2$  — капітальні затрати базового і нового

варіантів;  $E_n$  — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, який прийнятий при розробці нової техніки  $E_n = 0,2$ ;  $Wh_p$  — річний обсяг енергії.

Для розробленої автономної вітроенергетичної системи [2] доцільно виконати структуровану економічну оцінку ефективності її впровадження окремо для процесів генерування і адаптивного регулювання навантаження. Обидві структурні складові загального економічного результату від впровадження системи оцінюються за показниками енергетичного ефекту, який можна розрахувати величиною питомих зведених затрат за формулою:

$$Z_{II} = \frac{\sum Z}{Wh} = \frac{(\Pi + K_p + A)}{Wh}, \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}, \quad (7)$$

де  $\Pi$  — середньорічні затрати на обслуговування, грн;  $A$  — середня річна вартість використання витратних матеріалів, грн;  $K_p$  — річна складова капіталовкладень, грн.

$$K_p = E_n \cdot \sum K_i + \sum k_a \cdot K_i = \frac{\sum K_i}{T_n} + \sum k_a \cdot K_i, \text{ грн.}, \quad (8)$$

де  $T_n$  — нормативний термін окупності, років;  $K_i$  — капіталовкладення на АВЕУ із врахуванням транспортних і монтажних витрат, грн.;  $k_a$  — коефіцієнт амортизаційних відрахувань.

Для окремої ВЕУ питомі зведені витрати можна визначати за виразом:

$$Z = \frac{[(E_n + k_a) \cdot K + \Pi + A]}{Wh_p}. \quad (9)$$

Тобто оцінка економічного результату буде виконуватися загальноприйнятим показником собівартості однієї кВт·год середньорічного обсягу виробленої АВЕУ електроенергії.

Однак отримання коректних абсолютних показників складових річних витрат для нової конструкції розробленої ВЕУ практично неможливе, тому економічний результат розраховували теоретичним порівнянням із базовим варіантом, у якого прийняті однаковими всі витратні складові, але різний обсяг річного виробітку електроенергії. Тоді економічний результат можна оцінити різницею зведених питомих витрат:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{[(E_n + k_a) \cdot K + \Pi + A]}{Wh_{p1}} - \frac{[(E_n + k_a) \cdot K + \Pi + A]}{Wh_{p2}}, \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}. \quad (10)$$

За розрахованою теоретичною різницею обсягів виробленої АВЕУ енергії на місцевості із середньорічною швидкістю вітру близько 4 м/с за визначеними пусковими швидкостями вітру відповідно 2 і 4 м/с та загального ККД генератора із врахуванням ККД мультиплікатора для трилопатевої ВЕУ діаметром 7 м прийнято 0,6. Якщо прийняти собівартість виробленої електроенергії АВЕУ базового варіанта середньостатистичним значенням 2,5 грн/(кВт·год.), то за прийнятих попередніх умов розрахункова собівартість енергії нового варіанта становитиме 1,5 грн/(кВт·год.), що менше на 40%. Таким чином першим показником економічної ефективності розробленої АВЕУ є зниження собівартості генерованої електроенергії на 40%.

За аналогічною методикою визначається економічна ефективність від застосування адаптивної селективної системи регулювання різнорідного навантаження. Технологічний результат адаптивного регулювання навантаження враховується при визначенні річного обсягу електроенергії за виразом (5) коефіцієнтом передавання генерованої енергії у навантаження  $K_{II}$ , який у такому разі порівняно із стохастичним режимом дорівнює одиниці. За стохастичного режиму енергоживлення навантаження середньостатистичний показник  $K_{II}$  теоретично завжди менший одиниці навіть для систем із сталими параметрами генерування. Оскільки швидкість вітру, від якої величина генерованої потужності залежить у кубі, також змінюється стохастично, то навіть значення показника  $K_{II}=0,5$  у базовому варіанті вважається задовільним результатом. Використання розробленої селективної адаптивної системи живлення навантаження передбачає не лише безперервне споживання усієї виробленої електроенергії, але і реалізацію алгоритму мінімальних втрат на стадіях енергетичного перетворення. Тобто раціональна енергоутилізація передбачає постійне споживання електричної енергії з різними стадіями параметричного перетворення, реалізуючи усю наявну енергію змінного за швидкістю вітру селективним живленням різнорідного енергоутилізаційного навантаження. За рахунок селективної самоорганізації режиму живлення різних груп навантаження ефективність енергоутилізації теоретично може бути вища, ніж у системі передачі в електромережу, де необхідні постійні енерговитрати на синхронізацію частоти і підтримання номінальної напруги. Якщо визначати співвідношення потужностей навантаження і генерування, то такий показник завжди буде меншим одиниці на величину відносних втрат під час параметричних і трансформаційних перетворень та передачі, а також за рахунок наявності реактивної складової загального опору.



**Висновки.**

1. Теоретично розрахований техніко-економічний результат вдосконалення безредукторної автономної вітроенергетичної установки полягає у збільшенні річної тривалості роботи за рахунок зниження стартових швидкостей вітру, зменшенні енергетичних втрат у механізмах мультиплікації та підвищенні ефективності процесу енергоутилізації за рахунок адаптивного регулювання навантаження.
2. Використовуючи функціональну залежність за розподілом Вейбула теоретично можливо визначити кількісне збільшення річної тривалості роботи ВЕУ і виробленої енергії на місцевостях із відомими значеннями середньорічних швидкостей вітру.

**Бібліографія**

1. *Трегуб М.І.* Обґрунтування геометричних параметрів ротора вітроустановки для пуску при малих швидкостях вітру/ М.І.Трегуб// Механізація та електрифікація сільського господарства: Міжвід. темат. наук. зб. — Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2009. — Вип. № 93. — С. 303-309.
2. *В.В. Козирський.* Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження автономних вітроенергетичних установок/ В.В. Козирський, М.І. Трегуб, А.В. Петренко//Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». — К., 2013. — Вип. № 184. — Ч. 2. — С. 10-17.
3. *Фаворський Ю.П.* Створення моделі оптимального співвідношення компонентів гібридних вітросонячних систем енергопостачання/Ю.П. Фаворський//Нова тема. — К., 2009. — № 3(22). — С. 8-12.
4. Основы научных исследований. Механизация сельского хозяйства. Василенко П.М., Погорелый Л.В. — К.: Вища школа, 1985. — 266 с.
5. *Клименко В.П.* Світові тенденції розвитку малої вітроенергетики і перспективи для України//Техніка і технології АПК, 2013. — № 10(49). — С. 9-12.
6. *Фатеев Е.М.* Ветро двигатели и ветроустановки / Е. М. Фатеев. — М.: Сельхозиздат, 1957. — 536 с.
7. *Трегуб М.І.* Обґрунтування методів підвищення аеродинамічної енергоефективності безредукторної вітроустановки із кільцевим ротором дугостаторного генератора/М. І. Трегуб, О.С. Василенко // Міжвід. темат. наук. зб. Механізація та електрифікація сільського господарства. — 2013. — Вип. № 98. — С. 370-379.

## **ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РЕЗУЛЬТАТА УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Теоретически проанализированы методы расчета технико-экономического результата усовершенствования автономной ветроэнергетической установки с минимизированным пусковым сопротивлением безредукторной ветроустановки и адаптивным регулированием нагрузки оценкой статистической модели среднегодовых скоростей ветра по распределению Вейбулла.*

**Ключевые слова:** *стартовые скорости ветра, годовая длительность работы ВЭУ, распределение Вейбулла, расчетный объём годового производства электроэнергии, себестоимость выработанной электроэнергии, приведенные затраты.*

## **EVALUATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC RESULTS OF IMPROVEMENT OF AGRICULTURAL AUTONOMOUS WIND POWER SYSTEM**

*A theoretical analysis methods for calculating of technical and economic result improvement autonomous wind power plant with minimized starting resistance gearless wind turbine and loadadaptive controlling with the statistical model of average annual wind speed by Weibull distribution.*

**Key words:** *start-upwind speed, annual duration of wind turbine, Weibull distribution, calculating quantity of annual electricity production, cost of produced electric energy, aggregated costs.*