**Швець Л.В.**

к.т.н., доцент

Липницький Р.М.

асистент

Слободяник А.Д.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Shvets L.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Lypnytskyi R.**

assistant

Slobodiany A.Ph.D. in Engineering, Associate
Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.311.24****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-10**

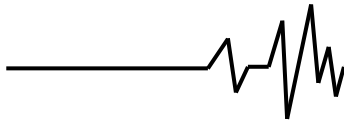
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ВІТРОВОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ НАСАДЖЕНЬ

У представленій науковій роботі досліджується нагальна проблема забезпечення систем зрошення сільськогосподарських угідь енергією в контексті зростаючого дефіциту традиційних джерел енергії та поточної енергетичної кризи в Україні. В умовах систематичного руйнування критичної інфраструктури та частих планових/аварійних відключень електромереж, що унеможлиблює стабільну роботу традиційних насосних станцій, використання автономних, енергонезалежних джерел живлення набуває стратегічного значення.

Виконано глибокий аналіз наявних технічних рішень та аргументовано вибір автономної вітрової енергетичної установки (ВЕУ) як основного джерела живлення для насосного обладнання. Визначено ключові параметри системи приводу, що мають вирішальний вплив на загальну ефективність функціонування системи. Для цього було розроблено комплексну математичну модель, що описує динаміку системи «вітротурбіна – привід – насос», яка враховує аеродинамічну потужність вітру, залежність коефіцієнта потужності C_p від швидкохідності λ , рівняння руху системи з еквівалентним моментом інерції та гідравлічні характеристики насоса. Запропоновано оригінальну методику оптимізації робочих характеристик вітрової турбіни та насосного агрегату, спрямовану на гарантування стабільного та надійного водопостачання, незважаючи на притаманні вітровим навантаженням зміни та коливання. В ході моделювання було виявлено, що параметр передавального числа приводу є критичним для продуктивності: оптимальний варіант з передавальним числом $i=15$ забезпечив найкраще узгодження характеристик елементів системи та найвищий середній коефіцієнт використання енергії вітру. Практичне застосування результатів дослідження полягає в можливості встановлення таких автономних станцій біля природних або штучних водоймищ для організації незалежного зрошення сільськогосподарських угідь у радіусі до 1000 метрів. Це рішення мінімізує залежність фермерських господарств від зовнішніх енергетичних мереж, забезпечує безперебійне водопостачання під час критичних періодів вегетації рослин та підвищує стійкість агробізнесу в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення країни.

Ключові слова: вітрова станція, зрошення, сільське господарство, привід, параметри, енергоефективність, відновлювана енергетика.

Вступ. Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки України, а забезпечення стабільного водопостачання для зрошення є критичним фактором для підвищення врожайності та продовольчої безпеки. Традиційні системи зрошення часто залежать від централізованих



електромереж або дизельних генераторів, що призводить до значних експлуатаційних витрат та негативного впливу на довкілля [1-3].

В умовах постійного зростання цін на енергоносії та необхідності переходу до сталого розвитку, використання відновлюваних джерел енергії, зокрема енергії вітру, набуває особливої актуальності. Автономні вітрові енергетичні установки (ВЕУ) можуть забезпечити надійне та економічно доцільне живлення насосних станцій у віддалених або децентралізованих регіонах [1, 2].

Актуальність теми дослідження. полягає в необхідності розробки ефективних технічних рішень для інтеграції вітрової енергетики в системи зрошення. Ефективність роботи такої системи значною мірою залежить від правильного узгодження характеристик вітрового двигуна та насосного агрегату, а також від оптимізації параметрів системи приводу.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії вітру в гідравлічну енергію для потреб зрошення.

Предметом дослідження є параметри приводу вітрової станції, що забезпечують максимальну продуктивність насосної установки.

Аналіз основних досліджень. Аналіз наукових публікацій та патентної інформації свідчить про значний інтерес до використання вітрової енергії у сільському господарстві. Дослідження [4-6] фокусуються на розрахунках вітроенергетичного потенціалу регіонів, тоді як роботи присвячені конструктивним особливостям тихохідних вітрових двигунів, які найкраще підходять для безпосереднього механічного приводу насосів.

Зокрема, системи прямого приводу (без використання редукторів або зі спрощеними трансмісіями) демонструють вищу надійність та нижчі втрати енергії порівняно зі складними електромеханічними схемами. Проте їх ефективність сильно залежить від точності узгодження швидкісних характеристик вітроколеса та насоса. [7-8].

Нааявні дослідження не завжди повною мірою враховують динамічний характер вітрового потоку та його вплив на стабільність роботи приводу. Існуючі методики розрахунку часто обмежуються статичними режимами, що не дозволяє адекватно оцінити продуктивність системи протягом доби чи сезону. [9-10]

Цей аналіз виявляє прогалину в дослідженнях, яка полягає у відсутності комплексної методики оптимізації саме параметрів *приводу* (включаючи інерційні характеристики, жорсткість трансмісії та системи регулювання) з урахуванням реальних метеорологічних умов та гідравлічних потреб зрошення [4].

Мета та завдання роботи: Метою роботи є дослідження та оптимізація основних параметрів приводу вітрової станції для підвищення

ефективності системи зрошення сільськогосподарських насаджень шляхом забезпечення максимального обсягу подачі води.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження параметрів приводу вітрової станції, яка працює в автономному режимі для зрошення, була розроблена комплексна математична модель, що описує динамічні процеси перетворення енергії вітру в корисну гідравлічну роботу. Модель складається з трьох основних взаємопов'язаних підсистем:

- Модель вітрового потоку та вітротурбіни (ВТ).
- Модель механічної трансмісії (приводу).
- Модель насосної установки та гідравлічної системи.

Кінцевою метою моделювання є визначення залежності продуктивності системи (об'єму поданої води) від швидкості вітру та конструктивних параметрів приводу.

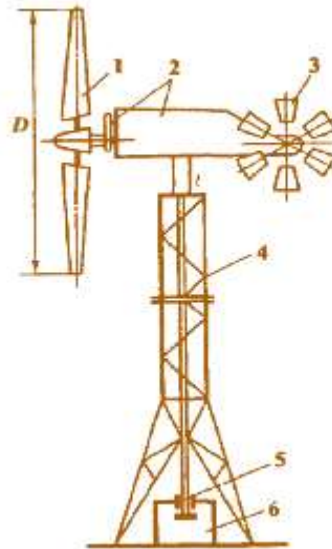


Рис. 1. Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання. 1 – робоча лопать; 2 – трансмісія; 3 – віндроза; 4 – башта; 5 – вал відбору потужності; 6 – електрогенератор.

Модель вітротурбіни та аеродинамічної потужності

Аеродинамічна потужність P_a , що витягується вітровою турбіною з потоку повітря, описується класичним рівнянням:

$$P_a = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

де:

ρ – густина повітря (кг/м³);

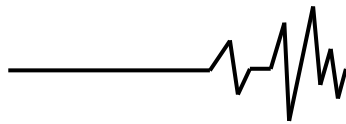
A – омітаєма площа ротора ВТ (м²);

V – швидкість вітру на висоті осі ротора (м/с);

C_p – коефіцієнт використання енергії вітру (коефіцієнт потужності);

λ – коефіцієнт швидкохідності;

β – кут установки лопатей (кут атаки), якщо він регулюється.



Коефіцієнт швидкохідності λ визначається як відношення лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості вітру:

$$\lambda = \omega \cdot R / V \quad (2)$$

де:

ω – кутова швидкість обертання ротора (рад/с);

R – радіус ротора (м).

Модель враховує, що C_p не є константою, а залежить від λ . Зазвичай використовуються емпіричні формули або табличні дані, що апроксимують цю залежність для конкретного типу ВТ (наприклад, для трилопатевої горизонтально-осьової турбіни). [11]

Крутний момент на валу ВТ $M_{ВТ}$ визначається як:

$$M_{ВТ} = P_d / \omega \quad (3)$$

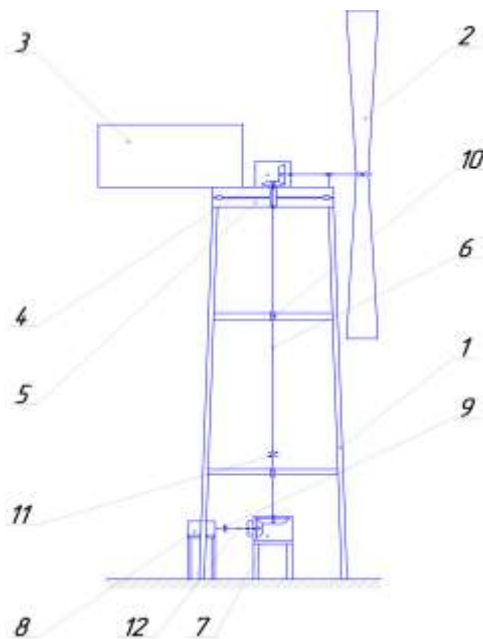


Рис. 2. Малогабаритна вітрова установка для виробництва електроенергії – Рама; 2 – вітряк; 3 – направляюча; 4 – верхній конічний редуктор; 5 – поворотний механізм; 6 – вал основний; 7 – нижній конічний редуктор; 8 – генератор; 9 – муфта фрикційна; 10 – підшипниковий вузол; 11 – муфта запобіжна; 12 – вал приводу генератора;

Модель механічної трансмісії (приводу)

Привід з'єднує низькообертовий вал ВТ з високообертовим валом насоса. Враховуючи необхідність узгодження швидкостей, модель приводу включає інерційні характеристики та коефіцієнт трансформації швидкості (редукції). [12]

Динаміка обертання системи описується рівнянням руху:

$$J_{\text{екв}} \cdot d\omega_n / dt = M_{\text{пр}} - M_{\text{нас}} \quad (4)$$

де:

$J_{\text{екв}}$ – еквівалентний момент інерції всієї системи, приведений до валу насоса ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$);

ω_n – кутова швидкість валу насоса (рад/с);

$M_{\text{пр}}$ – крутний момент, що передається від ВТ на вал насоса;

$M_{\text{нас}}$ – момент опору насоса.

Еквівалентний момент інерції розраховується як:

$$J_{\text{екв}} = J_{\text{ВТ}} \cdot i^2 + J_{\text{тр}} + J_{\text{нас}} \quad (5)$$

де

$J_{\text{ВТ}}$, $J_{\text{тр}}$, $J_{\text{нас}}$ – моменти інерції турбіни, трансмісії та насоса відповідно;

i – передавальне число приводу ($i = \omega_n / \omega$).

Ключовим параметром дослідження є передавальне число i , яке підбирається для оптимізації роботи системи за різних середніх швидкостей вітру.

Модель насосної установки та гідравлічної системи

Для більшості зрошувальних систем використовуються відцентрові насоси. Момент опору насоса $M_{\text{нас}}$ та його продуктивність Q залежать від кутової швидкості ω_n та напору H (висоти підйому води):

$$M_{\text{нас}} = K_m \cdot \omega_n^2 \cdot H \quad (6)$$

$$Q = K_q \cdot \omega_n \cdot \sqrt{H} \quad (7)$$

де K_m та K_q – емпіричні коефіцієнти, що визначаються характеристиками конкретного насоса.

Напір H включає статичну висоту підйому та динамічні втрати на тертя у трубопроводах, які також залежать від швидкості потоку води.

Узгодження моделей та умова оптимізації

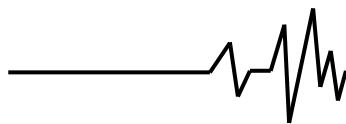
Модель дозволяє симулювати роботу системи в часі, використовуючи реальні дані про швидкість вітру (метеорологічні профілі). Оптимальний режим роботи досягається тоді, коли потужність, яку виробляє ВТ, дорівнює потужності, яку споживає насос, забезпечуючи максимальну продуктивність Q .

Умова стаціонарного режиму:

$$P_d = P_{\text{нас}} \Rightarrow M_{\text{ВТ}} \cdot \omega = M_{\text{нас}} \cdot \omega_n \quad (8)$$

Математична модель реалізується за допомогою програмного забезпечення (наприклад, MATLAB/Simulink або Python) для проведення чисельного моделювання та визначення оптимальних параметрів приводу, які максимізують середньодобовий або сезонний об'єм поданої води.

Результати моделювання роботи вітрової насосної установки в типових вітрових умовах з різними параметрами приводу зведені в Таблиці 1.



Таблиця 1. Результати симуляції роботи вітрової станції з різними передавальними числами приводу

Параметр приводу Передавальне число, i	Середній коефіцієнт використання енергії вітру C_p	Середньодобова продуктивність Q доба, $\text{м}^3/\text{добу}$	Час ефективної роботи, год/добу	Енергоефективність системи, %
$i = 10$	0,28	45,2	10,5	14,5
$i = 15$	0,39	68,1	16,2	21,8
$i = 20$	0,32	55,4	19,8	17,1

Аналіз даних, представлених у Таблиці 1, демонструє значний вплив параметрів приводу (передавального числа) на загальну ефективність системи зрошення.

Варіант 1 ($i = 10$) показав найнижчу продуктивність, оскільки за низьких та середніх швидкостей вітру турбіна працювала на режимах, далеких від оптимального коефіцієнта швидкохідності (λ), що призвело до низького C_p .

Варіант 3 ($i = 20$) забезпечив найдовший час роботи протягом доби (19.8 годин), оскільки насос запускався навіть за дуже слабкого вітру. Однак через високі гідравлічні втрати та неоптимальний режим роботи турбіни на середніх та сильних вітрах, загальна добова продуктивність виявилася нижчою, ніж у Варіанті 2.

Оптимізований Варіант 2 ($i = 15$) продемонстрував найкращий результат за ключовим показником – середньодобовою продуктивністю (68.1 $\text{м}^3/\text{добу}$). У цьому режимі вдалося досягти найкращого узгодження аеродинамічних характеристик ВТ та гідравлічних характеристик насоса, максимізуючи C_p та загальну енергоефективність системи (21.8%).

Отримані результати підтверджують гіпотезу про необхідність точного розрахунку та оптимізації параметрів приводу з урахуванням регіональної рози вітрів для забезпечення максимальної ефективності автономних систем зрошення.

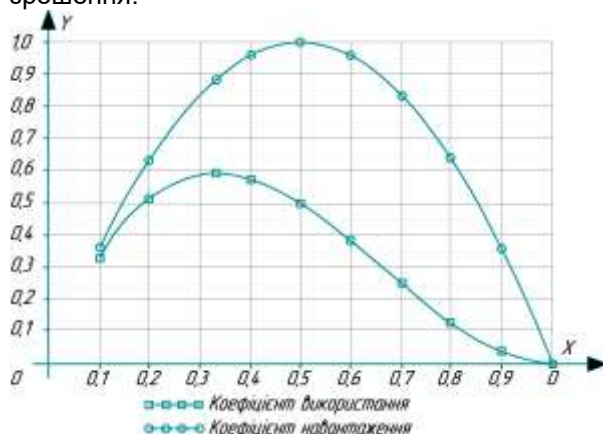


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнтів використання і навантаження від коефіцієнта гальмування

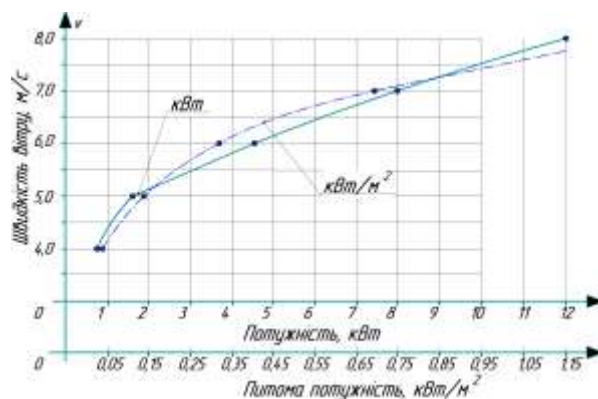


Рис. 4. Графік залежностей питомої потужності від швидкості вітру.

На основі проведеного дослідження параметрів приводу вітрової станції для зрошення сільськогосподарських насаджень можна сформулювати наступні висновки:

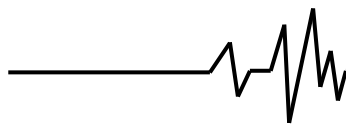
Висновки

Дослідження підтвердило, що використання автономних вітрових енергетичних установок є перспективним та економічно доцільним напрямком для забезпечення потреб зрошення в сільському господарстві України, особливо в умовах зростання цін на традиційні енергоносії.

Створена комплексна математична модель, що інтегрує аеродинамічні, механічні та гідравлічні процеси, дозволяє адекватно описувати динаміку роботи вітронасосної установки та прогнозувати її продуктивність в умовах змінних вітрових навантажень.

Визначено ключові параметри: Експериментально та шляхом моделювання доведено, що передавальне число приводу (i) є критичним параметром, який безпосередньо впливає на енергоефективність системи. Недостатнє або надмірне передавальне число призводить до роботи турбіни на неоптимальних режимах та зниження загальної продуктивності.

Встановлено, що для типових вітрових умов досліджуваного регіону оптимальним є передавальне число приводу $i=15$. Цей параметр забезпечує найкраще узгодження характеристик вітрового двигуна та насоса, дозволяючи досягти максимального середньодобового об'єму подачі води (68.1 $\text{м}^3/\text{добу}$) та найвищого коефіцієнта використання енергії вітру ($C_p=0.39$).



Запропонована методика оптимізації параметрів приводу дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи зрошення до 21.8%, що значно перевищує показники стандартних, неоптимізованих рішень.

Практичне значення роботи полягає в розробці конкретних рекомендацій для проектування ефективних та надійних автономних вітрових станцій зрошення, що сприятиме підвищенню врожайності сільськогосподарських культур та сталому розвитку аграрного сектору.

Список використаних джерел

1. Стогній Б. С., Швець С. В. Енергоефективність використання відновлюваних джерел енергії в аграрному секторі. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 5. С. 45–51. URL: https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/view/2023_06_08/4417

2. Кудрявцев О. В. Оптимізація параметрів вітрових насосних установок. *Технічні науки та технології*. 2019. № 3 (17). С. 112–118.

3. Пирогов В. О. Підвищення довговічності насосних агрегатів для зрошення комбінованими екологічно безпечними технологічними методами: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.05. Суми, 2022. URL: <https://repo.snau.edu.ua/xmlui/handle/123456789/11015>

4. Векірчик К. К., Козицький С. Я. Сучасний стан та перспективи розвитку вітрової енергетики в Україні. *Український географічний журнал*. 2020. № 1. С. 59–70. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2020-1_59-70.pdf

5. Pecheniuk A., Garasymchuk I., Pantsyr Y. et al. Autonomous Energy Supply for Country Houses in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2025. Vol. 8. No. 1. P. 117–128. URL: <https://grassrootsjournals.org/gjnr/nr.08-01-27.pecheniuket al.pdf>

6. Syuhada A., Mubarak Z., Sary R. Study of Solar and Wind Energy Using as Water Pump Drive-Land for Agricultural Irrigation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 420. P. 012023. URL: https://www.researchgate.net/publication/329496049_Study_of_Solar_and_Wind_Energy_Using_as_Water_Pump_Drive-Land_for_Agricultural_Irrigation

7. Vasiliev G. G., Kamoian A. L. Improving the efficiency of autonomous wind turbines. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. P. 01023. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/55/e3sconf_eeests2021_01023/e3sconf_eeests2021_01023.html

8. Purohit P., Purohit I. Renewable Energy Powered Rural Irrigation: Feasibility Comparison of Solar And Wind Based Water Pumping Systems in Turkey. *Applied Energy*. 2016. Vol. 183. P. 1184–1192. URL: https://www.researchgate.net/publication/280935985_Renewable_Energy_Powered_Rural_Irrigation_Feasibility_Comparison_of_Solar_And_Wind_Based_Water_Pumping_Systems_in_Turkey

https://www.researchgate.net/publication/280935985_Renewable_Energy_Powered_Rural_Irrigation_Feasibility_Comparison_of_Solar_And_Wind_Based_Water_Pumping_Systems_in_Turkey

9. Otan E., Otan F., Yasar A. Investigation of a sensorless water supply system for excess energy management in wind power generation. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2025. No. 1. P. 325–330. URL: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/download/511/420/>

10. Daud A. K., Mahmoud M. M. Solar powered movement for irrigation purposes. *Renewable Energy*. 2005. Vol. 30. No. 4. P. 453–462. URL: [doi.org](https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.001)

11. Bilan Y., Lyeonov S., Tiutiunyk A., Vasylieva T. Irrigation Needs in Ukraine According to Current Aridity Level. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22. No. 8. P. 11–18. URL: <http://www.jeeng.net/pdf-140478-67661?filename=Irrigation%20Needs%20in.pdf>

12. Belkilani M., Al-Haddad K., Fnaiech F. Multivariate Analysis of a Wind–PV–Based Water Pumping Hybrid System for Irrigation Purposes. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. Vol. 57. No. 4. P. 3704–3715. URL: https://www.researchgate.net/publication/352023768_Multivariate_Analysis_of_a_Wind-PV-Based_Water_Pumping_Hybrid_System_for_Irrigation_Purposes

References

1. Stogniy B. S., Shvets S. V. (2020). Energy efficiency of using renewable energy sources in the agricultural sector. *Bulletin of Agricultural Science*. No. 5. P. 45–51. [in Ukrainian].

2. Kudryavtsev O. V. (2019). Optimization of parameters of wind pumping units. *Technical Sciences and Technologies*. No. 3 (17). P. 112–118. [in Ukrainian].

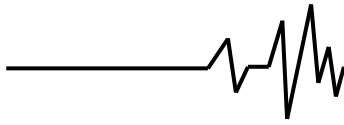
3. Pirogov V. O. (2022). Increasing the durability of pumping units for irrigation by combined environmentally safe technological methods: author's abstract. dissertation. Candidate of Technical Sciences: 05.05.05. Sumy. [in Ukrainian].

4. Vekirchik K. K., Kozitskyi S. Ya. (2020). Current state and prospects for the development of wind energy in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*. No. 1. pp. 59–70. [in Ukrainian].

5. Pecheniuk A., Garasymchuk I., Pantsyr Y. et al. (2025) Autonomous Energy Supply for Country Houses in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. Vol. 8. No. 1. P. 117–128. [in English].

6. Syuhada A., Mubarak Z., Sary R. (2018). Study of Solar and Wind Energy Using as Water Pump Drive-Land for Agricultural Irrigation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 420. P. 012023. [in English].

7. Vasiliev G. G., Kamoian A. L. (2021). Improving the efficiency of autonomous wind turbines. *E3S Web of Conferences*. Vol. 280. P. 01023. [in English].



8. Purohit P., Purohit I. (2016) Renewable Energy Powered Rural Irrigation: Feasibility Comparison of Solar And Wind Based Water Pumping Systems in Turkey. *Applied Energy*. Vol. 183. P. 1184-1192. [in English].

9. Otan E., Otan F., Yasar A. (2025). Investigation of a sensorless water supply system for excess energy management in wind power generation. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. No. 1. P. 325-330. [in English].

10. Daud A. K., Mahmoud M. M. (2005) Solar powered movement for irrigation purposes. *Renewable Energy*. Vol. 30. No. 4. P. 453-462[in English].

11. Bilan Y., Lyeonov S., Tiutiunyk A., Vasyliieva T. (2021). Irrigation Needs in Ukraine According to Current Aridity Level. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 22. No. 8. P. 11-18. [in English].

12. Belkilani M., Al-Haddad K., Fnaiech F. (2021) Multivariate Analysis of a Wind-PV-Based Water Pumping Hybrid System for Irrigation Purposes. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 57. No. 4. P. 3704-3715. [in English].

RESEARCH OF WIND STATION DRIVE PARAMETERS FOR IRRIGATION OF AGRICULTURAL PLANTINGS

The presented scientific work investigates the urgent problem of providing agricultural irrigation systems with energy in the context of the growing shortage of traditional energy sources and the current energy crisis in Ukraine. In conditions of systematic destruction of critical infrastructure and frequent planned/emergency power outages, which makes it impossible to operate traditional pumping stations stably,

the use of autonomous, non-volatile power sources acquires strategic importance.

A deep analysis of existing technical solutions was performed and the choice of an autonomous wind power plant as the main power source for pumping equipment was justified. The key parameters of the drive system were determined, which have a decisive impact on the overall efficiency of the system. For this purpose, a complex mathematical model was developed that describes the dynamics of the “wind turbine - drive - pump” system, which takes into account the aerodynamic power of the wind, the dependence of the power coefficient C_p on the speed λ , the equation of motion of the system with an equivalent moment of inertia and the hydraulic characteristics of the pump. An original methodology for optimizing the operating characteristics of a wind turbine and a pumping unit is proposed, aimed at ensuring stable and reliable water supply, despite the changes and fluctuations inherent in wind loads. During the modeling, it was found that the drive gear ratio parameter is critical for performance: the optimal option with a gear ratio $i=15$ provided the best matching of the characteristics of the system elements and the highest average wind energy utilization factor. The practical application of the research results lies in the possibility of installing such autonomous stations near natural or artificial reservoirs to organize independent irrigation of agricultural lands within a radius of up to 1000 meters. This solution minimizes the dependence of farms on external energy networks, ensures uninterrupted water supply during critical periods of plant vegetation, and increases the stability of agribusiness in the conditions of martial law and post-war reconstruction of the country.

Keywords: wind farm, irrigation, agriculture, drive, parameters, energy efficiency, renewable energy.

Відомості про авторів

Швець Людмила Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, ORCID: 0009-0000-7078-9420).

Липницький Роман Миколайович – асистент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. e-mail: lroma5105@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3711-5632).

Слободяник Анатолій Дмитрович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: г. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, <https://orcid.org/0009-0006-2157-8188>

Shvets Ludmila – PhD, Associate Professor, Department of Agricultural Engineering and Technical Service Vinnytsia National Agrarian University (Sunny str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, ORCID: 0009-0000-7078-9420).

Lypnytskyi Roman– Assistant of the Department of Agroengineering and Technical Service, Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine. e-mail: lroma5105@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3711-5632)..

Slobodanyk Anatoliy Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies, Vinnytsia National Agrarian University, Service address: Vinnitsa, st. Sonyachna 3, VNAU 21008, <https://orcid.org/0009-0006-2157-8188>

Стаття надійшла 11.12.2025

Стаття прийнята 18.12.2025

Опубліковано 25.12.2025