

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»  
Факультет енергетики та інформаційних технологій  
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему:

**Шляхи підвищення якості електропостачання в умовах  
використання регульованих вітрових енергетичних установок**

**Виконав:**

здобувач вищої освіти денної форми навчання  
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-  
професійної програми «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

\_\_\_\_\_ **Олексій ГЕРЕЖА**

**Керівник:** кандидат технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ **Віктор ДУБІК**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_ Шкала ECTS \_\_\_\_\_

**Допускається до захисту:**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент \_\_\_\_\_

**Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2024р.

## ЗМІСТ

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                   | 8  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ.....                                                  | 11 |
| 1.1. Аналіз сучасного розвитку ринку електроенергії в Україні.....                                           | 11 |
| 1.1.1. Система стимулювання розвитку відновлюваної енергетики.....                                           | 14 |
| 1.2. Аналіз конфігурацій комбінованих систем електрозабезпечення .....                                       | 18 |
| 1.3. Тенденції розвитку вітроенергетичних агрегатів для малих вітроелектростанцій .....                      | 19 |
| 1.3.1. Загальна інформація про об'єкта дослідження .....                                                     | 19 |
| 1.3.2. Електричні навантаження об'єкта електропостачання .....                                               | 23 |
| 1.3.3. Тенденції розвитку об'єктів вітрогенерації .....                                                      | 27 |
| Висновки до розділу .....                                                                                    | 29 |
| РОЗДІЛ 2. СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІД ВЕС .....                                                          | 30 |
| 2.1. Визначення умов функціонування розподільних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації..... | 30 |
| 2.1.1. Стандартизація малих вітрових турбін.....                                                             | 36 |
| 2.2 Аналіз систем захисту генерувальних установок з статичним перетворювачем частоти.....                    | 37 |
| 2.3. Режими роботи і участі вітроелектричної станції у протиаварійному управлінні.....                       | 41 |
| 2.4. Підвищення показників якості електропостачання регульованих ВЕУ.....                                    | 43 |
| 2.4.1 Активні споживачі .....                                                                                | 43 |
| 2.4.2. Використання моделі ринку двосторонніх договорів .....                                                | 48 |
| 2.5 Вимоги до приєднань до електричної мережі потужних ВЕС, .....                                            | 49 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.6. Використання ВЕС із застосуванням технологій Double Fed Induction Generator ..... | 51 |
| 4.6.1. Загальна характеристика вітрових турбін .....                                   | 51 |
| 4.6.2. Застосування машин подвійного живлення ВЕС .....                                | 56 |
| 2.7 Реалізація режимів режим проходження низьких напруг .....                          | 62 |
| Висновки до розділу .....                                                              | 70 |
| РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПІДТРИМАННЯ НАПРУГИ У ВУЗЛІ ПРИЄДНАННЯ.....  | 71 |
| 3.2. Розрахунки середньозваженої собівратості.....                                     | 76 |
| 3.3. Техніко-економічні розрахунки.....                                                | 83 |
| 3.3.1 Техніко-економічні розрахунки ВЕУ на термін 20 років .....                       | 83 |
| Висновки до розділу .....                                                              | 87 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                          | 88 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                       | 89 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Використання технологій відновлюваної енергетики (ТВЕ) є однією з ключових тем сучасних наукових досліджень. Серед них вітрові електростанції (ВЕС) займають дедалі важливіше місце в енергосистемах багатьох країн. Відмінні характеристики вітрової генерації порівняно із традиційними джерелами енергії суттєво впливають на функціонування енергетичних систем. У зв'язку з цим, перед масштабним впровадженням енергії вітру, необхідно розв'язати низку технічних, економічних і екологічних завдань.

Збільшення частки вітрових електростанцій в енергетичній системі призводить до додаткових витрат, значною мірою зумовлених тим, що джерело вітрової енергії не піддається прямому контролю. Потужність вітрових електростанцій є змінною, що створює складнощі у забезпеченні стабільності енергосистеми. Зміни потужності вітрових установок можуть бути як короткостроковими, так і довгостроковими, і часто важко прогнозувати їх точний характер у довгостроковій перспективі. Це потребує особливих підходів до балансування енергетичних потоків і забезпечення стабільної роботи мережі.

Також важливим є питання впровадження конкурентної моделі ринку двосторонніх договорів та балансуючого ринку електричної енергії (РДДБР), оскільки це є основою для подальшого розвитку оптового ринку електроенергії України. Забезпечення стабільної та надійної роботи Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України можливе завдяки застосуванню допоміжних послуг, які регулюються системним оператором ринку електричної енергії відповідно до встановлених стандартів. Для цього використовуються методики формування цін (тарифів) на допоміжні послуги, що дозволяють ефективно управляти попитом і пропозицією на ринку, а також забезпечувати належне функціонування енергосистеми в умовах значної частки відновлювальних джерел енергії.

Враховуючи, що основними факторами, що визначають собівартість, є швидкість вітру, капітальні витрати та витрати на обслуговування, важливим є також технічне вдосконалення вітроустановок, яке дозволяє збільшити їх

продуктивність і зменшити експлуатаційні витрати.

Для забезпечення конкурентоспроможності на ринку, необхідно враховувати не тільки низьку собівартість виробництва електроенергії, а й ефективність маркетингових стратегій, зокрема, можливість продажу електроенергії за більш вигідними умовами, особливо в умовах лібералізованого ринку, де ціни на енергію визначаються попитом і пропозицією. Використання новітніх технологій прогнозування та оптимізації допоможе знизити ризики і підвищити точність прогнозування виробітку енергії, що має значний вплив на вартість електроенергії.

**Метою роботи** є оцінка економічної ефективності впровадження малої вітроелектричної станції (МВЕС) шляхом проведення варіантних розрахунків техніко-економічних показників із використанням моделі життєвого циклу. Дослідження також охоплює оснащення МВЕС засобами регулювання напруги у вузлі приєднання до розподільчої електромережі та впровадження інженерних рішень, спрямованих на підвищення якості електроенергії.

**Об'єктом дослідження** є система електропостачання промислового об'єкта на основі вітроелектричної установки, яка використовує асинхронний генератор з фазним ротором в режимі машини подвійного живлення (МПЖ). Це комплексна енергетична система, яка поєднує відновлювані джерела енергії (вітроенергетика) з високоефективними електричними технологіями для забезпечення стабільного постачання електричної енергії для промислового об'єкта

**Предметом** дослідження є підвищення показників якості електропостачання об'єкта шляхом вдосконалення конструкційних і технологічних рішень вітроенергетичних установок в складі системи електрозабезпечення, а також аналіз техніко-економічних показників такого об'єкта з використанням економіко-математичної моделі життєвого циклу (МЖЦ) системи електропостачання з власною вітроенергетичною установкою.

### **Методи дослідження**

Методологічною базою дослідження є комбінація публічно оприлюднених статистичних і прогнозних даних, а також матеріалів з технологічних особливостей функціонування вітроенергетичних установок у складі малих систем розподілу

електричної енергії, зокрема в країнах Європейського Союзу (ЄС). Ці дані дозволяють досліджувати тенденції розвитку електроенергетики в ринкових умовах та аналізувати досвід використання вітроенергетичних установок для підвищення ефективності енергопостачання в малих системах.

**Практичне значення:** Розробка такої системи має велике значення для підприємств, особливо тих, що працюють у віддалених регіонах або в умовах обмеженого доступу до централізованого енергопостачання. Вона дозволяє значно знизити витрати на енергоресурси, підвищити енергонезалежність підприємств та сприяти розвитку відновлювальних джерел енергії в промисловому секторі.

Таким чином, система електропостачання промислового об'єкта на основі вітроелектричної установки із застосуванням асинхронного генератора з фазним ротором в режимі машини подвійного живлення є перспективним рішенням для зниження витрат і підвищення ефективності енергопостачання в умовах сучасної енергетичної трансформації.

**Апробація результатів роботи.** Результати магістерської дисертації були оприлюднені на четвертій Всеукраїнській науково-практичній конференції «Ефективне використання енергії: стан і перспективи». (19 листопада 2024). – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2024.

**Публікації.** За результатами наукових досліджень було опубліковано тези: Олексій ГЕРЕЖА. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АНАЛІЗУ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ / Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективне використання енергії: стан і перспективи». (19 листопада 2024). – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2024.

## ВИСНОВКИ

1. Виконано техніко-економічний аналіз показників системи електрозабезпечення промислового об'єкта, оснащеного комбінованою системою електропостачання з використанням вітрових енергоустановок спеціальної конструкції. Опрацьовано теоретико-практичні питання, пов'язані з забезпеченням можливостей ширшого впровадження регульованих вітроенергетичних установок, враховуючи умови приєднання до електромережі (правила мережного кодексу), а також задачі підвищення якості функціонування мережі при приєднанні нових генерувальних потужностей — вітроелектростанцій малої потужності та вітроенергетичних установок (ВЕУ).

2. Досліджено вплив джерел розподіленої генерації на основі вітрових енергоустановок (ВЕУ), приєднаних до вузла малої системи розподілу, на режими електричного вузла приєднання.

3. Показано, що за умов господарювання виробників електроенергії до 2030 року, які визначаються положеннями Закону України «Про альтернативні джерела енергії», для споживачів, оснащених силовими електроустановками з встановленою потужністю до 150 кВт, можна досягнути компромісу між інтересами споживача та оператора ОСР. Це забезпечить можливість підтримки цієї моделі в умовах формуючогося ринку та для майбутніх рівноважних цін на електроенергію в Україні, включаючи більш тривалий період експлуатації.

4. Важливим є фактор соціальної корисності таких систем електрозабезпечення, оскільки вони відкривають можливості для операторів-власників малої віротехніки брати участь у роботі розосередженої енергосистеми, забезпечуючи певну гнучкість режимів її функціонування щодо напруги та частоти.

5. Довгостроковий період експлуатації розглянутої системи електрозабезпечення з надійними прогнозними показниками щодо доцільності її застосування є особливо важливим для потенційного інвестора, оскільки необхідно запропонувати найбільш вигідний та найменш ризиковий варіант реалізації проекту.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Режимні особливості вузла електромережі з приєднанням малої вітроелектростанції й засоби підвищення показників якості електропостачання. Костюк В.О., Назарук В.М// «Збірник матеріалів XII науково-технічної конференції ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА ». - Київ, 2020. - с. 58-63.
2. Вітроенергетичний сектор України 2019. Огляд ринку. [Електронний ресурс] // Українська вітроенергетична асоціація» (УВЕА). - 2019. - Режим доступу до ресурсу: [http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea\\_2019\\_uapreview.pdf](http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2019_uapreview.pdf).
3. Про запровадження конкурентних умов стимулювання виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] // КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ. - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1175-2019-%D0%BF#Text>.
4. Кодекс систем розподілу [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. - 2018. - Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>.
5. До уваги основних споживачів, що підключені до мереж оператора системи передачі [Електронний ресурс] // НКРЕКП. - 2018. - Режим доступу до ресурсу: <https://www.nerc.gov.ua/?news=8576>.
6. The POWER Project [Електронний ресурс] // NASA Earth Science's Applied Sciences Program - Режим доступу до ресурсу: <https://power.larc.nasa.gov/>.
7. 3. І. Римар. ПЕРСПЕКТИВИ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ [Електронний ресурс] / 3. І. Римар // Вінницький національний технічний університет. - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/all-ebmd-2019/paper/download/7220/6074>.
8. . АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ [Електронний ресурс] // Портал молодих науковців ВНТУ. - 2020. - Режим доступу до ресурсу: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/0938F1ED-3F69-4E84-92F8-5E97A1871E7A.pdf>.
9. ПОЛОЖЕННЯ ПРО ТЕХНІЧНИЙ КОМІТЕТ ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТК 48 “ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ” [Електронний ресурс] // ДП «УкрНДНЦ». - 2016. -

Режим доступу до ресурсу: <http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2016/12/TK48.pdf>.

10. ДСТУ EN 50438:2015 Вимоги до паралельного приєднання мікрогенераторів до низьковольтної розподільчої мережі загальної призначеності (EN 50438:2007, IDT) [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. - 2015. - Режим доступу до ресурсу: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id doc=62177>.

11. ДСТУ ІЕС WT 01:2007 Система ІЕС перевіряння відповідності та сертифікації вітряних турбін. Правила і процедури (ІЕС WT 01:2001, IDT) [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. - 2007. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/>.

12. Жаркін А.Ф., Палачов С.О.,Новський В.О. Нормативно-правове регулювання якості напруги в електричних мережах з джерелами розосередженої генерації. -Київ: Інститут електродинаміки НАН України. -2018р. 161 стор.

13. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 21. Вимірювання та оцінювання характеристик якості енергії вітряних турбін, підключених до мережі (ІЕС 61400- 21:2001, ЮТ).

14. Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Методи випробування

15. Палайда О.Б.“Гордіїв вузол”, або проблема приєднання до українських електричних мереж./ Промислова електроенергетика та електротехніка.- 2017- №2.- С.30-37.

16. Закон України «Про ринок електричної енергії»: за станом на 13 квіт. 2017 р. / Верховна Рада України. - Офіц. вид. - Київ : Парлам. вид-во, 2017. - 312 с.

17. Закон України «Про альтернативні джерела енергії». [Електронний ресурс]. - Режим доступу до стор. : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/555-15>.

18. Проект постанови НКРЕКП "Про затвердження Методики (порядку)

формування плати за приєднання до системи передачі та системи розподілу" (повторно). Режим доступу: [:http://www.nerc.gov.ua/?id=35272](http://www.nerc.gov.ua/?id=35272).

19. Керування графіком навантаження в електричних мережах споживачами- регуляторами / С. В. Бахмачук, Ю. С. Громадський, С. М. Савицький, Д. А. Гапон // ScienceRise. - 2016. - № 2(2). - С. 50-57. - Режим доступу:

[http://nbuv.gov.ua/UJRN/text\\_2016\\_2%282%29\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/text_2016_2%282%29_11)

20. Визначення необхідних умов і алгоритмів врахування ВЕС та СЕС [Електронний ресурс] // Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». - 2018. - Режим доступу до ресурсу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/09/AZPS.pdf>.

21. Визначення необхідних умов і алгоритмів врахування ВЕС та СЕС при налаштуванні протиаварійних автоматичних пристроїв, призначених для запобігання порушенню стійкості (АЗПС) у перетинах ОЕС України на режим роботи яких вони мають вплив. Методичні рекомендації [Електронний ресурс] // Національна енергетична компанія «Укренерго». - 2017. - Режим доступу до ресурсу: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Metodychni-rekomendatsiyi\\_AZPS.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Metodychni-rekomendatsiyi_AZPS.pdf).

22. Машини подвійного живлення і асинхронізовані машини. Загальна характеристика [Електронний ресурс] // Факультет електроенерготехніки та автоматики. - 2018. - Режим доступу до ресурсу: [https://em.fea.kpi.ua/images/doc\\_stud/distiplini/epmg/2\\_Lektsiini\\_materialy/1-1\\_Zahalna\\_kharakterystyka\\_MPZH.pdf](https://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/distiplini/epmg/2_Lektsiini_materialy/1-1_Zahalna_kharakterystyka_MPZH.pdf).

23. E. Muljadi, V. Gevorgian, M. Singh and S. Santoso, "Understanding inertial and frequency response of wind power plants," [Електронний ресурс] // IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Denver, CO. - 2012. - Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6316361> &isnumber=631635 1.

24. . ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ: ЕЛЕМЕНТИ ТА

РЕЖИМИ [Електронний ресурс] // Національна академія наук України Інститут електродинаміки За загальною редакцією академіка НАН України О.В. Кириленка. - 2016. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.ied.org.ua/files/book3.pdf>.

25. Acharya N., Mahat P., Mithulanathan N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network // Electrical Power and Energy System. - 2006. - No. 28. - P. 669-678.

26. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж [Електронний ресурс] // Ukrainian National Electricity Regulatory Commission. - 2011. - Режим доступу до ресурсу:

27. ДРУГА РЕДАКЦІЯ ДОДАТКУ ДО КОДЕКСУ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ «СТІЙКІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМ. КЕРІВНІ ВКАЗІВКИ» [Електронний ресурс] // Національна енергетична компанія «Укренерго». - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/11/Druga-redaktsiya-Dodatka-do-KSP.-Stijkist-energosityem.pdf>.

28. ЗАКОН УКРАЇНИ Про засади функціонування ринку електричної енергії України [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. - 2014. - Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/663-18#Text>.

29. Small wind turbines for on grid and off grid applications [Електронний ресурс] // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 410:012047. - 2020. - Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/338814701\\_Small\\_wind\\_turbines\\_for\\_on\\_grid\\_and\\_off\\_grid\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/338814701_Small_wind_turbines_for_on_grid_and_off_grid_applications).

30. Cruz Cruz I and Forsyth T 2018 IEA Wind TCP Task 27 Compendium of IEA Wind TCP Task27 Case Studies.

31. International Energy Agency IEA Wind 2011 Recommended Practices for Wind Turbines Testing and Evaluation, 12 Consumer label for small wind turbines, Edition 20