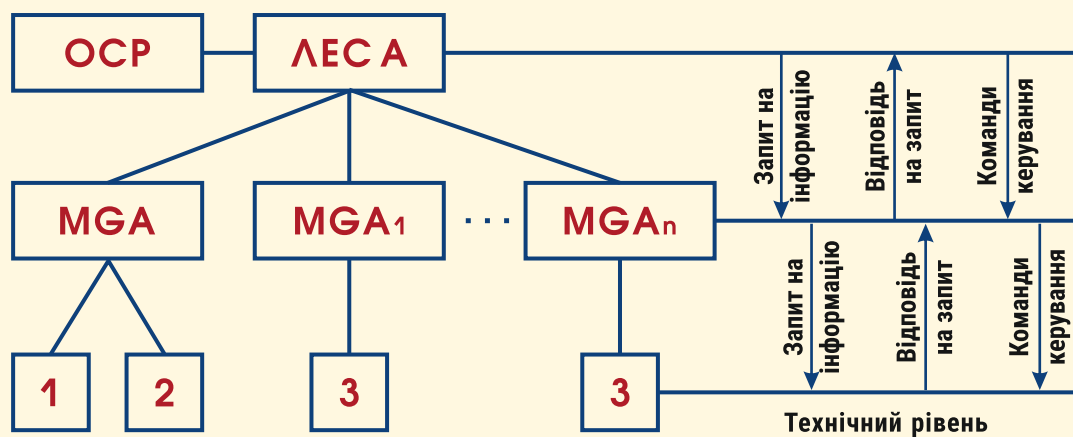
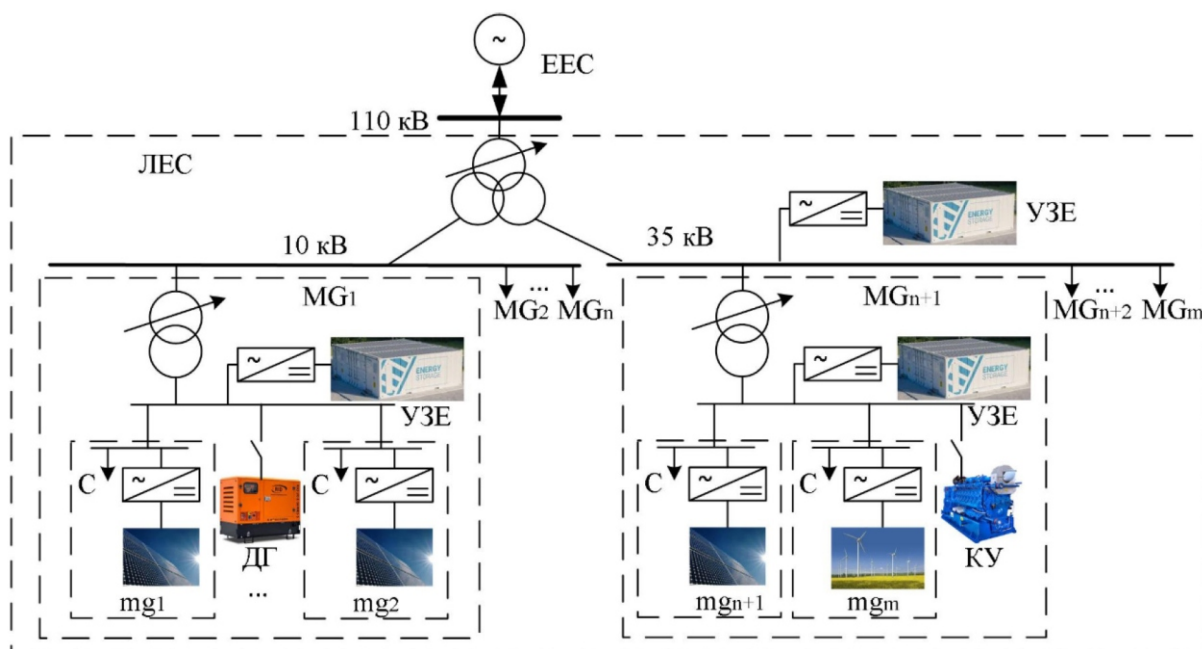


# ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

# **ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ**

**Монографія**

**За редакцією професора П. Д. Лежнюка**

Вінниця  
ВНТУ  
2026

УДК 621.316.925

I-73

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.03.2026 р.).

Автори:

**І. О. Гунько, В. О. Комар, П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько,  
Ю. В. Малогулко, В. В. Нетребський, Н. В. Остра, О. Є. Рубаненко,  
О. О. Рубаненко, О. В. Сікорська, В. В. Тептя**

Рецензенти:

**Д. Г. Дерев'янюк**, доктор технічних наук, професор  
**В. Г. Петрук**, доктор технічних наук, професор

**Інтелектуалізація** електричних мереж з фотоелектричними станціями :  
I-73 монографія / І. О. Гунько та ін. За ред. проф. П. Д. Лежнюка. Електрон.  
текст. дані. Вінниця : ВНТУ, 2026. 387 с.

ISBN 978-617-8163-82-2

В монографії досліджується проблема підвищення балансової надійності локальних електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії шляхом їх інтелектуалізації на принципах SMART Grid. Запропоновано методи, математичні моделі та способи підвищення енергоефективності ВДЕ з нерівномірним графіком генерування в балансі електроенергії енергетичних систем. Показана можливість і доцільність децентралізації генерування в ЕЕС у формі локальних електроенергетичних систем з ВДЕ і установок зберігання енергії, а також з використанням інтелектуальних систем керування їх режимами.

Може використовуватись студентами, аспірантами та інженерно-технічним працівникам, які займаються підвищенням балансової надійності локальних електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії.

**УДК 621.316.925**

**ISBN 978-617-8163-82-2**

© І. О. Гунько, В. О. Комар, П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько,  
Ю. В. Малогулко, В. В. Нетребський, Н. В. Остра,  
О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко, О. В. Сікорська,  
В. В. Тептя, 2026

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....   | 9  |
| ВСТУП.....  | 10 |
| 1 МЕТОД, СПОСІБ І ЗАСОБИ ОЦІНЮВАННЯ ФАКТИЧНОГО<br>ГЕНЕРУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ ЇХ<br>ДЕГРАДАЦІЇ .....                      | 13 |
| 1.1 Загальні умови функціонування ВДЕ в електричних мережах<br>енергосистеми .....  | 14 |
| 1.1.1 Особливості функціонування ВДЕ в сучасних умовах .....  | 14 |
| 1.1.2 Тенденції до зміни встановленої потужності та обсягів генерування<br>електроенергії ВДЕ в умовах реалізації стратегії декарбонізації..... | 18 |
| 1.2 Балансування потужності та електроенергії в електроенергетичній<br>системі з відновлюваними джерелами енергії.....                          | 23 |
| 1.2.1 Забезпечення балансової надійності ЕЕС з ВДЕ та проблеми,<br>що пов'язані з їх реалізацією.....   | 23 |
| 1.2.2 Вплив відновлюваних джерел енергії на режими електричних<br>мереж ЕЕС .....   | 28 |
| 1.3 Вплив метеорологічних факторів на енергоефективність ВДЕ.....   | 33 |
| 1.3.1 Математичне моделювання впливу метеорологічних факторів<br>на генерування електроенергії ВДЕ.....   | 33 |
| 1.3.2 Прогнозування генерування електроенергії ВДЕ .....  | 40 |
| 1.4 Оцінювання технічного стану фотоелектричних станцій під час<br>їх роботи в балансуєчій групі.....   | 49 |
| 1.4.1 Аналіз технічного стану фотоелектричних станцій.....  | 50 |
| 1.4.2 Коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ.....  | 56 |
| 1.4.3 Програмно-апаратний комплекс визначення технічного стану<br>обладнання ФЕС .....  | 61 |
| 1.4.4 Приклад використання макету апаратно-програмного комплексу<br>оцінювання деградації ФЕМ.....  | 73 |

|  |           |
|--|-----------|
| Висновки до розділу 1 .....  | 77        |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1 .....  | 80        |
| <b>2 АДАПТУВАННЯ КРИТЕРІАЛЬНОГО МЕТОДУ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ І КОМПЕНСАЦІЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ГЕНЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ .....</b> | <b>90</b> |
| 2.1 Критеріальне програмування в задачі компенсації нерівномірності графіка генерування вде.....   | 91        |
| 2.1.1 Комплексний підхід компенсації нерівномірності графіка генерування ВДЕ.....  | 91        |
| 2.1.2 Критеріальне програмування для розв’язання задачі визначення оптимальних витрат на компенсацію нестабільності ВДЕ .....                        | 94        |
| 2.2 Моделювання витрат на можливі способи резервування.....  | 97        |
| 2.2.1 Критеріальна модель питомих витрат на резервування за сценарієм, по якому використовуються хімічні накопичувачі .....                          | 97        |
| 2.2.2 Критеріальна модель питомих витрат на резервування за сценарієм, по якому використовуються хімічні накопичувачі та біогазові установки .....   | 103       |
| 2.2.3 Водневі технології як спосіб компенсації нерівномірності генерування електроенергії відновлюваними джерелами енергії ..                        | 109       |
| 2.3 Моделі оцінювання витрат на резервування нерівномірності графіків генерування електроенергії ВДЕ .....   | 121       |
| 2.3.1 Практичне використання способів компенсації нерівномірності графіків генерування електроенергії ВДЕ .....                                      | 121       |
| 2.3.2 Побудова нечіткої моделі витрат на резервування в залежності від питомої вартості та встановленої потужності .....                             | 137       |
| Висновки до розділу 2 .....  | 143       |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2.....   | 145       |

|   |     |
|---|-----|
| 3 ПРИНЦИП НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ЯК МЕХАНІЗМ САМООПТИМІЗАЦІЇ І САМООРГАНІЗАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛЕС.....                            | 148 |
| 3.1 Принцип найменшої дії в моделях та алгоритмах оптимізації режимів локальної електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії..... | 150 |
| 3.1.1 Принцип найменшої дії (ПНД) як метод формування оптимізуючих впливів на режими електроенергетичних систем (ЕЕС) .....                         | 150 |
| 3.1.2 Постановка задачі оптимізації локальних електроенергетичних систем.....   | 152 |
| 3.1.3 Принцип найменшої дії (ПНД) як метод формування оптимізуючих впливів на режими ЛЕС .....  | 153 |
| 3.1.4 Організація обчислювального процесу в програмному комплексі оптимізації режимів ЕЕС .....   | 156 |
| 3.2 Локальні електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії .....  | 162 |
| 3.2.1 Структура ЛЕС з ВДЕ і системою накопичення енергії .....  | 162 |
| 3.2.2 Балансування потужності та електроенергії в ЛЕС .....   | 164 |
| 3.2.3 Оптимізація способів і засобів забезпечення стабільної (стійкої) роботи ВДЕ в ЛЕС .....   | 166 |
| 3.2.4 Приклад. Визначення способу для підвищення балансової надійності ЛЕС.....   | 171 |
| 3.3 Балансування режимів локальних електроенергетичних систем по потужності та електроенергії .....   | 174 |
| 3.3.1 Загальні положення .....  | 174 |
| 3.3.2 Задача оптимального керування режимів ЛЕС .....   | 175 |
| 3.3.3 Активно-адаптивне керування потоками потужності в ЛЕС .....   | 176 |
| 3.3.4 Математична модель оптимізації режимів ЛЕС з використанням принципу найменшої дії.....  | 180 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.4 Використання активних споживачів для балансування електроенергії в ЛЕС, які сформовані з розподільних мереж .....                            | 183        |
| 3.4.1 Загальні положення та постановка завдання .....  | 183        |
| 3.4.2 Активні споживачі в балансі потужності та електроенергії в ЛЕС як в балансуєчій групі .....  | 186        |
| 3.4.3 Узгодження графіків генерування і споживання в ЛЕС для балансування в ній електроенергії .....   | 188        |
| Висновки до розділу 3 .....  | 193        |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3 .....  | 194        |
| <b>4 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТА АКТИВНИМИ СПОЖИВАЧАМИ .....</b>                          | <b>200</b> |
| 4.1 Вплив генерування відновлювальних джерел енергії на режими електричних мереж у формі локальних електроенергетичних систем....                | 201        |
| 4.1.1 Оцінювання впливу динаміки зростання ВДЕ на режимні показники роботи електричних мереж .....   | 201        |
| 4.1.2 Локальні електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії як елемент балансування електроенергії в ЕЕС .....              | 206        |
| 4.1.3 Інтелектуалізація електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії .....   | 209        |
| 4.1.4 Способи і засоби компенсування нестабільності генерування ВДЕ в задачах балансування режиму електричних мереж .....                        | 216        |
| 4.2 Втрати електроенергії, викликані перетоками відновлюваних джерел енергії, в балансі електричних мереж .....                                  | 221        |
| 4.2.1 Коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках електричної мережі.....  | 222        |
| 4.2.2 Втрати потужності й електроенергії від потоків ВДЕ.....  | 224        |
| 4.3 Алгоритмізація методів балансування режимів роботи електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії та активними споживачами .....       | 229        |
| 4.3.1 Балансування потужності та електроенергії в локальній електроенергетичній системі узгодженням в ній графіків генерування і споживання..... | 229        |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| 4.3.2 | Оптимізація витрат на резервування потужності ВДЕ в ЛЕС.....  | 233        |
| 4.3.3 | Узгодження графіків генерування і споживання в ЛЕС для<br>балансування в ній електроенергії.....  | 240        |
| 4.4   | Інтелектуальна система керування режимами локальної<br>електроенергетичної системи з microgrid .....  | 247        |
| 4.4.1 | Формування інтелектуальної системи керування режимом ЛЕС<br>в складі електроенергетичної системи .....  | 247        |
| 4.4.2 | Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній<br>електроенергетичній системі, сформованій на основі<br>відновлюваних джерел енергії .....   | 253        |
|       | Висновки до розділу 4 .....   | 261        |
|       | ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4.....  | 264        |
| 5     | <b>АДАПТАЦІЯ СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ<br/>ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ<br/>ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ДО АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ<br/>КЕРУВАННЯ СХІДНО-ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ<br/>СИСТЕМИ .....</b> | <b>274</b> |
| 5.1   | Математичне моделювання процесу балансування режимів<br>електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії<br>з використанням SMART grid технологій.....   | 276        |
| 5.1.1 | Сучасні тенденції та завдання цифрової трансформації<br>електроенергетики .....   | 276        |
| 5.1.2 | Забезпечення технічної ефективності відновлюваних джерел<br>енергії в електроенергетичних системах.....   | 284        |
| 5.1.3 | Математичне моделювання процесу балансування режимів<br>електроенергетичних систем з ВДЕ.....   | 295        |
| 5.2   | Локальні електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел<br>енергії як елемент децентралізації генерування і балансування.....  | 313        |
| 5.2.1 | Аналіз законодавчої бази у сфері формування ЛЕС.....  | 313        |
| 5.2.2 | ЛЕС з ВДЕ і системою накопичення енергії в ЕЕС.....   | 318        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.3 Локальна електроенергетична система, яка сформована з microgrid .....   | 321 |
| 5.2.4 Вдосконалення методів прогнозування відпуску та споживання електричної енергії шляхом агрегації балансуєної групи з ВДЕ... .. | 323 |
| 5.3 Апаратно-програмний комплекс інформаційного забезпечення і моніторингу стану microgrid .....                                    | 326 |
| 5.3.1 Загальні вимоги та умови оцінювання технічного стану обладнання фотоелектричних станцій.....                                  | 326 |
| 5.3.2 Кластеризація як засіб визначення фотоелектричних станцій з аномаліями в їх роботі .....                                      | 327 |
| 5.3.3 Використання програмно-апаратного комплексу діагностування технічного стану обладнання фотоелектричних станцій .....          | 339 |
| 5.4 Інтелектуалізація систем керування режимами електричних мереж.....  | 342 |
| 5.4.1 Загальні умови інтелектуалізації електричних мереж енергосистем .....   | 342 |
| 5.4.2 Оптимізація режимів ВДЕ з метою мінімізації відхилень від заданого централізовано графіка сукупного генерування ВДЕ.....      | 344 |
| 5.4.3 Використання інтелектуальної системи керування режимом ЛЕС в складі електроенергетичної системи .....                         | 351 |
| 5.4.4 Локальна електроенергетична система, яка сформована з microgrid .....   | 354 |
| 5.4.5 Підвищення ефективності електричних мереж шляхом їх інтелектуалізації.....  | 357 |
| Висновки до розділу 5 .....   | 365 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ДО РОЗДІЛУ 5.....  | 367 |
| ВИСНОВКИ.....   | 376 |
| ДОДАТОК А Оцінювання економічної ефективності локальної електроенергетичної системи .....   | 383 |

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- АЕС – атомна електрична станція;
- АС – активних споживачів;
- АСКОЕ – автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
- АСК ТП – автоматизована система керування технологічними процесами;
- АСПГ – автоматична система прогнозування генерування;
- БГУ – біогазова установка;
- ВДЕ – відновлювані джерела електроенергії;
- ВЕС – вітрова електрична станція;
- ВрЕС – віртуальна електростанція;
- ГЕС – гідроелектростанція;
- ЕЕС – електроенергетична система;
- ЕМ – електрична мережа;
- ЛЕП – лінія електропередачі;
- ЛЕС – локальна електроенергетична система;
- МГЕС – мала гідроелектростанція;
- ОЕС – Об'єднана енергетична система;
- ПК – програмний комплекс;
- РГ – розосереджене генерування;
- РДЕ – розосереджені джерела енергії;
- РЕМ – розподільні електричні мережі;
- РП – розподільний пристрій;
- СЗЕ – система зберігання енергії;
- ТЕС – теплова електрична станція;
- ТП – трансформаторна підстанція;
- ФЕС – фотоелектрична станція;
- ADMS – системи керування розподілом електроенергії;
- CFMS – керування мережами в аварійному режимі;
- CRM – управління взаємовідносинами з клієнтами;
- SCADA – система диспетчерського керування та збору даних;
- WAMS – Wide Area Measuring System.

## ВСТУП

В Україні структура потужностей генерації електроенергії, передачі та розподілу у теперішній час зазнає істотних змін, які пов'язані як з розвитком нових технологій, зокрема, наростаючих темпів та масштабів розвитку комп'ютерних і інформаційних технологій, так і розв'язанням росією повномасштабної війни проти України. Російська агресія проти України принесла небачену за масштабами соціальну та гуманітарну катастрофу, яка безумовно позначилась на економіці держави. Так, внаслідок масованих атак суттєво зруйнована як критична електроенергетична інфраструктура, так і критична інфраструктура споживачів електричної енергії, що доведеться враховувати у повоєнній розбудові національної електроенергетики.

Характерною особливістю реалізації енергетичного переходу як цифрової трансформації, який природним шляхом розпочався ще в довоєнний час, є значне зростання частки розосереджених, у першу чергу, відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному балансі Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, застосування систем зберігання електроенергії (СЗЕ), електромобілів. Це обумовлює необхідність відповідної перебудови мережевої інфраструктури на основі реалізації положень концепції Smart Grid на фоні загальної тенденції до підвищення рівня автоматизації процесів, зокрема, сучасних технологій «розумних мереж» (в національному трактуванні Smart Grid) та забезпечення гарантованого і стабільного електропостачання об'єктів критичної інфраструктури.

Стратегічною метою сучасного розвитку електроенергетичного комплексу є створення інтелектуальних електроенергетичних систем та мереж як нової бази для управлінських і технологічних інновацій, що забезпечують перехід до нового рівня розвитку електроенергетики – реалізації положень енергетичного переходу на основі «концепції 3D»: Decarbonization, Decentralization, Digitalization.

Decarbonization («декарбонізація») – перехід до екологічно чистої «безвуглецевої» економіки та енергетики, що виявляється у зростанні частки ВДЕ в енергетичному балансі, збільшенні частки електричного транспорту та відмови від викопних палив. Decentralization («децентралізація») – перехід до територіально розосередженої електроенергетики з великою кількістю різнорівневих генераторів і споживачів, що виражається в зростанні частки, приєднаної до електромереж середньої та низької напруги, щодо малопотужної та різноманітної за своїм характером генерації; появи активних споживачів

(просюмерів) – нового типу суб'єктів електроенергетики, які є одночасно і виробниками та споживачами електроенергії, мають можливість гнучко змінювати профіль свого споживання з мережі. Digitalization («цифровізація») – перехід до повсюдного застосування в електроенергетиці цифрових керованих пристроїв, підключених до інформаційних мереж Інтернету, на всіх рівнях енергосистеми від пристроїв генераторів та електричних мереж до кінцевих пристроїв, у тому числі побутових, споживачів електроенергії, що забезпечує можливість реалізації інтелекту керування енергосистемами, заснованого на міжмашинній взаємодії (Machine to Machine, M2M) та інтернет речей (Internet of Things, IoT).

Згідно Плану дій ЄС «Цифровізація енергетичної системи» [COM(2022) 552], прийнятого Єврокомісією 18 жовтня 2022 р., цифровізація дає змогу суттєво покращити доступність, сталість та стійкість енергетичної системи. Цифровізація стає центральним елементом для сучасного розвитку енергетики, зокрема, за напрямками управління енергією, оптимізації енергетичного балансу, побудови цифрових інтелектуальних мереж. Цифрова мережа є єдиним цифровим середовищем технологічних даних, що забезпечує функції керування технологічним процесом розподілу електроенергії, включаючи вироблення оптимальних управлінських рішень на основі актуальних достовірних даних про стан обладнання.

Реалізація цифрових технологій передбачає перехід до нової функціональної архітектури електроенергетичних систем в ЄС та, відповідно, ОЕС України, розвиток «розумних мереж» (Smart Grid), технологій зберігання енергії, а також появу нових форм взаємодії учасників ринку електричної енергії, зокрема, віртуальних електростанцій (VpES), локальних електроенергетичних співтовариств (ЛЕС), активних споживачів (АС), балансуєчих груп та агрегаторів задля підвищення ефективності процесів керування енергетичними системами та ринками електричної енергії.

Передумовою широкого запровадження цих процесів стало формування відповідних умов, стимулів, мотивацій, попиту та потреб побудови і експлуатації «розумних мереж», розвиток сучасних ринкових відносин в енергетичній галузі, зокрема, за рахунок збільшення частки ВДЕ в загальному балансі ОЕС України, впровадження пілотних проєктів із застосуванням сучасних технологій цифровізації моніторингу та керування електричними системами і мережами, оптимізації попиту та пропозиції, розвитку нормативно-технічного забезпечення функціонування систем передачі та розподілу електроенергії на основі цифрових технологій, впровадження відповідних європейських та міжнародних стандартів

в Україні, розвиток навчальних програм для студентів і підвищення кваліфікації фахівців в сфері «розумних» мереж та ринків електричної енергії.

Наукові напрацювання за останні роки дозволили вирішити низку важливих задач адаптації політики Європейського Співтовариства (ЄС) у сфері цифровізації та цифрової трансформації в Україні, зокрема, визначення цілей цифрової трансформації в галузі електроенергетики, як вищого рівня розвитку концепції Smart Grid (Smart Grid 3.0), аналізу впливу цифровізації на процеси розвитку електричних мереж, підприємств галузі, ринок електричної енергії. Визначено пріоритетні напрямки нормативного забезпечення у сфері «розумних мереж» як складової цифрової трансформації енергетики України, вперше розроблено структуру, обґрунтовано та визначено об'єкти встановлення обладнання для пілотних проєктів системи моніторингу режимів ОЕС України, автоматизованих систем керування технологічними процесами на підстанціях 110-750 кВ, забезпечено організацію впровадження систем Wide Area Measuring System (WAMS), виконано науково-організаційний супровід впровадження пілотних проєктів «розумного обліку» в операторах систем розподілу із застосуванням систем збору даних про параметри споживання електроенергії, у тому числі параметрів якості і надійності електропостачання.

Звіт за 2021–2025 роки складається з окремих п'яти частин, які відповідають (скорочено) щорічним звітам, а саме:

1. Метод, спосіб і засоби оцінювання фактичного генерування фотоелектричних станцій з врахуванням їх деградації.
2. Адаптування критеріального методу теорії подібності для аналізу і компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії.
3. Принцип найменшої дії як механізм самооптимізації і самоорганізації в технології SMART Grid для автоматизації локальних електроенергетичних систем.
4. Автоматизація та інтелектуалізація електричних мереж з відновлюваними джерелами та активними споживачами.
5. Адаптація системи балансування режимів електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії до автоматизованої системи керування східно-європейської електроенергетичної системи.

## ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуального науково-прикладного завдання автоматизації оптимального керування режимами електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на засадах теорії подібності і принципу найменшої дії з децентралізацією генерування у формі локальних електроенергетичних систем, що дозволило адаптувати систему балансування режимів ЕЕС з ВДЕ до принципів SMART Grid Східно-Європейської електроенергетичної системи.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. В результаті виконаного дослідження вирішується проблеми цифрової трансформації енергетики України шляхом запровадження інтегрованого підходу, що враховує впровадження технологій цифровізації, як основи практичної реалізації концепції «розумних мереж» (SMART Grid), розробку методів, моделей, засобів забезпечення взаємодії та оптимізації роботи виробників електроенергії з ВДВ та споживачів на ринку електричної енергії. Новизною дослідження є децентралізація генерування шляхом розвитку локальних електроенергетичних систем з multimicrogrid, які як самостійні об'єкти забезпечують електропостачання як в нормальних, так і екстремальних станах за рахунок взаємодії засобів генерування електроенергії та її споживання. Розроблено принципи створення ієрархічної інтелектуальної системи керування режимами ЛЕС з multimicrogrid, які агреговані з операторами системи передачі і розподілу електроенергії, функціонують згідно з європейськими стандартами.

2. Сформовано особливості функціонування ВДЕ в Україні та у світі і їх вплив на ЕЕС в сучасних умовах, а також виділено основні негативні ознаки електричних мереж, що зменшують ефективність ВДЕ, зокрема проблеми балансування в електроенергетичних системах, які спричинені недостатнім обсягом маневреної потужності в ОЕС України. Тому обґрунтовано шляхи врахування типу джерел живлення, рівня напруги, графіку споживання, нерівномірності графіку генерування, що дасть змогу досягти максимальних результатів при коригуванні енергетичної стратегії та розвитку відновлюваної енергетики конкретного регіону. Показано, що нормальний стан електричних мереж енергосистеми є важливою умовою для реалізації ефективного використання ВДЕ.

3. Показано, що забезпечити баланс потужності та електроенергії в енергосистемі можливо, комплексно використовуючи наявні маневрені потужності, зокрема теплові, атомні та гідроелектростанції, біогазові установки, а також сучасні засоби (накопичувачі електроенергії, водневі технології, узгодження графіків генерування та споживання електроенергії, тощо). Отримана нечітка модель витрат реалізації комплексного підходу резервування потужності різними способами дозволить обрати найбільш економічно вигідний варіант з врахуванням особливостей функціонування ЕЕС та підтримки загальнодержавного курсу декарбонізації. Задля цього в роботі адаптовано критеріальний метод теорії подібності, яким можливо оптимізувати витрати на резервування нестабільності ВДЕ у відносних одиницях, порівнюючи способи і засоби між собою, без даних про їх вартісні характеристики.

4. Сформована структура ЛЕС з ВДЕ і системою накопичення енергії, яка може бути окремою балансуючою групою в складі ЕЕС. За певних умов, під час втрати зв'язків з ЕЕС, вона може функціонувати в автономному режимі. В неї входять джерела електроенергії, накопичувачі електроенергії та споживачі електроенергії. Джерелами електроенергії є ФЕС, ВЕС, малі гідроелектростанції (мГЕС), дизель генератори (ДГ), біогазові установки (БГУ) з когенераційними установками. В залежності від стану і можливостей власних джерел живлення ЛЕС може брати або передавати електроенергію в ЕЕС. Склад джерел енергії ЛЕС, її мікромереж та режими їх роботи визначаються за принципом найменшої дії.

5. Встановлена можливість і доцільність узгодження графіків генерування фотоелектричних станцій і споживання електроенергії в ЛЕС з використанням активних споживачів. В результаті використання активних споживачів і засобів зберігання електроенергії формується балансуюча група, яка може функціонувати як паралельно з енергосистемою, так і ізольовано в автономному режимі. Завдяки узгодженню графіків електричних навантажень ЛЕС і генерування ФЕС в ній можливо підвищити енергоефективність системи електропостачання за рахунок зменшення втрат електроенергії в мережі, покращання якості напруги та збільшення надійності електропостачання споживачів;

6. Показано, що зі збільшенням в балансі ЕЕС електроенергії, виробленої ВДЕ, актуальним є визначення втрат потужності та електроенергії в електричних мережах, викликаних перетоками електроенергії від ВДЕ. Запропоновано метод, алгоритм і програма визначення складової втрат потужності та електроенергії від

ВДЕ у сумарних втратах в електричних мережах. В основу методу покладено математичну модель електричної мережі для визначення втрат, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з ВДЕ та вузлові напруги. В результаті формується матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах схеми. Значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час оперативного планування балансу електроенергії в ЕЕС та, оскільки вони є адресними, то відповідно може компенсуватися їх вартість.

7. Пропонується інтегрувати ВДЕ в розподільній електричній мережі у вигляді окремих microgrid (MG), які є ключовою частиною переходу до ЛЕС з функціонуванням на принципах SMART Grid. Місцеві MG окрім джерел генерування і споживачів мають також засоби накопичення певної кількості енергії. Для забезпечення техніко-економічної ефективності MG об'єднуються в інтелектуальну систему керування, що дозволяє більш раціонально використовувати ресурси MG, ефективно взаємодіяти з розподільчою мережею і задіяти можливості активних споживачів електроенергії в процесі балансування режиму ЛЕС. В роботі запропоновано ієрархічну структуру інтелектуальної системи ЛЕС, побудовану з використанням агрегованих microgrid. Структуровані таким чином ЛЕС з інтелектуальними електричними мережами можуть під час обмеження централізованого електрозабезпечення не втрачати потужності ВДЕ, а в повній мірі використати їх переваги разом з системами зберігання енергії для надійного електропостачання споживачів.

8. Для підвищення енергоефективності ЛЕС доцільно керування її режимами здійснювати у формі інтелектуальної системи. Інтелектуальна система ЛЕС будується як ієрархічна структура, яка реалізує керування окремими microgrid. Як агреговані microgrid вони мають власні джерела енергії, систему зберігання енергії, пасивних і активних споживачів електроенергії, а також місцеву автоматику. Завданням інтелектуальної системи ЛЕС є забезпечити її функціонування паралельно з ЕЕС як балансуючої групи та ізольовано в автономному режимі. В автономному режимі здійснюється керування у випадках, коли ЛЕС втратила зв'язок з електричною мережею ЕЕС і коли безпосередньо в ЛЕС виникають аварійні ситуації. У будь-яких випадках інтелектуальна система забезпечує самовідновлення генерування електроенергії і надійне електропостачання споживачів. Розроблено натурно-імітаційну модель для дослідження процесу реалізації SMART Grid технологій в системі

балансування режимів ЕЕС з ЛЕС на основі ВДЕ і систем збереження енергії (СЗЕ), яка забезпечує аналіз функціонування ФЕС задля формування системи децентралізації генерування ЕЕС на основі інтелектуальних ЛЕС з ВДЕ та СЗЕ.

9. Розроблено технологію самовідновлення електропостачання споживачів під час паралельної роботи ЛЕС з енергосистемою і під час ізольованої (автономної) роботи. Всі дії по самовідновленню електропостачання відбуваються в інтелектуальній системі ЛЕС. Алгоритми дій функції відновлення досягається шляхом керуючих дій по зміні конфігурації електричної мережі оптимальними перемиканнями. Стратегія відновлення системи електропостачання ґрунтується на теорії графів. Використовується метод реконфігурації мережі з мінімізацією кількості операцій перемикання. Для зменшення кількості перемикань відновлення електропостачання навантажень і генерування джерел електроенергії здійснюється структурно по microgrid. Після усунення несправностей відбуваються дії по відновленню генерування і електроспоживання локалізованої частини ЛЕС і в ній встановлюється нормальний режим роботи.

10. Розроблено апаратно-програмний комплекс (АПК) діагностики та моніторингу стану електричних мереж (microgrid) з ВДЕ для функціонування системи балансування потужності та електроенергії під час паралельної роботи з ЕЕС, а також роздільно в автономному режимі. АПК в умовах неповноти початкових даних шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу обладнання ФЕС і, в залежності від результату, зробити висновок про один із його станів (справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний) та зменшити похибку прогнозування вироблення електроенергії. АПК адаптований до обробки і аналізу масивів даних, отриманих літальними апаратами і попередньо оброблених методами аналізу часових рядів і кластеризації. Структура АПК моніторингу стану електричних мереж (microgrid) з ВДЕ вибрана таким чином, що дозволяє точніше здійснювати балансування потужності та електроенергії під час паралельної роботи з ЕЕС, а також роздільно в автономному режимі.

11. Показана ефективність використання ієрархічної інтелектуальної системи (ІС) керування режимами ЛЕС з multimicrogrid, які працюють паралельно з ЕЕС або під час екстремальних станів ізольовано в автономному режимі. ІС агрегована з операторами системи передачі і розподілу

електроенергії функціонують згідно з європейськими стандартами. Вона є ключовою частиною переходу до ЛЕС з функціонуванням на принципах SMART Grid. Завданням інтелектуальної системи ЛЕС є забезпечити її функціонування паралельно з ЕЕС як балансуєчої групи та ізольовано в автономному режимі. В автономному режимі здійснюється керування у випадках, коли ЛЕС втратила зв'язок з електричною мережею ЕЕС і коли безпосередньо в ЛЕС виникають аварійні ситуації. У будь-яких випадках інтелектуальна система забезпечує самовідновлення генерування електроенергії і надійне електропостачання споживачів. Передбачено, що алгоритми дій функції відновлення досягається шляхом керуючих дій по зміні конфігурації електричної мережі оптимальними перемиканнями. Використовується метод реконфігурації мережі з мінімізацією кількості операцій перемикання.

12. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами ЛЕС з відновлюваними джерелами електроенергії. На основі отриманих у роботі умов оптимальності, методів та алгоритмів розроблено апаратно-програмний комплекс діагностики та моніторингу стану microgrid з ВДЕ для функціонування системи балансування потужності та електроенергії, структурну схему інтелектуальної системи режимами ЛЕС на основі microgrid як агрегатів. Ефективність запропонованих у роботі методів, математичних моделей і програмних засобів підтверджено обчислювальними та практичними експериментами для реальних електричних станцій, що використовують ВДЕ. Розроблені програмні засоби для визначення множини впливових факторів на генерування ВДЕ в залежності від їх локації та метод визначення технічного стану фотоелектричних модулів передано для дослідної експлуатації. Рекомендації щодо техніко-економічних обґрунтувань розвитку ФЕС з інтелектуальною системою керування передано до впровадження у ЗЕА «Новосвіт», ТОВ «Українські технологічні продукти» та Вінковецькі РЕМ «Хмельницькобленерго». Використання результатів наукових досліджень дозволяє більш обґрунтовано реалізовувати оптимальне керування режимами ЛЕС, зменшивши SAIFI і SAIDI та покращивши якість електропостачання споживачів.

13. Результати дослідження використовуються також у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету. Захищено 2 дисертації на здобуття ступеня доктора технічних наук, 3 дисертацію на здобуття ступеня доктора філософії та 10 магістерських кваліфікаційних робіт. За результатами

дослідження опубліковано 8 монографій (4 з них на англійській мові), 36 статей у фахових журналах, 10 з них у журналах, а 9 у збірниках, що входять до наукометричних баз даних Scopus/WoS. Отримано 10 патентів та свідоцтв на інтелектуальну власність. Матеріали досліджень доповідалися на 30 конференціях, що організовуються IEEE, Міжнародних науково-технічних конференціях «Відновлювана енергетика та енергоефективність в XXI столітті» (ІВЕ НАНУ), «Сучасний стан, перспективи відновлення і розвитку релейного захисту і противарійної автоматики з використанням SMART Grid (HTCEE) та ін.

14. Для проведення досліджень та вирішення поставлених завдань за виділені кошти МОН закуплено прилади та обладнання, які використовуються також в навчальному процесі:

*Люксметр Benetech 1030* – пристрій, необхідний для оцінювання освітленості під час визначення характеристик фотомодулів.

*Пірометр -30~1250°C Benetech GM1250* – пристрій, необхідний для оцінювання температури фотомодулів під час визначення їх характеристик.

*СРС314 – Одноплатний комп'ютер на базі Vortex86DX3* – використовується під час реалізації алгоритму оцінювання деградації елементів сонячної електростанції.

*Багатофункціональний пристрій Canon PIXMA* – (придбано на зекономлені під час закупок коштів) використовується для друку звітів щодо стану діагностованих елементів.

*Тестер електробезпеки сонячних установок Solar PV150* – пристрій для визначення вольт-амперної характеристики фотомодулів. Ця характеристика є визначальною для оцінювання їх ефективності.

*Тепловізор для енергоаудиту Owon T 1332* – пристрій для виконання тепловізійного контролю, який дозволяє визначити внутрішні пошкодження в електричній схемі фотомодуля.

*Вимірювач опору TH 2516* – пристрій для оцінювання якості контактних з'єднань в схемі фотомодуля.

*Ноутбук AsusvivoBosk 15 M5131A- BQ533* – для виконання аналізу результатів діагностування елементів фотоелектричної станції та моделювання такими програмними засобами як STATISTICA 10, MATLABR2018a, тощо.

*Генератор Rigol DG 4062* – використовується для формування керуючого сигналу на інвертор фотоелектричної станції.

*Електронне обладнання для дослідження інверторів сонячних станцій на базі R&S RTB2002* – використовується для отримання вихідного сигналу інвертора та його попереднього аналізу на рівень вищих гармонік.

*Тестер акумуляторних батарей AT851* – використовується для перевірки ємності батарей, дозволяє оцінити старіння батарей та зарядного пристрою. Це є необхідним під час розв'язання задач пов'язаних з керуванням режимами електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії.

*Вимірювач опору заземлення MRU-120UA* – забезпечує вимірювання опору заземлювальних пристроїв, блискавковідводів, провідників приєднання до землі та вирівнювання потенціалів. Контроль цих параметрів дозволяє гарантувати тривалий термін роботи обладнання електроенергетичних систем і відновлюваних джерел енергії зокрема. Крім цього забезпечити умови безпечної роботи обслуговуючого персоналу.

*Комплект K540-3* для вимірювання параметрів трансформаторів призначений для виконання електромагнітних випробувань трансформаторів усіх схем і груп з'єднання згідно з вимогами ПУЕ, а також РД 34.45-51.300-97.

*Контролер ENcombicontrollerECcube2M (PV/Gen)* для керування фотоелектричною станцією (ФЕС) з накопичувачем енергії, а також системою автоматичного обліку електроенергії на власні потреби і електроенергії, що передається в електричну мережу енергосистеми. Передбачено, що контролером здійснюється керування технологічним процесом ФЕС як при паралельній роботі з зовнішньою електричною мережею, так і автономно, ізолювано від ЕЕС.

## ДОДАТОК А

### Оцінювання економічної ефективності локальної електроенергетичної системи

Оцінювання економічної ефективності роботи локальної електричної системи (ЛЕС) виконаємо шляхом аналізу зміни втрат електричної енергії при введенні чотирьох черг фотоелектричних станцій: 200 кВт, 3х600 кВт.

Результати моделювання етапності введення ФЕС показано на рисунках А.1 – А.7.

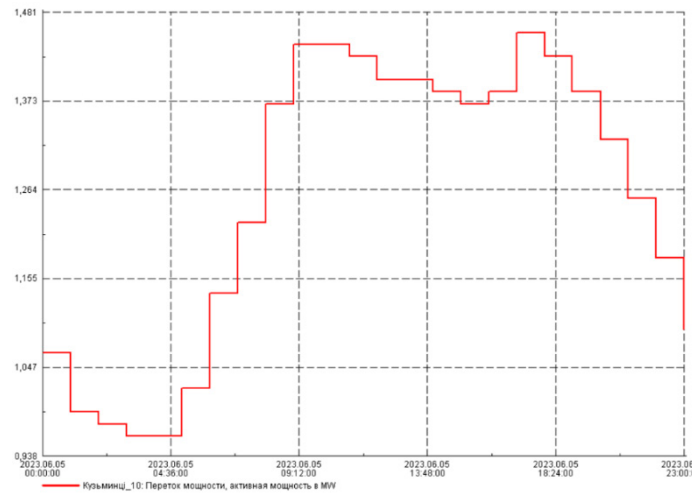


Рисунок А.1 – Графік зміни втрат активної потужності протягом доби при відсутності генерування

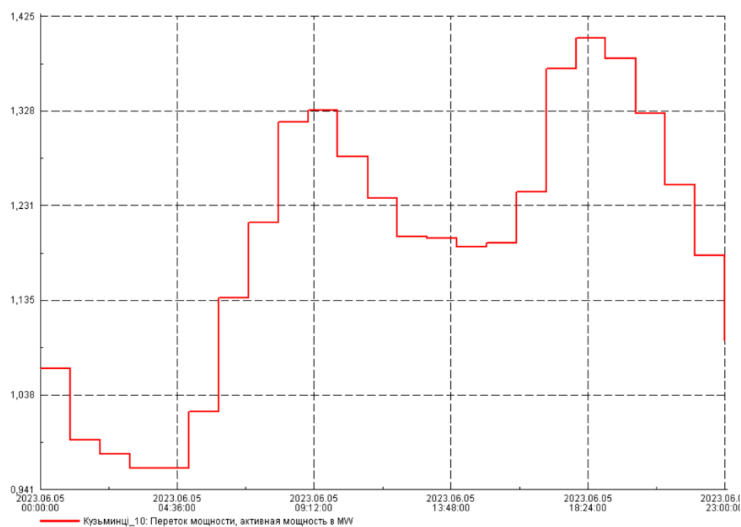


Рисунок А.2 – Графік зміни втрат активної потужності протягом доби при генеруванні ФЕС потужністю 200 кВт

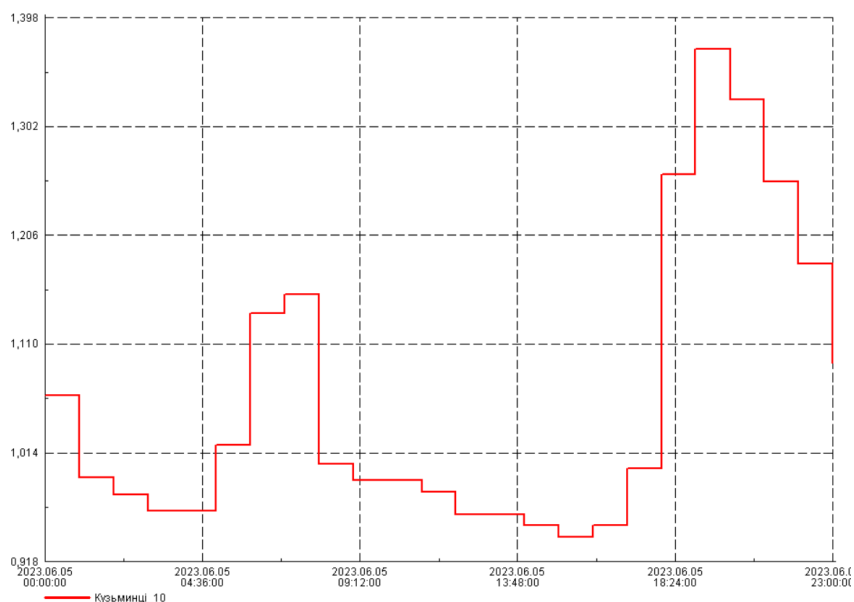


Рисунок А.3 – Графік зміни втрат активної потужності протягом доби при генеруванні ФЕС потужністю 800 кВт

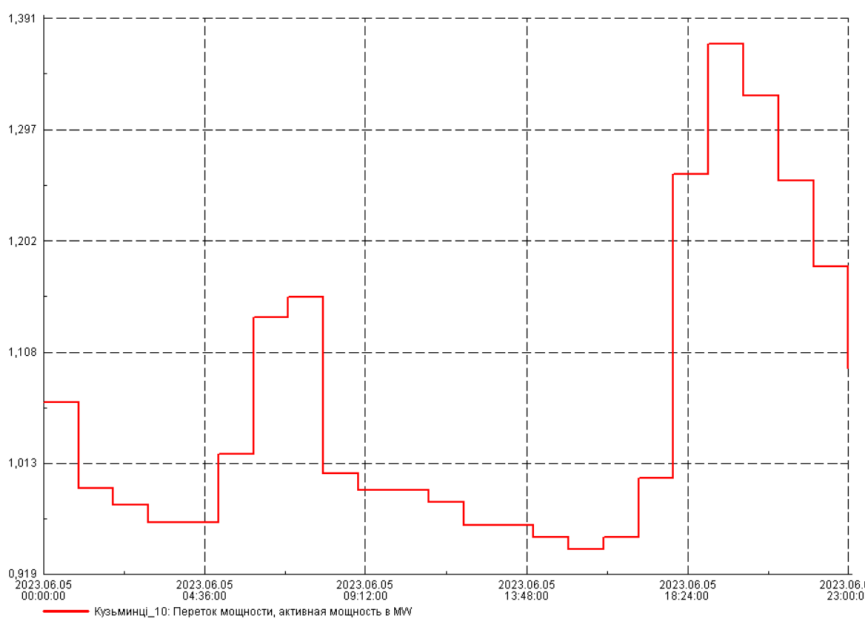


Рисунок А.4 – Графік зміни втрат активної потужності протягом доби при генеруванні ФЕС потужністю 1400 кВт

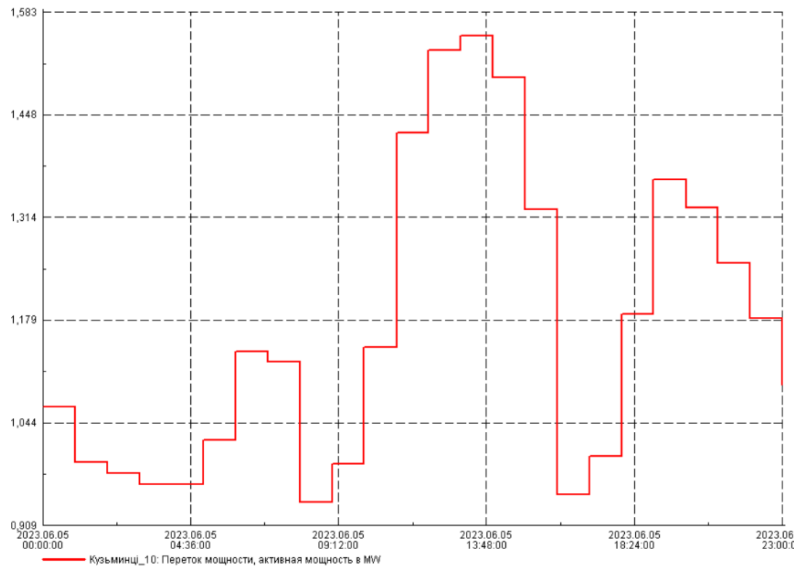


Рисунок А.5 – Графік зміни втрат активної потужності протягом доби при генеруванні ФЕС потужністю 2000 кВт

Загальна ситуація з втратами показана на рисунках 2.15 та 2.16.

Втрати електричної енергії протягом доби, МВт год

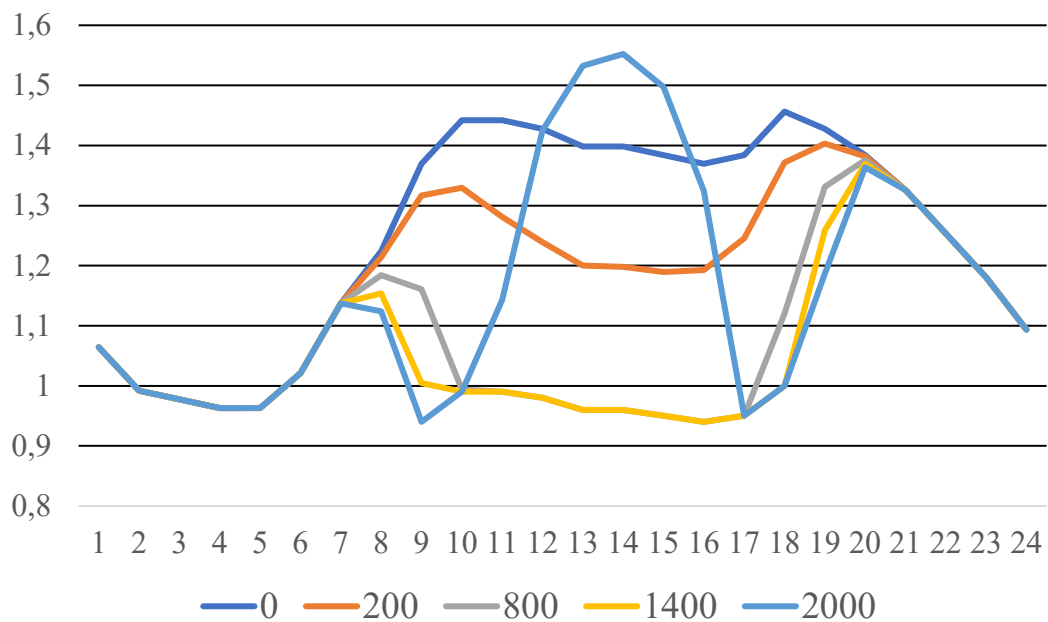


Рисунок А.6 – Графіки зміни втрати електричної енергії протягом доби при різних об'ємах генерування ФЕС

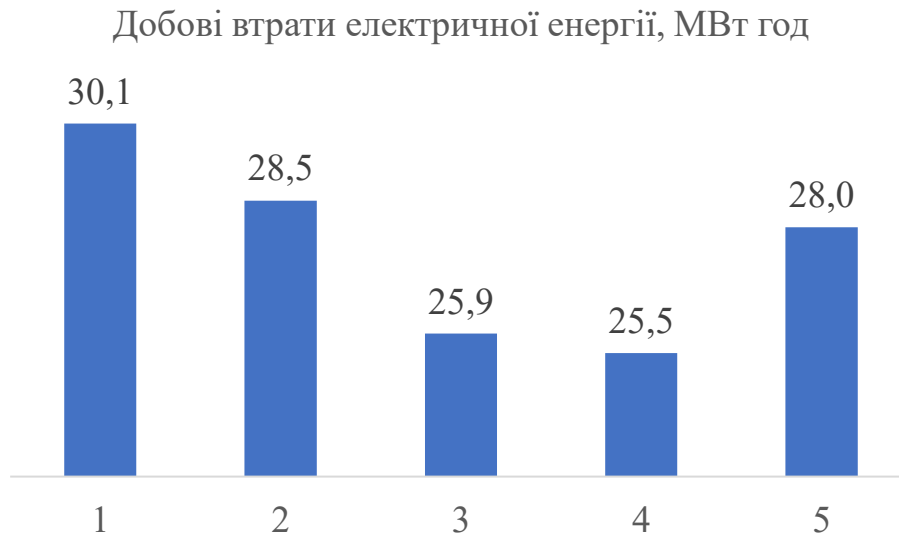


Рисунок А.7 – Добові втрати електричної енергії при різних об'ємах генерування ФЕС

Введення 2000 кВт потужності фотоелектричних станцій зумовлює зростання втрат електричної енергії. Однак ці результати відповідають максимальному генеруванню, що спостерігається (відповідно до статистичних даних) відносно рідко. Крім того за рахунок розбудови бази відпочинку прогнозується зростання споживання в літній період коли найбільш імовірні дні максимального генерування.

*Електронне наукове видання*

**Гунько Ірина Олександрівна  
Комар Вячеслав Олександрович  
Лежнюк Петро Дем'янович  
Лесько Владислав Олександрович  
Малогулко Юлія Володимирівна  
Нетребський Володимир Васильович  
Остра Наталія Вікторівна  
Рубаненко Олександр Євгенійович  
Рубаненко Олена Олександрівна  
Сікорська Олена Вікторівна  
Тептя Віра Володимирівна**

**ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ  
З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ**

Монографія

Видається в авторській редакції  
Рукопис підготовлено *В. Комаром*  
Оригінал-макет виготовлено у *РВВ ВНТУ*

Підписано до видання 06.05.2026. Гарнітура Times New Roman.  
Зам. № P2026-041.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

**press.vntu.edu.ua;**

*E-mail: rrv.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.