

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра електротехніки та електроенергетики

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ТА АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАРЯДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-  
Е23МГ-1

спеціальності : 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

\_\_\_\_\_ / Карина БАЙБАК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник \_\_\_\_\_ / Ганна МОСІЄНКО

(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент \_\_\_\_\_ / Олег ПОДОЛЯК

(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ / Артем ЧЕРНЮК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ / Юлія ОЛІЙНИК

(підпис) (ім'я та

прізвище)

Секретар ЕК \_\_\_\_\_ / Ігор КИРИСОВ

(підпис) (ім'я та

прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія

Кафедра електротехніки та електроенергетики

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу  
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Карина БАЙБАК

1. Тема «ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ  
МЕРЕЖЕВОЇ ТА АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ  
ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАРЯДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проекту: Рівень напруги, умови експлуатації,  
характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат  
дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проекту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Загрози енергетичній безпеці.  
Визначення та класифікація загроз. Методичні підходи до ідентифікації  
загроз енергетичній безпеці. Визначення загроз через порівняння фактичних  
параметрів індикаторів із цільовими (метод дисбалансів сталого розвитку).  
Визначення загроз через застосування концепції «ризик» – загрози  
наближенню до «безпечного стану». Формування множини загроз  
енергетичній безпеці. підвищення ефективності роботи мережевої та  
автономної сонячної фотоелектричної зарядної станції для електромобілів.  
Висновки. Список посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Слайди  
презентації

## 6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  | Оцінка<br>(бали) |
|--------|-------------|----------------|------------------|------------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |                  |
|        |             |                |                  |                  |

7. Дата видачі завдання « 12 » \_\_\_\_\_ 10 \_\_\_\_\_ 2024 \_\_\_\_\_ р.

**Керівник**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ганна МОСІЄНКО  
(ім'я, прізвище)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ Карина БАЙБАК  
(підпис) (ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК**  
**виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання       | Позначки керівника про виконання завдань |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|
| 1     | Визначення актуальності теми дослідження                                        | 02.10.24 –<br>05.10.24 |                                          |
| 2     | Проведення аналізу наукової літератури                                          | 06.10.24 –<br>15.10.24 |                                          |
| 3     | Виконання першого розділу дипломної роботи                                      | 16.10.24 –<br>29.10.24 |                                          |
| 4     | Виконання другого та третього розділу дипломної роботи                          | 30.10.24 –<br>26.11.24 |                                          |
| 5     | Оформлення пояснювальної записки                                                | 27.11.24 –<br>07.12.24 |                                          |

**Студент (ка)**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Карина БАЙБАК  
(ім'я, прізвище)

**Нормоконтроль**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК  
(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 64 стр., містить 13 таблиці, 11 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 36 літературних посилань.

**Об'єкт дослідження** – режими роботи сонячної електричної станції.

**Предмет дослідження** – сонячна електрична станція.

Мета роботи – ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ТА АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАРЯДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

Однією з ключових стратегій декарбонізації та екологічного транспорту є використання електромобілів (EV). Однак такі проблеми, як обмежена зарядна інфраструктура, характеристики батареї електромобілів і складнощі інтеграції в мережу, залишаються. Це дослідження пропонує підхід змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) для оптимізації підключеної до мережі сонячної фотоелектричної комерційної зарядної станції для електромобілів (SPEVCS) із системою накопичення енергії акумулятора (BESS) для максимізації прибутку. Модель MILP ефективно керує операціями SPEVCS, враховуючи коливання сонячної енергії, шаблони зарядки електромобілів і використання BESS. Координуючи графіки заряджання, можна підвищити стабільність мережі, а надлишок сонячної енергії можна вигідно використовувати. Порівняння сценаріїв SPEVCS, підключених до мережі, і поза мережею, підкреслює переваги інтеграції в мережу. Невідповідність сонячної енергії оптимальним періодам заряджання створює проблему, яку тут розглядають за допомогою використання BESS та імпорту/експорту дефіциту/надлишку електроенергії з/до мережі. Запропонована структура включає прогнози сонячної енергії та ймовірнісні прогнози прибуття EV, підвищуючи точність прийняття рішень. Такий підхід сприяє життєздатній комерційній зарядці електромобілів, просуває екологічний транспорт і зміцнює стійкість мережі.

**Об'єкт дослідження** – режими роботи сонячної електричної станції.

**Предмет дослідження** – сонячна електрична станція.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МЕРЕЖЕВА СОНЯЧНА ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, АВТОНОМНА СОНЯЧНА ФОТОЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ЕЛЕКТРОМОБІЛІ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЙ, НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

## ABSTRACT

The master's work is published on 64 pages, there are 13 tables, 11 figures that characterize the results of the research, there are 36 literary references.

The object of investigation is the operating modes of a solar power station.

The subject of investigation is the Sonic Electric Station.

Meta Robots – A COMPLETE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF MEREZHEVOY ROBOTICS AND AUTONOMOUS SONY PHOTOELECTRIC CHARGING STATIONS FOR CHARGING ELECTRIC VEHICLES.

Stage of advancement: design institutes.

Economical effectiveness and significance of the robot: this robot has a high significance on a theoretical and practical level.

One of the key strategies for decarbonization and sustainable transport is the use of electric vehicles (EVs). However, such problems as the sharing of charging infrastructure, battery characteristics of electric vehicles and flexible integration in the middle are eliminated. This further study uses a mixed integer line programming (MILP) approach to optimize a connected photovoltaic commercial charging station for electric vehicles (SPEVCS) with a battery energy storage system (BESS) to maximize profits. The MILP model effectively handles SPEVCS operations, medical power supply, electric vehicle charging patterns and BESS. By coordinating charging schedules, the stability of the threshold can be promoted, and excess sleep energy can be effectively curtailed. The updating of SPEVCS scenarios, connecting before and after the measure, reinforces the benefits of integration into the measure. The inconsistency of solar energy with optimal charging periods creates a problem, which is considered to be due to the BESS supply and import/export of electricity shortages/surpluses due to a shortage. The proposed structure includes forecasts of solar energy and highly accurate forecasts of EV arrivals, increasing the accuracy of decision making. This approach facilitates the commercial charging of electric vehicles, promotes environmentally friendly transport and improves the durability of the circuit.

The object of investigation is the operating modes of the solar power station.

The subject of investigation is the Sonic Electric Station.

**KEY WORDS:** MEREZHEVA SONYACHNA PHOTO POWER PLANT, AUTONOMOUS SONIACHNA PHOTO POWER PLANT, ELECTRIC VEHICLES, ENERGY SECURITY, INDUSTRIAL DZHEREL ENERGY, NON-TRADITIONAL JERELA ENERGY

## ЗМІСТ

|                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                                                                                                                               | <b>с.</b> |
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ                                                                                                     | 8         |
| ВСТУП                                                                                                                         | 9         |
| РОЗДІЛ 1 ЗАГРОЗИ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ БЕЗПЕЦІ                                                                                         | 10        |
| 1.1. Визначення та класифікація загроз                                                                                        | 10        |
| 1.2. Методичні підходи до ідентифікації загроз енергетичній безпеці                                                           | 11        |
| 1.2.1. Визначення загроз через порівняння фактичних параметрів індикаторів із цільовими (метод дисбалансів сталого розвитку)  | 12        |
| 1.2.2. Визначення загроз через застосування концепції «ризик» – загрози наблизенню до «безпечного стану»                      | 16        |
| 1.3. Формування множини загроз енергетичній безпеці                                                                           | 21        |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1                                                                                                         | 31        |
| РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ТА АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ | 32        |
| 2.1. Перспективи впровадження відновлювальних джерел енергії                                                                  | 32        |
| 2.2. Модель і формулювання SPEVCS                                                                                             | 36        |
| 2.2.1. Дохід і спосіб зарядки EV                                                                                              | 37        |
| 2.2.2. Надлишок і дефіцит влади                                                                                               | 38        |
| 2.2.3. Чистий дохід                                                                                                           | 40        |
| 2.2.4. Формулювання фотоелектричної системи: економічна підмодель                                                             | 41        |
| 2.2.5. Модель навантаження                                                                                                    | 42        |
| 2.2.6. Система накопичення енергії акумулятора                                                                                | 43        |
| 2.2.7. Загальне рішення та чистий прибуток                                                                                    | 45        |
| 2.3. Дані, результати та аналіз                                                                                               | 46        |
| 2.3.1. Дані SPEVCS                                                                                                            | 46        |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
|                                        | 7  |
| 2.3.2. Дані про тарифи та навантаження | 48 |
| 2.3.3. Результати та аналіз            | 49 |
| 2.3.3.1. SPEVCS із сіткою              | 49 |
| 2.3.3.2. Оптимальний розмір батареї    | 54 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2                  | 58 |
| ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ                | 59 |
| СПИСОК ПОСИЛАНЬ                        | 60 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

EV – електромобіль

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ШИМ – широтно–імпульсна модуляція

LPF – фільтр низьких частот

BPF – смуговий фільтр

PV – фотоелектрична система

ЕМ – електрична мережа

ММ – математичні моделі

МКЕ – метод кінцевих елементів

МКР – метод кінцевих різниць

MPPT – точка максимальної потужності

ПП – первинна підстанція

ПС – вторинна підстанція

РМ – розподільчі мережі

РПН – регулювання напруги під напругою

СНАУ – система нелінійних алгебраїчних рівнянь

СЛАУ – система лінійних алгебраїчних рівнянь

FEMM – Finite Element Method Magnetics

ПДЕ – поновлювальні джерела енергії

СЕП – система електропостачання

ФЕУ – фотовольтанична електрична станція

## ВСТУП

Однією з ключових стратегій декарбонізації та екологічного транспорту є використання електромобілів (EV). Однак такі проблеми, як обмежена зарядна інфраструктура, характеристики батареї електромобілів і складнощі інтеграції в мережу, залишаються. Це дослідження пропонує підхід змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) для оптимізації підключеної до мережі сонячної фотоелектричної комерційної зарядної станції для електромобілів (SPEVCS) із системою накопичення енергії акумулятора (BESS) для максимізації прибутку. Модель MILP ефективно керує операціями SPEVCS, враховуючи коливання сонячної енергії, шаблони зарядки електромобілів і використання BESS. Координуючи графіки заряджання, можна підвищити стабільність мережі, а надлишок сонячної енергії можна вигідно використовувати. Порівняння сценаріїв SPEVCS, підключених до мережі, і поза мережею, підкреслює переваги інтеграції в мережу. Невідповідність сонячної енергії оптимальним періодам заряджання створює проблему, яку тут розглядають за допомогою використання BESS та імпорту/експорту дефіциту/надлишку електроенергії з/до мережі. Запропонована структура включає прогнози сонячної енергії та ймовірнісні прогнози прибуття EV, підвищуючи точність прийняття рішень. Такий підхід сприяє життєздатній комерційній зарядці електромобілів, просуває екологічний транспорт і зміцнює стійкість мережі.

**Об'єкт дослідження** – режими роботи сонячної електричної станції.

**Предмет дослідження** – сонячна електрична станція.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГРОЗИ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ БЕЗПЕЦІ

### 1.1. Визначення та класифікація загроз

Закон України «Про національну безпеку України» дає визначення загроз національній безпеці України та відносить до них «явища, тенденції і чинники, що унеможливають чи ускладнюють або можуть унеможливити чи ускладнити реалізацію національних інтересів та збереження національних цінностей України» [35].

Слід зазначити, що будь-яка класифікація загроз до певної міри є умовною, оскільки, по-перше, залежно від мети та методів наукового дослідження може здійснюватися на основі різних підстав та переслідувати різні цілі; по-друге, має суб'єктивний характер, тому що залежить від суб'єкта, який її здійснює, та його здатності розрізняти ознаки об'єкта класифікації.

Так, залежно від критеріїв класифікації та ознак загроз їх можна розподілити за:

- походженням (природного, техногенного характеру, пов'язані з діями людей);
- місцем виникнення (внутрішні та зовнішні);
- сферами безпеки (воєнна, державна, громадська, зовнішньополітична, економічна, енергетична, екологічна, соціальна, інформаційна безпека, кібербезпека тощо);
- імовірністю та величиною шкоди (наслідків);
- часом прояву;
- масштабом поширення;
- об'єктом спрямування (елементи системи, у т. ч. інфраструктура, технології, люди, та/чи її функції – виробництво ПЕР, постачання ПЕР тощо);

- принципом, характером чи формою прояву (безпосередні чи опосередковані; реальні чи потенційні; явні чи приховані; об'єктивні чи суб'єктивні; навмисні чи випадкові; передбачувані чи непередбачувані тощо).

Для цілей дослідження та враховуючи чинну класифікацію надзвичайних ситуацій в Україні використовується така ієрархія загроз енергетичній безпеці:

- 1) загрози загальнодержавного рівня;
- 2) загрози рівня галузі/підгалузі/території;
- 3) загрози на корпоративному та об'єктовому рівні.

При цьому для класифікації використовуються й інші вищезгадані ознаки, зокрема за походженням, місцем виникнення, імовірністю та величиною шкоди тощо.

## **1.2. Методичні підходи до ідентифікації загроз енергетичній безпеці**

Здійснюючи стратегування та переведення об'єкта з поточного у «безпечний» стан, суб'єкт налаштовуватиме систему управління реагування на загрози, зважаючи на досягнення цього стану. Проектована система управління має забезпечити спроможність до: ідентифікації загроз, запобігання загрозам, реагування на загрози; ліквідації наслідків реалізації загроз; відновлення бажаної траєкторії руху до «цільового стану». У свою чергу, суб'єкт має ідентифікувати загрози та пропонувати адекватні управлінські рішення.

Зазначимо, що найбільш поширеними способами ідентифікації загроз є ті, котрі здійснюються на основах оцінювання відхилення індикаторів від цільових значень та концепції ризику.

Один із основних підходів щодо ідентифікації загроз полягає у

порівнянні «поточних» та «цільових» значень обраних параметрів опису системи. Множина загроз формується із набору параметрів, що мають найбільше (критичне) відхилення від «цільового» індикативного значення: що більше відхилення, то вагоміша загроза. У рамках цього методологічного підходу будується система індикаторів, де формується діапазон індикативних значень із трьох (низький, нормальний, високий) або п'яти (незначний, негативний, допустимий, високий, критичний) складових частин для оцінювання рівня «критичності» загрози.

Інший підхід базується на застосуванні концепції «ризик». Загрози визначаються через ідентифікацію дестабілізуючих чинників, що зумовлюють відхилення параметрів від «безпечного стану» або потенційно можуть призвести до відхилення. У подальшому оцінюється ймовірність виникнення таких загроз і наслідків їх впливу на систему (ризик завдання системі шкоди). Множина загроз формується з ідентифікованих чинників, що зумовлюють найбільший ризик системі (найбільш критичний вплив).

### **1.2.1. Визначення загроз через порівняння фактичних параметрів індикаторів із цільовими (метод дисбалансів сталого розвитку)**

Використовуючи існуючу динаміку індикаторів, інтегральних індексів сталого розвитку та інтегральні порогові значення, можна обчислити відхилення інтегральних індексів складових частин та індикаторів енергетичної безпеки від їх середніх оптимальних значень (гомеостатичного плато), які можна вважати критеріями досягнення безпечного сталого розвитку [36, с. 195].

Для визначення переліку загроз використовуються дві критеріальні ознаки:

1) за віддаленістю від точки сталого розвитку (визначається перелік та важливість загроз);

2) за вагомістю впливу через розрахунок коефіцієнтів еластичності (визначається міра впливу загроз).

Саме одночасне нормування та інтегральна згортка індикаторів та їх порогових значень дає змогу порівнювати в одному масштабі відхилення інтегральних індексів від відповідних середніх оптимальних порогових значень (критеріїв сталого розвитку) (рисунок 1.1).

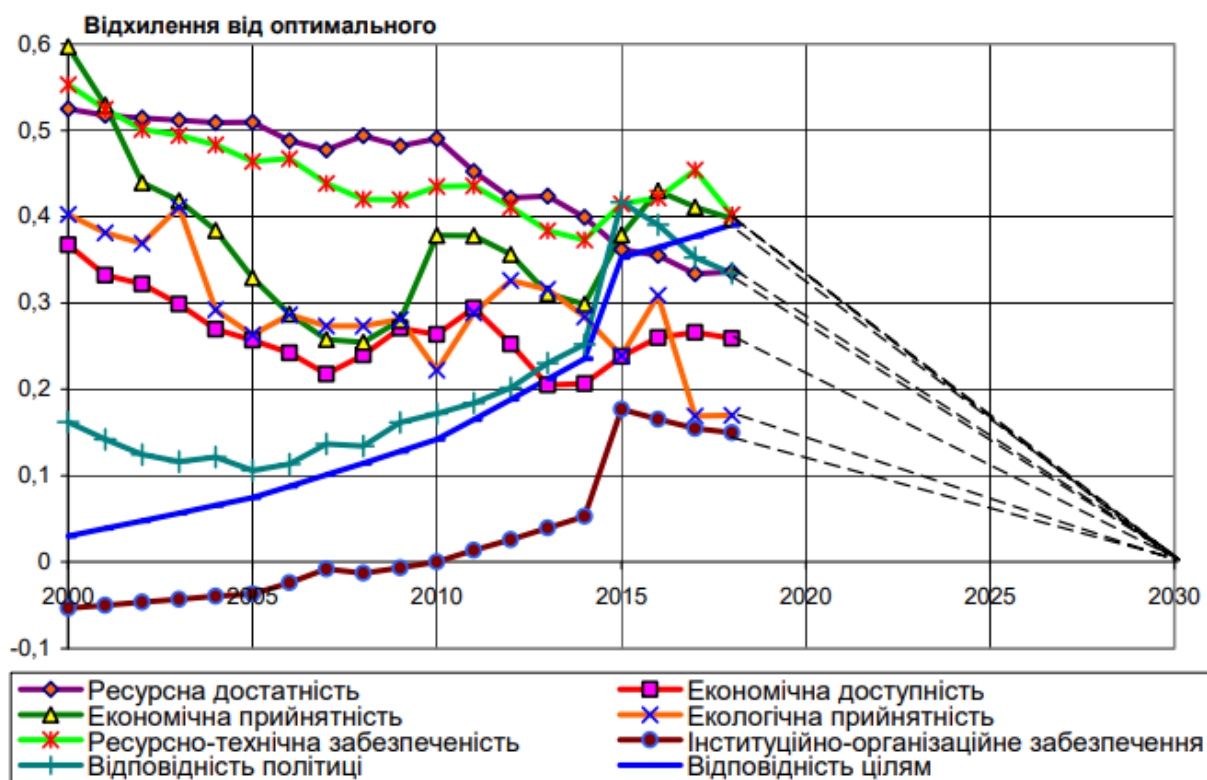


Рисунок 1.1. – Показники динаміки відхилень інтегральних індексів від критеріїв сталого розвитку до 2030 рр

Проведені розрахунки відображають поточний рівень енергетичної безпеки й ілюструють те, що найбільш відстають від рівня безпечного сталого розвитку та, відповідно, становлять загрозу енергетичній безпеці (станом на кінець 2018 р.) зазначені складові частини у такій послідовності (рисунок 1.1): ресурсно-технічна забезпеченість, економічна прийнятність, відповідність цілям, ресурсна достатність, відповідність політиці, економічна доступність, інституційно-організаційне забезпечення, екологічна прийнятність.

Найважливіше завдання сталого розвитку – ліквідувати дисбаланси, тобто зменшити до нуля відхилення кожної складової частини сталого розвитку, наприклад, до кінця 2030 р. Вирівнювання диспропорційності та зведення до нуля відхилень від критерію сталого розвитку забезпечуватиме збалансований сталий розвиток. Більш зрозумілу картину дисбалансів та перелік загроз за важливістю можна отримати за відповідними індикаторами кожної складової частини: із 42 індикаторів енергетичної безпеки 40 становлять загрозу, із них: 22 – перебувають у критичній (червоній) зоні (нижче нижнього порогу), 18 – у кризисній (помаранчевій) зоні (між нижнім пороговим та нижнім оптимальним), і лише два індикатори містяться в оптимальній (зеленій) зоні

Для визначення вагомості впливу загроз обчислюють коефіцієнти еластичності кожної складової частини та індикаторів, які пояснюють міру впливу окремих складових частин та індикаторів на рівень енергетичної безпеки (на скільки відсотків зміниться вихідна величина у при зміні на 1 % вхідної величини  $x$ ) і є необхідною інформацією для розроблення пріоритетних заходів впливу:

$$E = \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{x}{y}, \quad (1.1.)$$

де  $x$  – будь-якій індикатор сталого розвитку;  $y$  – інтегральний показник;  $\Delta x$  – приріст відповідного індикатора;  $\Delta y$  – приріст інтегрального показника.

Перелік перших десяти критичних загроз за віддаленістю від критерію сталого розвитку (важливість загроз) та вагомість їх впливу на стан енергетичної безпеки через розрахунок коефіцієнтів еластичності наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Критичні загрози та вагомість їх впливу на рівень енергетичної безпеки

| Складові частини та індикатори енергетичної безпеки – загрози за віддаленістю від критерію сталого розвитку (важливість загрози) | Складові частини та індикатори енергетичної безпеки – загрози за вагомістю впливу                                              | Коефіцієнт еластичності |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>За складовими частинами</b>                                                                                                   |                                                                                                                                |                         |
| 1. Ресурсно-технічна забезпеченість                                                                                              | 1. Інституційно-організаційне-забезпечення                                                                                     | 0,1524                  |
| 2. Економічна прийнятність                                                                                                       | 2. Відповідність цілям                                                                                                         | 0,1508                  |
| 3. Відповідність цілям                                                                                                           | 3. Відповідність політиці                                                                                                      | 0,1458                  |
| 4. Ресурсна достатність                                                                                                          | 4. Ресурсна достатність                                                                                                        | 0,1451                  |
| 5. Відповідність політиці                                                                                                        | 5. Економічна прийнятність                                                                                                     | 0,1369                  |
| 6. Економічна доступність                                                                                                        | 6. Екологічна прийнятність                                                                                                     | 0,0965                  |
| 7. Інституційно-організаційне забезпечення                                                                                       | 7. Економічна доступність                                                                                                      | 0,0861                  |
| 8. Екологічна прийнятність                                                                                                       | 8. Ресурсно-технічна забезпеченість                                                                                            | 0,082                   |
| <b>За індикаторами</b>                                                                                                           |                                                                                                                                |                         |
| 1. Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI), <i>хв/рік</i>                                | 1. Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI), <i>хв/рік</i>                              | -0,1519                 |
| 2. Відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою                                                        | 2. Кінцева вуглеємність енергії, <i>г CO<sub>2</sub>/МДж</i>                                                                   | -0,0979                 |
| 3. Рівень тінізації ПЕК, % <i>ВДВ ПЕК</i>                                                                                        | 3. Рівень тінізації ПЕК, % <i>ВДВ ПЕК</i>                                                                                      | -0,096                  |
| 4. Рівень тіньового завантаження капіталу (добувна галузь та виробництво електроенергії, газу і води), % <i>від офіційного</i>   | 4. Рівень тіньового завантаження капіталу (добувна галузь та виробництво електроенергії, газу і води), % <i>від офіційного</i> | -0,0907                 |
| 5. Рівень запасів/резервів від обсягів річного/місячного споживання за видами ПЕР, %                                             | 5. Ресурсна достатність нафти та нафтопродуктів, %                                                                             | -0,0617                 |
| 6. Якість державної політики, %                                                                                                  | 6. Ресурсна достатність вугілля, %                                                                                             | -0,0579                 |
| 7. Сонячна та вітрова енергетика, % <i>у загальному обсязі</i>                                                                   | 7. Наявність законодавства, %                                                                                                  | 0,0529                  |
| 8. ВВП на 1 особу, <i>тис. дол. США/ос. (за поточним обмінним курсом)</i>                                                        | 8. Відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою, %                                                   | 0,0507                  |
| 9. Рівень тіньового споживання ПЕР, % <i>ВВП України</i>                                                                         | 9. Якість кадрів (технічних та управлінських), %                                                                               | 0,0503                  |
| 10. Рівень оновлення основних засобів ПЕК, %                                                                                     | 10. Якість послуг (первинних ресурсів, продуктів та енергії), %                                                                | 0,0497                  |

Найбільш критичними загрозами серед складових частин енергетичної безпеки є перші чотири, які перебувають у червоній зоні – нижче нижнього порогу. Зміна цих складових частин та відповідних критичних індикаторів дуже сильно впливає на енергетичну безпеку, тож вони мають бути в полі особливої уваги під час здійснення реформ. Зміна з негативної на позитивну динаміку цих складових частин та індикаторів є першочерговим завданням уряду, що стане об'єктивним показником ефективності реформ у сфері енергетичної безпеки, які здійснюються.

### **1.2.2. Визначення загроз через застосування концепції «ризик» – загрози наближенню до «безпечного стану»**

Визначення загроз через порівняння фактичних параметрів індикаторів із цільовими не слід розглядати як достатню умову визначення критичних загроз енергетичній безпеці. Цей метод дозволяє зорієнтувати дослідника (управлінця) на детальніший аналіз цього параметра та визначення всіх чинників, що зумовлюють відповідне відхилення від цільових значень (цільового стану системи).

Наприклад, поточні критичні значення «індексу тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI)» можуть розглядатись як загроза енергетичній безпеці. Поряд із тим цей індекс та його поточні значення є характеристикою стану системи електропостачання (підсистеми або складника системи енергетичної безпеки), що зумовлено існуванням низки негативних чинників впливу (загроз) (таблиця 1.2).

Загрози можуть класифікуватись та групуватись на основі критерію «цільового спрямування» дії загрози (вплив на групи параметрів, що описують систему) та «джерел загроз» (природні, техногенні, соціальні, управлінські, фізичні, у т. ч. воєнні тощо).

Тривалість процесу трансформації зумовлює необхідність уваги до траєкторії наближення системи до «безпечного стану», що формує іншу групу загроз безпеці системи – загрози наближенню до «безпечного стану».

При плануванні дій щодо досягнення цільового рівня енергетичної безпеки необхідно виходити із концепції управлінської діяльності та горизонту планування. Весь теоретично можливий набір загроз можна представити відповідно до матриці загроз, що відображає мету переведення системи у безпечний стан (таблиця 1.3). Зазначимо, що наведені у таблиці загрози відображають загрози управлінської сфери і нашу позицію щодо найбільшої ваги такого типу загроз серед усіх інших.

Таблиця 1.2 – Загрози системі електропостачання

| Основні дестабілізуючі чинники впливу (загрози)                                                                                                                                                                                                                                                   | Результати впливу на функціонування системи (економічні аспекти)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Результати впливу на зв'язки системи (фізичний вимір мережі)                                                                                                                                                                           | Результати впливу елементи (складові частини системи електропостачання)                                                                                                                                                                                                                                                        | Надійність та доступність електропостачання (вплив на споживачів)                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Високі «зелені» тарифи.<br>Імпорт електроенергії.<br>«Покладення спеціальних обов'язків» (ПСО) у непрозорий спосіб, коли обсяг ПСО суттєво перевищує суспільні потреби в електроенергії.<br>Збереження заборони на відключення (захисних категорій)<br>Неврегульованість проблеми «старих» боргів | Непропорційність зростання частки платежів на «зелену» енергетику, що зумовлює зростання цін.<br>Скорочення ринку для українських виробників.<br>Виведення з ринкових умов значної частки ринку (збереження та зростання субсидування на ринку).<br>Збереження перехресного субсидування.<br>Зростання боргів (державні шахти, КП «Компанія «Вода Донбасу», комунальні підприємства, | Непропорційність зростання частки ВДЕ до наявних маневрових потужностей (зростання нестабільності).<br>Зростання частки імпорту в «проблемній» зоні (з точки зору добового графіка споживання)                                         | Позапроєктні режими роботи обладнання (режими АЕС, ТЕС, ГАЕС) унаслідок команд диспетчера.<br>Зростання заборгованостей перед виробниками.<br><br>Примусове припинення виробничої діяльності (атомної та теплової генерації, видобування вугілля)                                                                              | Зростання вартості постачання для споживача.<br><br>Невизначеність щодо майбутніх планів розвитку                            |
| Основні дестабілізуючі чинники впливу (загрози)                                                                                                                                                                                                                                                   | Результати впливу на функціонування системи (економічні аспекти)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Результати впливу на зв'язки системи (фізичний вимір мережі)                                                                                                                                                                           | Результати впливу елементи (складові частини системи електропостачання)                                                                                                                                                                                                                                                        | Надійність та доступність електропостачання (вплив на споживачів)                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | водоканали)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                              |
| Недосконалість роботи «Ринку балансування».<br>Відсутність «Ринку допоміжних послуг».<br>Запровадження неринкового регулювання цін на ринку «прайс-кепи».<br>Незбалансованість «Гарантованого покупця».<br>Відсутність достатньої прозорості роботи ринку.<br>Несиметричність інформації          | Відсутність економічних механізмів балансування (цінові стимули).<br>Відсутність механізмів балансування (допоміжні послуги, управління попитом).<br>Створення умов збитковості роботи суб'єктів ринку (ТЕС, ГАЕС).<br>Накопичення заборгованості при перепродажі для ПСО та «зеленої» енергії перед АЕС та ГЕС.<br>Зростання ризиків судових рішень та блокування роботи            | Недостатність технічних механізмів балансування (маневрові потужності, акумулювання).<br>Зростання частоти «вимушених» команд у цілях безпеки (нестабільність системи через ВДЕ).<br>Неповна інформація, проблеми достовірності обліку | Неможливість спланувати режими роботи (позапроєктні режими внаслідок команд диспетчерів).<br>Погіршення технічного стану (зношування обладнання, відсутність модернізації).<br>Незбалансованість резервів на електростанціях (відсутність або затоварення).<br>Ускладнення розуміння інформації про роботу ланцюжка постачання | Падіння якості послуг.<br>Зростання імовірності припинення постачання.<br>Відмова споживачів від централізованого постачання |
| Втрата системи управління та планування внаслідок відміни раніше чинного законодавства                                                                                                                                                                                                            | Відсутність прогнозування:<br>- динаміки попиту (розвитку економіки);<br>- щорічного прогнозного енергетичного балансу                                                                                                                                                                                                                                                               | Відсутність розуміння динаміки споживання (розвитку економіки) та планування інвестиційних вкладень                                                                                                                                    | Втрата інвестиційної привабливості внаслідок непередбачуваності режимів роботи, відсутність прогнозу попиту з боку споживачів                                                                                                                                                                                                  | Зростання загроз енергетичній безпеці                                                                                        |

Таблиця 1.3 Модельна матриця загроз енергетичній безпеці на базі концепції «ризик» та системного підходу

| Параметри системного опису                                                               | Загрози                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                          | загрози стану як є тепер <sup>68</sup>                                                                                     | загрози стану як має бути <sup>69</sup>                                                                                                                                                                                    | загрози «наближенню» до «безпечного стану» <sup>70</sup>                                                                                                                                                                   |
| <b>Цілісна система</b>                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |
| Енергоемність валового внутрішнього продукту країни                                      | Низька ефективність енерговикористання; непропорційна структура економіки                                                  | Недостатність інвестицій в оновлення фондів; відсутність розвитку галузей з високою валовою доданою вартістю; обмеження ринків, регульовані державою ринки енергоресурсів                                                  | Збереження державного популізму в управлінні; відсутність змін у структурі економіки; втручання держави в роботу енергетичних ринків                                                                                       |
| <b>Елементи системи та зв'язки</b>                                                       |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |
| Частка відновлюваних джерел енергії в енергобалансі                                      | Непропорційність частки ВДЕ у структурі генерації електроенергії                                                           | Непропорційність інструментів стимулювання (регулювання) частки відновлюваних джерел енергії у балансі та структурі генерації; відсутність інструментів утилізації обладнання; технологічна залежність; вимивання ресурсів | Зростання частки відновлюваних джерел енергії у балансі є надто швидким для ринку (вимивання та нестача ресурсів), неприйнятним для споживачів (вартість) та інших суб'єктів ринку (несприйняття позаконкурентних переваг) |
| <b>Функції та ролі</b>                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |
| Стратегічне планування (управлінські процеси та інфраструктура; наявність законодавства) | Втрата «системи управління та планування» галузю внаслідок відміни раніше чинного законодавства, некваліфікованість рішень | Відсутність системи стратегічного управління (прогнозування, цілепокладання, планування, моніторингу) галузю, нерозуміння процесів розвитку галузі, некваліфікованість рішень                                              | Відсутність системності в реформуванні; адміністративне (ручне) втручання у роботу ринків та суб'єктів господарювання; збереження популістичної орієнтованості політиків                                                   |
| Ціноутворення                                                                            | Некваліфікованість рішень, відсутність стратегічного плану розвитку, недотримання вимог законодавства                      | Збереження державного регулювання, некваліфікованість рішень, відсутність стратегії розвитку економіки та енергетики, політичний популізм, соціальний патерналізм                                                          | Несистемність реформування, втручання держави в роботу ринків та суб'єктів господарювання, збереження популістичної орієнтованості політиків                                                                               |

| Параметри системного опису                 | Загрози                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | загрози стану як є тепер <sup>68</sup>                                                                                                                     | загрози стану як має бути <sup>69</sup>                                                                                                                | загрози «наближенню» до «безпечного стану» <sup>70</sup>                                                                                                          |
| <b>Процеси</b>                             |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                   |
| Надійність постачання                      | Відсутність моніторингу, зношена інфраструктура, втрата кваліфікації персоналом                                                                            | Відсутність системи управління, відсутність механізму покарання, подальше старіння інфраструктури, відсутність кваліфікованого персоналу               | Руйнування системи управління та моніторингу, відсутність відповідальності, руйнування інфраструктури, втрата персоналу                                           |
| Оновлення основних засобів ПЕК             | Низька привабливість для інвесторів через утримання державою низьких цін на продукцію галузі                                                               | Відсутність стабільної та прозорої політики ціноутворення, регульовані державою ринки енергоресурсів                                                   | Збереження державного популізму в управлінні, непрозорість відносин в енергетиці, тінізація економіки                                                             |
| Безпека та захист об'єктів                 | Неадекватність захисту рівню загроз, відсутність фінансування, недостатність кваліфікованого персоналу                                                     | Відсутність моніторингу загроз, неадекватність реагування, відсутність знань і підготовки, відсутність фінансування                                    | Нерозуміння загроз, відсутність змін в організації систем захисту                                                                                                 |
| <b>Матеріал системи</b>                    |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                   |
| Якість кадрів (технічних та управлінських) | Втрата кваліфікації, втрата заінтересованості результатами роботи, нехтування вимогами законодавства                                                       | Низький рівень кваліфікації персоналу, відсутність стратегічності в управлінні, нерозуміння процесів галузі                                            | Руйнування системи підготовки персоналу, нерозуміння світових процесів (економічних, технологічних, розвитку знань) та системного взаємозв'язку з іншими галузями |
| Відповідність лідерів завданням            | Низький рівень кваліфікації, орієнтація на групові та персональні інтереси, нехтування вимогами законодавства, низька культура безпеки, конфлікт інтересів | Відсутність знань, некваліфікованість, неспроможність до стратегування, виключеність зі світових процесів, низька культура безпеки, конфлікт інтересів | Втрата кваліфікації, популізм, відсутність бачення «більшої системи», орієнтація на персональні інтереси, низька культура безпеки, конфлікт інтересів             |

Класифікація загроз також може здійснюватись з огляду на «деталізацію» аналізу системи. В окремих випадках доцільно детальніше розглянути окремі складові частини системи та визначити загрози цим складовим частинам (елементам, зав'язкам, функціям, процесам). Зокрема, існує теоретична та практична необхідність аналізувати ризики життєво-важливим енергетичним системам, які забезпечують процес надання цільової функції/послуги.

Залежно від цілей дослідника формування системного опису може бути акцентовано на будь-якому аспекті. Так, опис тільки фізично-ресурсної складової частини енергопостачання зведеться до відображення критичної енергетичної інфраструктури, що відображатиме потребу дослідника/управлінця звернути увагу на фізичні аспекти функціонування системи енергопостачання (ресурсна забезпеченість, фізична безпека, технічна надійність, стійкість).

Прикладом аналізу управлінського складника може слугувати проведений аналіз загроз забезпечення сталості функціонування системи електропостачання (таблиця 1.2). Подібний опис процесу дає суб'єктові управління розуміння «спроможності» системи щодо виконання його управлінських рішень, тобто спроможності системи досягати цілей розвитку, реагувати на загрози та досягати «безпечного» стану. У той же час таке розкриття процесу надання цільової функції/послуги дає змогу врахувати особливості країни, зокрема «політичної та управлінської специфіки України».

Оцінювання загроз на прикладі сфери електропостачання відкриває необхідність розмежування внутрішніх та зовнішніх загроз. Усі перераховані загрози (таблиця 1.2) є такими, що сформовані всередині цієї системи її недосконалістю або неадекватними управлінськими рішеннями, тобто це загрози внутрішні.

За адекватних управлінських рішень та збалансованої системи (як, наприклад, у США) вважається, що управлінські рішення забезпечують адекватну реакцію на загрози. Тому приділяється увага передусім загрозам, які формуються ззовні внаслідок дій інших суб'єктів (диверсії, кібератаки, економічні чи політичні рішення тощо) або несуб'єктних впливів (природні катаклізми, техногенні аварії). Ці загрози є зовнішніми.

Слід зазначити, що у західній практиці аналізу загроз енергетичній безпеці застосовуються лише зовнішні загрози, очевидно, через те, що система має бути збалансованою, а управлінські рішення не можуть

прийматися на шкоду своїй системі (що різко контрастує з «політичною та управлінською специфікою» України).

### **1.3. Формування множини загроз енергетичній безпеці**

Практично весь теоретично можливий набір значущих загроз можна представити у вигляді матриці загроз та їх впливу на різні складові частини системи енергетичної безпеки. Цей перелік відображає не тільки загрози управлінської сфери (які, мають найбільший вплив), а, зважаючи на підхід щодо врахування всіх типів загроз «all hazards approach», включає загрози природного й техногенного характеру, зловмисні дії тощо.

При цьому використовується така ієрархія загроз:

- 1) загрози загальнодержавного рівня;
- 2) загрози рівня галузі/підгалузі/території;
- 3) загрози на корпоративному та об'єктовому рівнях.

Скорочений перелік загроз «безпечному стану» у сфері енергетичної безпеки України (зовнішніх та внутрішніх) сформований на основі пропонованого системного підходу та концепції «ризик» (таблиця 1.4.).

Проведене в рамках цього дослідження експертне оцінювання загроз та аналіз ризиків енергетичній безпеці свідчать про досить симптоматичні результати, які чітко виокремлюють надзвичайно високий вплив загроз, що формуються «політичною та управлінською специфікою» України (рисунок 1.2).

На рисунку 1.2 відображені внутрішні загрози енергетичній безпеці загальнодержавного рівня за даними таблиці 1.5. Фактично якість матеріалу системи, особливо з точки зору адекватності управлінських рішень, визначає найвищі загрози енергетичній безпеці України на сучасному етапі.

Таблиця 1.4 – Орієнтовний перелік зовнішніх та внутрішніх загроз енергетичній безпеці України.

| Блок параметрів                    | Загрози внутрішні                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Загрози зовнішні                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Цілісна система</b>             | Наростання дефіциту інвестицій в оновлення енергетичної інфраструктури.<br>Збереження високої енергоємності національної економіки.<br>Зростання ресурсної, технологічної залежності.<br>Втрата привабливості енергетики України для ринків та суб'єктів господарювання ЄС (втрата механізмів трансферу кращої практики та технологій з ЄС).<br>Виникнення кадрового дефіциту (наявності кваліфікованого персоналу)                                                                                                                                                                      | Блокування постачання необхідних ресурсів та обладнання для потреб енергетики України.<br>Вплив зміни клімату на структуру та режими енергоспоживання.<br>Фізичні загрози (війна, терористичні акти, кібератаки).<br>Політично зумовлені рішення зовнішніх гравців (ЄС, США, Росії тощо) щодо врахування ними національних інтересів України                                                                            |
| <b>Елементи системи та зв'язки</b> | Деградація технічного стану окремих елементів системи (енергетичної інфраструктури: мережі, підприємства).<br>Деградація корпоративного менеджменту (суб'єкти господарювання неспроможні конкурувати на відкритих ринках).<br>Деградація системи державного управління (втрата спроможностей надання адекватної оцінки ситуації, прогнозування, моделювання та стратегічного планування).<br>Втрата координації та взаємозв'язку із завданнями національної безпеки.<br>Втрата системи підготовки та перепідготовки кадрів                                                               | Вплив з метою ліквідації окремих елементів системи (суб'єктів господарювання, виробництв, технологій, кадрів).<br>Відключення України від системи (мереж) взаємодії із системами інших країн (системи електро- та газопостачання).<br>Порушення системи управління (структура відомств, призначення, цілі).<br>Припинення фінансування проєктів міжнародними фінансовими інституціями (ЄБРР, СБ, міжурядові уголи тощо) |
| <b>Функції та ролі</b>             | Збереження державного попиту в регулюванні енергетики та енергетичних ринків.<br>Збереження недосконалих моделей та інструментів ринкового регулювання енергетичних ринків.<br>Зростання рівня недостатності інформаційного забезпечення.<br>Відсутність спроможностей до кризового реагування.<br>Відсутність системи стратегічного планування та координації розвитку економіки та енергетики                                                                                                                                                                                          | Зовнішній вплив (Росія) з метою блокування запровадження правил функціонування енергетики відповідно до положень законодавства ЄС                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Процеси</b>                     | Регулювання цінової політики державою, втручання у ціноутворення.<br>Збереження тінізації відносин в енергетиці.<br>Втрата єдиної технічної політики та системи технічного контролю.<br>Зниження впливу України на політику та діяльність зовнішніх інвесторів в енергетику України.<br>Стимування розвитку законодавства для регулювання енергетичних ринків.<br>Посилення непрогнозованості динаміки енергоспоживання та нестабільності енерговиробництва.<br>Посилення тенденції до вимушеної децентралізації енергозабезпечення (створення позапроектних режимів роботи ОЕС України) | Посилення зовнішнього впливу на формування державної, галузевої політики в енергетиці.<br>Зростання частки суб'єктів енергетики України з центром управління за межами юрисдикції національного уряду                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Матеріал системи</b>            | Втрата кваліфікації персоналом, який працює в енергетичній сфері.<br>Подальше зростання зношеності основних фондів енергетичного сектору.<br>Відсутність стратегічного бачення, політичний популізм, орієнтація на персональний інтерес, конфлікт інтересів                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Вимивання кваліфікованого персоналу                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

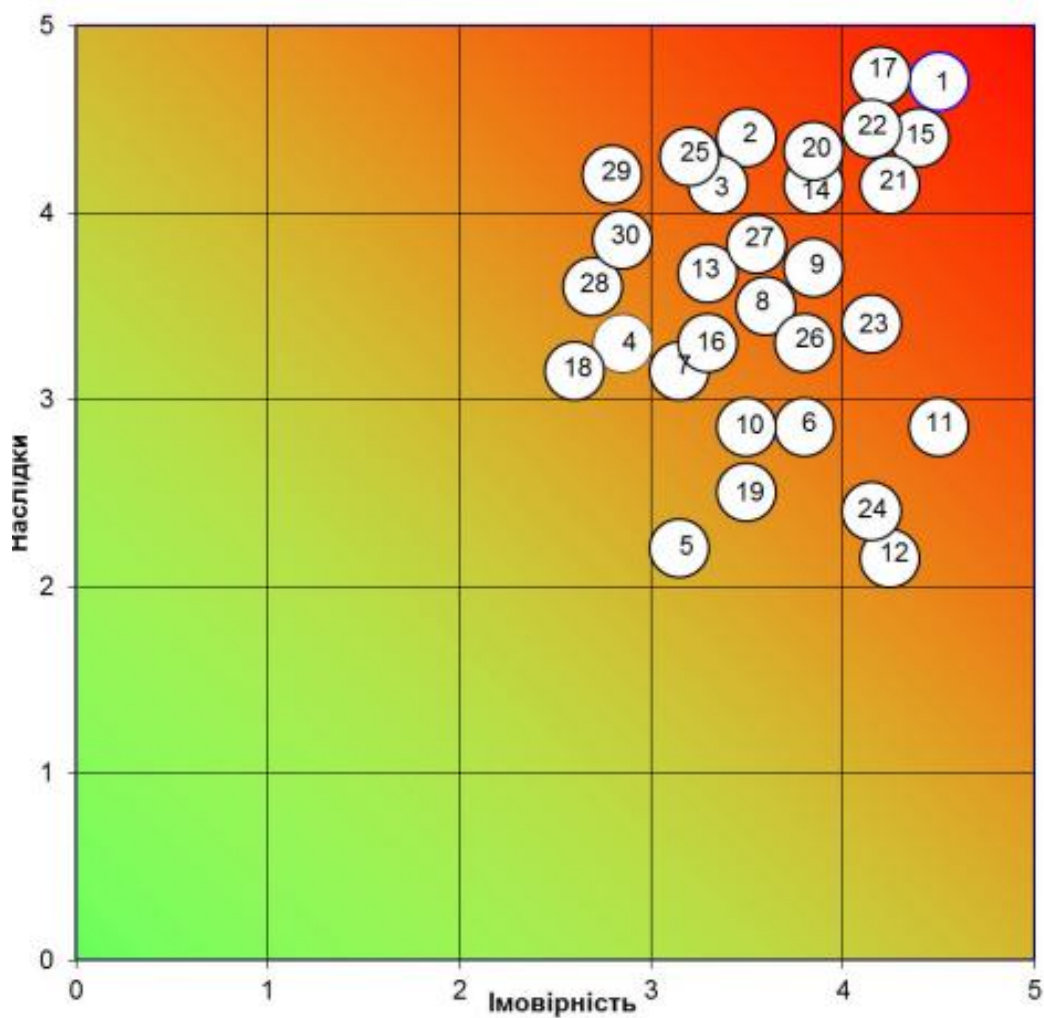


Рисунок 1.2. – Матриця ризиків енергетичній безпеці загальнодержавного рівня (внутрішні загрози)

На рисунку 1.3. відображені зовнішні загрози енергетичній безпеці загальнодержавного рівня за даними таблиці 1.6.

Таблиця 1.5 Результати експертної оцінки внутрішніх загроз енергетичній безпеці загальнодержавного рівня

| №                                                  | Загрози енергетичній безпеці                                                                                                                       | Імовірність | Наслідки | Ризик        |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------|--------------|
| <b>Загрози системного рівня</b>                    |                                                                                                                                                    |             |          |              |
| 1                                                  | Відсутність стратегічного бачення, політичний популізм, орієнтація на персональний інтерес                                                         | 4,5         | 4,7      | <b>21,15</b> |
| 2                                                  | Відсутність системи стратегічного планування та координації розвитку економіки та енергетики                                                       | 3,5         | 4,4      | <b>15,4</b>  |
| 3                                                  | Деградація системи державного управління (оцінки, прогнозування, моделювання, планування)                                                          | 3,3         | 4        | <b>13,2</b>  |
| 4                                                  | Втрата координації та взаємозв'язку енергетичної безпеки із завданнями національної безпеки                                                        | 2,9         | 3,3      | <b>9,57</b>  |
| 5                                                  | Відсутність чіткого розмежування функцій між державними інституціями                                                                               | 3           | 2,2      | <b>6,6</b>   |
| 6                                                  | Посилення зовнішнього впливу на інституції, що ухвалюють владні рішення                                                                            | 3,8         | 3        | <b>11,4</b>  |
| 7                                                  | Негарантоване право власності; відсутність позитивних результатів судової реформи                                                                  | 3           | 3        | <b>9</b>     |
| 8                                                  | Збереження тінізації відносин в енергетиці                                                                                                         | 3,6         | 3,5      | <b>12,6</b>  |
| 9                                                  | Зростання ресурсної і технологічної залежності                                                                                                     | 3,9         | 3,7      | <b>14,43</b> |
| 10                                                 | Зниження впливу України на політику та діяльність зовнішніх інвесторів в енергетику України                                                        | 3,5         | 3        | <b>10,5</b>  |
| 11                                                 | Поглиблення енергетичної бідності                                                                                                                  | 4,5         | 3        | <b>13,5</b>  |
| 12                                                 | Відсутність енергетичних резервів                                                                                                                  | 4,25        | 2        | <b>8,5</b>   |
| 13                                                 | Втрата єдиної технічної політики та системи технічного контролю                                                                                    | 3,3         | 3,67     | <b>12,11</b> |
| <b>Вади ринків</b>                                 |                                                                                                                                                    |             |          |              |
| 14                                                 | Недосконалість моделей та інструментів державного регулювання енергетичних ринків                                                                  | 3,93        | 4        | <b>15,72</b> |
| 15                                                 | Втручання держави в ринкове ціно- й тарифоутворення                                                                                                | 4,4         | 4,4      | <b>19,36</b> |
| 16                                                 | Втрата привабливості енергетики України для ринків та суб'єктів господарювання ЄС (втрата механізмів трансферу кращої практики та технологій з ЄС) | 3,3         | 3,3      | <b>10,89</b> |
| 17                                                 | Збереження державного популізму в регулюванні енергетики та енергетичних ринків                                                                    | 4,2         | 4,73     | <b>19,87</b> |
| 18                                                 | Недосконалість законодавства для регулювання енергетичних ринків                                                                                   | 2,6         | 3        | <b>7,8</b>   |
| 19                                                 | Прив'язка внутрішніх цін на енергетичні товари до спекулятивних зовнішніх індикаторів                                                              | 3,5         | 2,5      | <b>8,75</b>  |
| 20                                                 | Наростання дефіциту капітальних інвестицій у розвиток енергетики                                                                                   | 3,9         | 4,33     | <b>16,89</b> |
| <b>Деградація техніки і відсталість технологій</b> |                                                                                                                                                    |             |          |              |
| 21                                                 | Деградація технічного стану окремих елементів системи – енергетичної інфраструктури (мережі, підприємства)                                         | 4,25        | 4,05     | <b>17,21</b> |
| 22                                                 | Подальше зростання зношеності основних фондів енергетичного сектору, підвищення аварійності                                                        | 4           | 4,6      | <b>18,4</b>  |
| 23                                                 | Збільшення обсягів викидів і стоків від діяльності підприємств паливно-енергетичного комплексу                                                     | 4,15        | 3,4      | <b>14,11</b> |
| 24                                                 | Збереження високої енергоємності національної економіки                                                                                            | 4           | 2,25     | <b>9</b>     |
| №                                                  | Загрози енергетичній безпеці                                                                                                                       | Імовірність | Наслідки | Ризик        |
| <b>Кадрові проблеми</b>                            |                                                                                                                                                    |             |          |              |
| 25                                                 | Втрата системи підготовки та перепідготовки кадрів                                                                                                 | 3,2         | 4,3      | <b>13,76</b> |
| 26                                                 | Втрата кваліфікації персоналом в енергетичній сфері                                                                                                | 3,8         | 3,3      | <b>12,54</b> |
| 27                                                 | Виникнення кадрового дефіциту (наявності кваліфікованого персоналу)                                                                                | 3,6         | 3,9      | <b>14,04</b> |
| 28                                                 | Неспроможність корпоративного менеджменту конкурувати на відкритих ринках                                                                          | 2,7         | 3,6      | <b>9,72</b>  |
| 29                                                 | Зростання рівня недостатності комунікаційного та інформаційного забезпечення                                                                       | 2,8         | 4,2      | <b>11,76</b> |
| <b>Інші проблеми</b>                               |                                                                                                                                                    |             |          |              |
| 30                                                 | Зниження спроможностей до кризового реагування                                                                                                     | 2,95        | 3,8      | <b>11,21</b> |

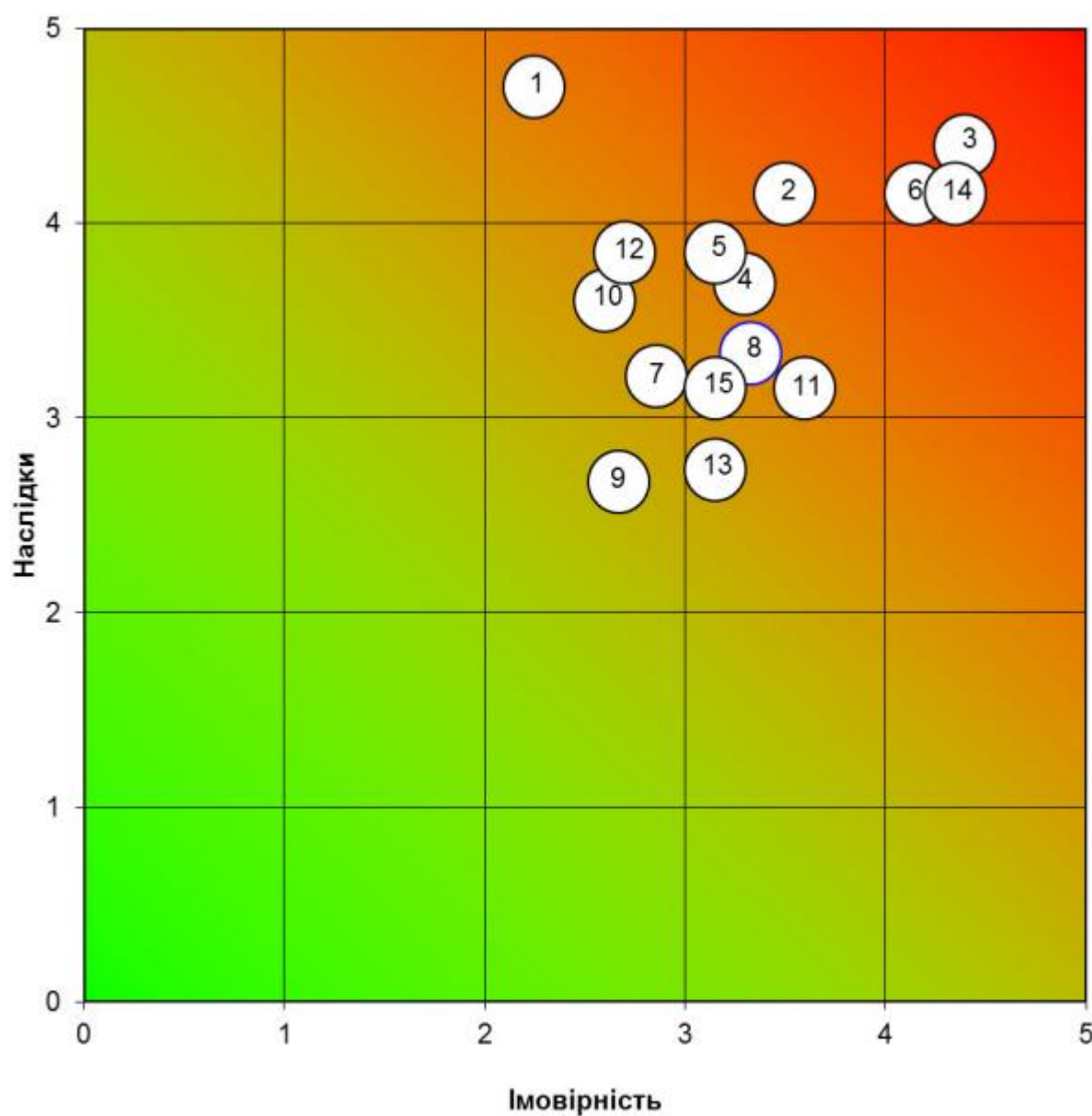


Рисунок 1.3. – Матриця ризиків енергетичній безпеці загальнодержавного рівня (зовнішні загрози)

Таблиця 1.6. – Результати експертної оцінки зовнішніх загроз енергетичній безпеці загальнодержавного рівня

| №                                                                                                                                                                         | Загрози енергетичній безпеці                                                                                                     | Імовірність | Наслідки | Ризик        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------|--------------|
| <b>Фізичні загрози</b>                                                                                                                                                    |                                                                                                                                  |             |          |              |
| 1                                                                                                                                                                         | Фізичні загрози (війна)                                                                                                          | 2,25        | 4,7      | <b>10,58</b> |
| 2                                                                                                                                                                         | Фізичні загрози (терористичні акти)                                                                                              | 3,5         | 4        | <b>14</b>    |
| 3                                                                                                                                                                         | Фізичні загрози (кібератаки)                                                                                                     | 4,37        | 4,3      | <b>18,79</b> |
| <b>Посилення зовнішнього впливу на інституції, що ухвалюють владні рішення в Україні, з боку міжнародних організацій, національних урядів, зовнішніх інвесторів щодо:</b> |                                                                                                                                  |             |          |              |
| 4                                                                                                                                                                         | Надання преференцій окремим джерелам ресурсів і технологій (паливо для АЕС, газ, нафта та нафтопродукти, вугілля тощо)           | 3,23        | 3,69     | <b>11,92</b> |
| 5                                                                                                                                                                         | Надання преференцій розвитку окремих видів генерації (ВДЕ, вугільні ТЕС тощо)                                                    | 3           | 4        | <b>12</b>    |
| 6                                                                                                                                                                         | Вплив з метою ліквідації окремих елементів (суб'єктів господарювання, виробництв та технологій, закладів підготовки кадрів тощо) | 4           | 4        | <b>16</b>    |
| 7                                                                                                                                                                         | Вплив (з боку Росії) з метою блокування запровадження правил функціонування енергетики відповідно до положень законодавства ЄС   | 2,86        | 3,21     | <b>9,18</b>  |
| <b>Інші впливи з боку Росії</b>                                                                                                                                           |                                                                                                                                  |             |          |              |
| 8                                                                                                                                                                         | Зростання частки суб'єктів енергетики України з центром управління за межами юрисдикції національного уряду                      | 3,33        | 3,33     | <b>11,09</b> |
| 9                                                                                                                                                                         | Блокування постачання необхідних ресурсів та обладнання для потреб енергетики України                                            | 2,67        | 2,67     | <b>7,13</b>  |
| 10                                                                                                                                                                        | Перешкоджання з боку РФ об'єднанню систем (мереж) України із системами електро- та газопостачання ЄС                             | 2,6         | 3,6      | <b>9,36</b>  |
| <b>Інші зовнішні впливи</b>                                                                                                                                               |                                                                                                                                  |             |          |              |
| 11                                                                                                                                                                        | Вплив зміни клімату на структуру та режими енергоспоживання                                                                      | 3,6         | 3        | <b>10,8</b>  |
| 12                                                                                                                                                                        | Вимивання кваліфікованого персоналу через еміграцію                                                                              | 2,8         | 3,9      | <b>10,92</b> |
| 13                                                                                                                                                                        | Епідемії та пандемії                                                                                                             | 3,13        | 2,73     | <b>8,54</b>  |
| 14                                                                                                                                                                        | Вплив екстремальних погодних умов (хуртовини, налипання мокрого снігу, повені, пожежі в екосистемах)                             | 4,33        | 4,1      | <b>17,75</b> |
| 15                                                                                                                                                                        | Аварії на суміжних об'єктах, у т. ч. транскордонний вплив аварій                                                                 | 3,2         | 3,1      | <b>9,92</b>  |

На рисунку 1.4. зображені загрози електроенергетичній галузі за даними таблиці 4.7.

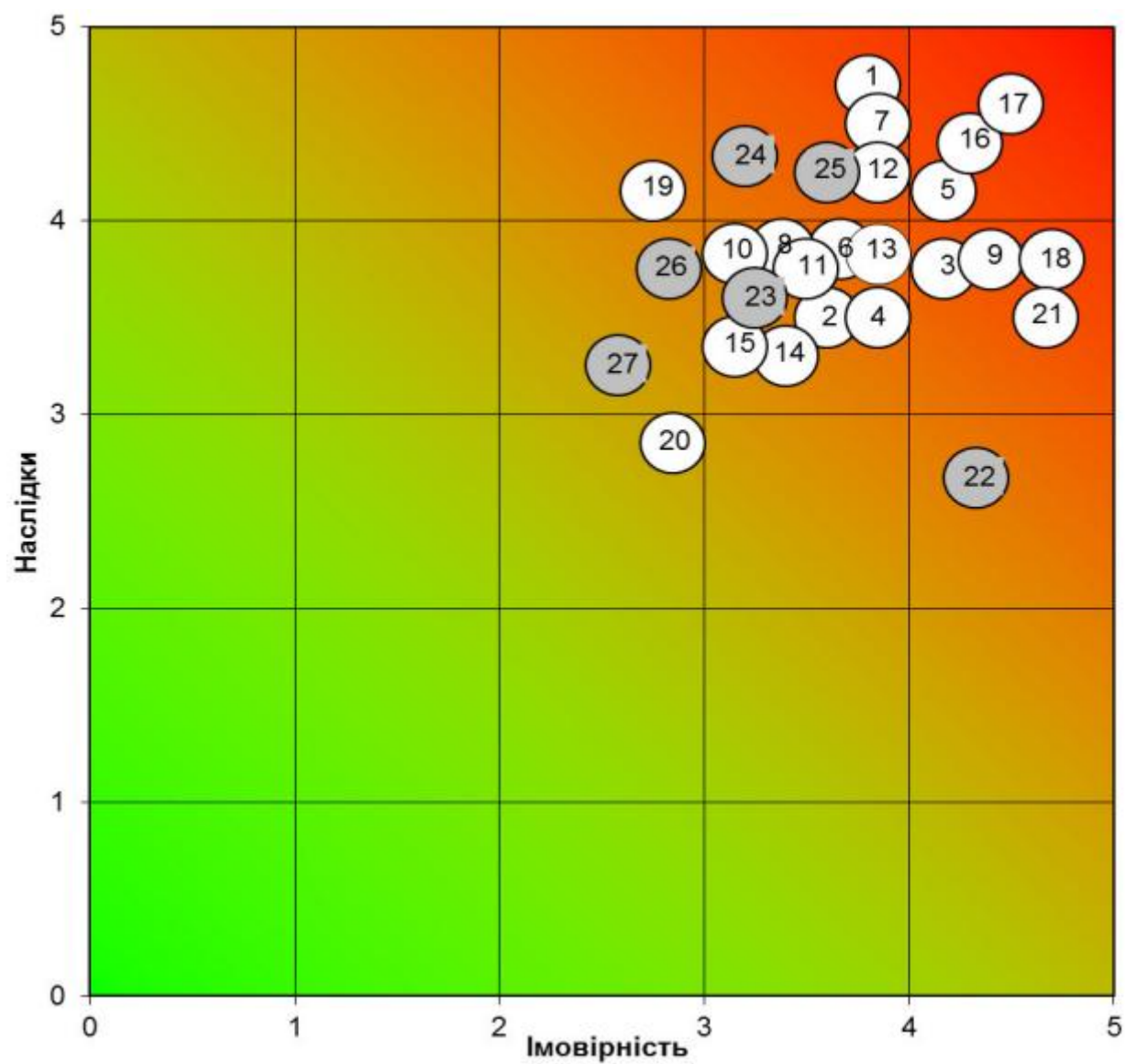


Рисунок 1.4. – Матриця ризиків електроенергетичного сектору

Таблиця 1.7. – Результати експертної оцінки загроз електроенергетичній галузі

| №                                               | Загрози енергетичній безпеці                                                                                                                                                                                                     | Імовірність | Наслідки | Ризик        |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------|--------------|
| <b>Загрози внутрішні</b>                        |                                                                                                                                                                                                                                  |             |          |              |
| <i><b>Вади ринку</b></i>                        |                                                                                                                                                                                                                                  |             |          |              |
| 1                                               | Високі «зелені» тарифи, які спотворюють роботу ринку електроенергії                                                                                                                                                              | 3,8         | 4,7      | <b>18,28</b> |
| 2                                               | Запровадження «покладення спеціальних обов'язків» (ПСО); обсяги ПСО перевищують суспільні потреби та є джерелом корупції                                                                                                         | 3,6         | 3,5      | <b>12,6</b>  |
| 3                                               | Збереження перехресного субсидування (зокрема, для покриття «зелених» тарифів)                                                                                                                                                   | 4,17        | 3,75     | <b>15,63</b> |
| 4                                               | Збереження заборони на відключення (захищені категорії)                                                                                                                                                                          | 4           | 3,5      | <b>14,67</b> |
| 5                                               | Недосконалість роботи «Ринку балансування»                                                                                                                                                                                       | 4,17        | 4,1      | <b>17,71</b> |
| 6                                               | Недосконалість ціноутворення на «Ринку на добу наперед»                                                                                                                                                                          | 3,67        | 4        | <b>14,67</b> |
| 7                                               | Збереження неринкового регулювання цін на ринку («прайс-кепи»)                                                                                                                                                                   | 4           | 4,5      | <b>17,95</b> |
| 8                                               | Відсутність «Ринку допоміжних послуг»                                                                                                                                                                                            | 3,38        | 4        | <b>13,08</b> |
| 9                                               | Незбалансованість «Гарантованого покупця»                                                                                                                                                                                        | 4,4         | 3,9      | <b>18,42</b> |
| 10                                              | Недостатня прозорість роботи ринку; несиметричність інформації                                                                                                                                                                   | 3,1         | 3,83     | <b>12,78</b> |
| №                                               | Загрози енергетичній безпеці                                                                                                                                                                                                     | Імовірність | Наслідки | Ризик        |
| <i><b>Вади державної системи управління</b></i> |                                                                                                                                                                                                                                  |             |          |              |
| 11                                              | Втрата галузевої системи управління (міністерства, координуючого віцепрем'єр-міністра)                                                                                                                                           | 3,5         | 3,75     | <b>12,81</b> |
| 12                                              | Втрата галузевої системи планування (відсутність прогнозування та планування на галузевому рівні)                                                                                                                                | 3,9         | 4,25     | <b>17</b>    |
| 13                                              | Неврегульованість проблеми «старих» боргів                                                                                                                                                                                       | 3,85        | 3,83     | <b>15,65</b> |
| 14                                              | Імпорт електроенергії                                                                                                                                                                                                            | 3,4         | 3,3      | <b>12,81</b> |
| 15                                              | Зростання ризиків судових рішень та блокування роботи підприємств сектору; рейдерство                                                                                                                                            | 3           | 3,4      | <b>11,61</b> |
| <i><b>Низька гнучкість ОЕС України</b></i>      |                                                                                                                                                                                                                                  |             |          |              |
| 16                                              | Значна частка негарантованої генерації (СЕС, ВЕС), яка вносить збурення та несе загрозу сталій роботі ОЕСУ                                                                                                                       | 4,3         | 4,4      | <b>18,78</b> |
| 17                                              | Зростання розриву між потужностями базової та маневрової генерації через масове й хаотичне будівництво станцій із негарантованою потужністю; дефіцит маневрових потужностей та відсутність накопичувачів енергії                 | 4,5         | 4,6      | <b>19,75</b> |
| 18                                              | Вугільний парадокс (коли зростання частки ВДЕ та недостатність регулюючих потужностей задля забезпечення стійкості ОЕСУ вимагають зниження частки дешевої та чистої атомної генерації та підвищення частки вуглецевої генерації) | 4,67        | 4        | <b>18,67</b> |
| 19                                              | Неспроможність генеруючих компаній задовольнити зростання попиту                                                                                                                                                                 | 2,75        | 4,08     | <b>11,23</b> |
| 20                                              | Розукомплектування обладнання; крадіжки                                                                                                                                                                                          | 3           | 3        | <b>9</b>     |
| 21                                              | Зростання зношеності основних фондів та підвищення аварійності                                                                                                                                                                   | 4,67        | 3,67     | <b>17,11</b> |
| <b>Загрози зовнішні</b>                         |                                                                                                                                                                                                                                  |             |          |              |
| 22                                              | Тиск з боку іноземних інвесторів, міжнародних організацій та урядів інших країн щодо збереження стимулів та дальшого зростання обсягів ВДЕ                                                                                       | 4,33        | 2,67     | <b>11,56</b> |
| 23                                              | Вимивання кваліфікованого персоналу через еміграцію                                                                                                                                                                              | 3,25        | 3,6      | <b>12,22</b> |
| 24                                              | Терористичні атаки та диверсії на інфраструктурі                                                                                                                                                                                 | 3,2         | 4,33     | <b>14,44</b> |
| 25                                              | Посилення кібернетичних загроз функціонуванню енергетичної системи                                                                                                                                                               | 3,6         | 4,25     | <b>17,58</b> |
| 26                                              | Природні впливи (хуртовини, налипання мокрого снігу, повені, пожежі в екосистемах)                                                                                                                                               | 2,83        | 3,75     | <b>10,42</b> |
| 27                                              | Епідемії та пандемії                                                                                                                                                                                                             | 2,58        | 3,25     | <b>8,5</b>   |

Орієнтовний перелік загроз безпеці системі газопостачання надано у таблиці 1.8.

Таблиця 1.8. – Орієнтовний перелік зовнішніх та внутрішніх загроз системі газопостачання

| Загрози внутрішні                                                                                                    | Загрози зовнішні                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Відсутність прозорих і недискримінаційних механізмів формування цін і тарифів для всіх категорій споживачів          | Тиск із боку зовнішніх інвесторів щодо надання проференцій розвитку окремих видам діяльності на ринку (видобутку, імпорту, маршрутам постачання тощо) |
| Зростання залежності від імпорту                                                                                     | Можливість припинення функціонування інтерконекторів за рішенням Росії                                                                                |
| Збереження «покладання спеціальних обов'язків» (PCO)                                                                 | Зменшення обсягів транзиту                                                                                                                            |
| Неврегульованість проблеми «старих» боргів                                                                           | Можливість припинення функціонування інтерконекторів за рішенням інших країн (Польща, Словаччина, Угорщина, Румунія)                                  |
| Недосконалість роботи системи балансування                                                                           | Посилення зовнішнього впливу на інституції, що ухвалюють владні рішення                                                                               |
| Незавершеність відокремлення різних видів діяльності у вертикально інтегрованих газових компаніях                    | Посилення кібернетичних загроз функціонуванню газотранспортної системи                                                                                |
| Зменшення надійності роботи газотранспортної системи за нових умов функціонування                                    | Фізичні атаки; розукомплектування; крадіжки                                                                                                           |
| Неспроможність постачальників задовольнити можливе зростання попиту                                                  | Природні впливи                                                                                                                                       |
| Зростання інформаційної асиметрії                                                                                    | Епідемії та пандемії                                                                                                                                  |
| Відсутність повного комерційного (приладового) обліку природного газу                                                |                                                                                                                                                       |
| Втрата системи планування (відсутність прогнозування та планування на державному та галузевому рівнях)               |                                                                                                                                                       |
| Зростання ризиків судових рішень та блокування                                                                       |                                                                                                                                                       |
| Збереження перехресного субсидування                                                                                 |                                                                                                                                                       |
| Недосконалість роботи «Ринку балансування»                                                                           |                                                                                                                                                       |
| Фізичне старіння технологічного обладнання магістральних газопроводів, зменшення надійності газотранспортної системи |                                                                                                                                                       |
| Фізичне старіння технологічного обладнання газорозподільних мереж                                                    |                                                                                                                                                       |
| Відсутність стратегічного бачення перспектив функціонування газотранспортної системи                                 |                                                                                                                                                       |

Скорочений орієнтовний перелік загроз енергетичній безпеці на корпоративному та об'єктовому рівнях наведено в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9. – Орієнтовний перелік зовнішніх та внутрішніх загроз енергетичній безпеці України на корпоративному та об'єктовому рівнях

| Внутрішні загрози                                                                                                        | Зовнішні загрози                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Деградація корпоративного менеджменту (суб'єкти господарювання неспроможні конкурувати на відкритих конкурентних ринках) | Зростання рівня кіберзагроз                                                          |
| Зростання аварійності                                                                                                    | Зростання рівня терористичних загроз                                                 |
| Зростання загроз, пов'язаних із внутрішнім порушником                                                                    |                                                                                      |
| Торгівля інсайдерською інформацією; розголошення чутливої комерційної інформації                                         | Зростання ризиків блокування роботи підприємств ПЕК через судові рішення; рейдерство |
| Фінансові зловживання; крадіжки; розукомплектування обладнання                                                           |                                                                                      |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Усі вищенаведені приклади формування переліку загроз та оцінки ризиків енергетичній безпеці також слугують своєрідним прикладом налагодження процесу аналізування ризиків у рамках окремої сфери національної безпеки, зокрема в рамках формування та реалізації державної політики забезпечення енергетичної безпеки. Експертне опитування та відповідні розрахунки відображають стан енергетичної безпеки України у травні 2020 р.

З плином часу та зміною умов функціонування енергетичних ринків, технологій, безпекового середовища перелік загроз та ризиків енергетичній безпеці країні буде змінюватися. Саме тому необхідно налагодити систематичний, періодичний процес оцінювання загроз та формування реєстру ризиків у сфері національної безпеки та її окремих сферах.

Інструментом формалізації такого процесу може стати запровадження законодавчої вимоги щодо проведення аналізу ризиків, підготовки та оприлюднення Національного реєстру ризиків, як це вже запроваджено в низці країн. Проведене оцінювання загроз, аналіз рівня та ризиків енергетичної безпеки, у свою чергу, має стати вихідною інформацією щодо формування завдання на уточнення цілей та механізмів реалізації державної політики забезпечення енергетичної безпеки.

## **РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ТА АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

### **2.1. Перспективи впровадження відновлювальних джерел енергії**

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) мають значну перспективу як життєздатна заміна енергії з викопного палива, що призводить до постійного глобального збільшення їх частки. Серед цих джерел значне зростання продовжує зростати сонячна фотоелектрична (PV) технологія. Відповідно до вих. [1] витрати на виробництво сонячних панелей значно знизилися, що зробило їх найбільш економічним і доступним видом електроенергії. За десятиліття з 2020 по 2030 рік ціни на сонячні модулі різко впали на 93%, і водночас глобальна середньозважена вирівняна вартість електроенергії (LCOE), пов'язана з сонячними модулями, впала на 85% [1].

На додаток до ескалації впровадження джерел ВДЕ, існують узгоджені зусилля для максимального використання електромобілів (EV), оскільки вони є одними з найбільш ефективних і екологічних видів транспорту. Європейська комісія поставила амбітні цілі, прагнучи до 55% скорочення викидів від легкових автомобілів і 50% скорочення від мікроавтобусів до 2030 року, з метою досягнення нульових викидів у нових легкових автомобілях до 2035 року [2]. Однак електромобілі стикаються з проблемами, пов'язаними з акумуляторами, включаючи повільний час заряджання, вартість заміни, обмежений запас ходу та інші обмеження [3, 4]. Недостатній і незручний доступ до інфраструктури зарядки електромобілів ще більше перешкоджає їх широкому використанню [5, 6]. Через дефіцит відповідних зарядних станцій у громадських місцях більшість електромобілів заряджаються вдома. Відповідно до вих. [7], приватна зарядна

інфраструктура буде достатньою для тих країн з високою доступністю гаражів; однак для країн із низькою доступністю гаражів необхідна громадська зарядна інфраструктура, і, щоб дозволити поїздки на далекі відстані, така інфраструктура повинна бути полегшена на маршрутах.

Щоб зменшити електричне навантаження на основну розподільчу електричну мережу через проникнення електромобілів і запобігти нестабільності мережі, життєздатним варіантом буде зарядний пристрій для електромобілів на основі сонячних батарей. SPEVCS забезпечить чітко сплановану процедуру заряджання, щоб зменшити частий вплив на мережу мережі, спричинений стохастичним характером шаблону зарядки EV. Крім того, надлишок електроенергії, що вводиться в мережу від SPEVCS, приносить користь системі розподілу та місцевому енергетичному ринку, серед іншого, знижуючи попит на мережу, сприяючи регулюванню напруги, підтримуючи цілі ВДЕ та сприяючи енергетичній незалежності.

Стандарти зарядки електромобілів поділяються на три рівні відповідно до характеристик швидкості та потужності. Ці класифікації були створені та ратифіковані Інститутом досліджень електроенергії (EPRI) і Товариством автомобільних інженерів (SAE), позначаючи їх як AC Level 1, AC Level 2 і AC Level 3 (DC Fast Charging) [8, 9]. Хоча Рівень 1 є найповільнішим і зазвичай використовується для побутових цілей, Рівень 2 і Рівень 3 використовуються для публічних комерційних цілей [10]. Відповідно до вих. [11], доступні загальнодоступні варіанти швидкої зарядки можуть зменшити занепокоєння, пов'язане з покриттям діапазону, і таким чином заохочувати використання електромобілів. Вони дійшли висновку, що більшість випадків заряджання, від 50% до 80%, відбувається вдома. Від 15% до 20% заходів зарядки відбувається на робочому місці, і лише невелика частка приблизно 5% відбувається в громадських місцях зарядки. Комісія за зарядку електромобілів змінюється на місцевості та залежить від кількох факторів, у тому числі типу зарядної станції (CS), місця розташування та переважаючих

цін на електроенергію на ринку.

Що стосується поточного дослідження, то подібні роботи були виконані в роботах. [12, 13]. У вих. [12], автори запропонували процедуру оптимізації, коли прибуток від CS на основі PV максимізується з урахуванням схеми прибуття транспортного засобу. Однак фундаментальна відмінність між їхнім методом і методом, запропонованим у цьому дослідженні, полягає в характері зв'язку між SPEVCS і мережею. У їхніх роботах розглядається система накопичення енергії (ESS); однак SPEVCS продає електроенергію лише для електромобілів, а отже, отримання доходу відбувається лише за рахунок заряджання електромобілів. Однак у цьому документі потік електроенергії вважається двонаправленим, що дозволяє SPEVCS продавати або купувати електроенергію з електромережі на основі стану сонячної енергії та навантаження EV. У вих. [13], метою є мінімізація вартості електроенергії для паркування електромобілів замість прямої оптимізації прибутку на основі доходу. Крім того, не були враховані експлуатаційні витрати на SPEVCS і систему зберігання енергії акумулятора (BESS). Хоча CS на сонячних батареях є зручним рішенням для електромобілів, між ними існує контрастна характеристика. Зазвичай електромобілі заряджаються вночі, коли сонячна енергія виробляється мінімум. Відповідно до вих. [14], власники електромобілів зазвичай прагнуть заряджати електромобілі протягом 18–6 годин, а не вдень. Загальнодоступним CS зазвичай віддають перевагу вдень, а приватним CS – вночі. Аналіз дослідження показує, що як для приватних, так і для державних CS пік зазвичай припадає на 18–21 годину. Таким чином, BESS використовується для ефективної підтримки роботи CS на основі PV. Опівдні, коли сонячна енергія максимальна, а навантаження електромобіля низьке, надлишок енергії передається та зберігається в акумуляторі для використання в період низької сонячної енергії. Однак у випадку значно більшої генерації сонячної фотоелектричної енергії з енергією BESS у бажаному стані заряду (SoC), надлишок енергії експортується в мережу. Далі

вих. [15] розглядає максимізацію прибутку, припускаючи гнучку ціну на енергію. У цьому випадку вартість зарядки та розрядки залежить від SoC BESS. Однак автори не враховують глибину розряду (DoD) ESS і продаж електроенергії в мережу, коли генерація сонячної фотоелектричної енергії є істотно високою. посилання [16] враховує конкретну комбіновану процедуру прийому та ціноутворення для електромобілів, де максимізація прибутку базується на прибутті електромобіля та діяльності в черзі. Однак вони не розглядають відновлювані джерела енергії для зарядки електромобілів. Крім того, у вих. [6], максимізація прибутку здійснюється з точки зору оператора шляхом розгляду оптимальних інвестицій в обладнання КС.

У цьому дослідженні ми розглядали різні стохастичні фактори в роботі КС. Імовірність прибуття EV, яка є ймовірністю попиту на навантаження, разом із прогнозом сонячної PV були взяті до уваги, а потім ми запровадили метод змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), щоб визначити найкраще рішення. Основною перевагою використання MILP є його здатність вирішувати складні задачі оптимізації з поєднанням дискретних і безперервних змінних в одній структурі. Ми розглянули підключену до мережі SPEVCS, яка надає пріоритет усунення невідповідності між характеристиками заряджання сонячної фотоелектричної та електромоторної енергії.

Блок–схема, що пояснює методологію, використану в цій роботі, показана на рисунку 2.1.

Запропонована формулювання враховує переривчасті характеристики як сонячної енергії, так і попиту навантаження (EV). Для таких випадків однією зі стратегій є придбання електроенергії з мережі для постачання до SPEVCS у разі дефіциту електроенергії та продаж її в мережу, коли в SPEVCS є надлишок електроенергії.

Дослідження було проведено в Польщі, регіоні, який споживає порівняно менше сонячної енергії, ніж у багатьох інших регіонах. Таким

чином, продуктивність запропонованого алгоритму була оцінена в репрезентативних енергетичних умовах, що включають помірну інтенсивність сонячного випромінювання від 100 до 600 Вт/м<sup>2</sup> і враховують потенційні коливання за періодами та сезонами. Це означає умови експлуатації, коли фотоелектричні панелі, ключовий компонент системи, функціонують приблизно на 20–40% нижче своїх номінальних характеристик. Ці вибрані критерії піддають CS вимогливим сценаріям роботи через нижчу ефективність отримання сонячної енергії.

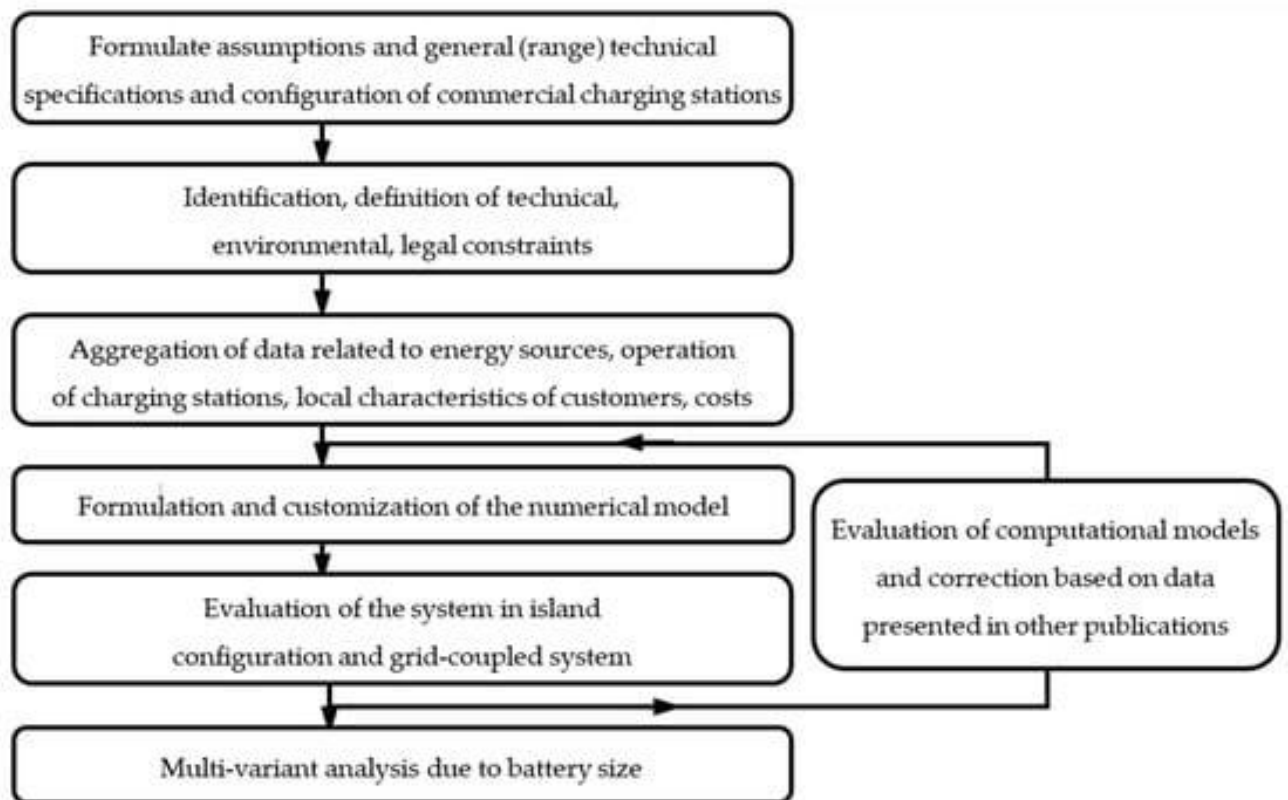


Рисунок 2.1. – Методологія дослідження

## 2.2. Модель і формулювання SPEVCS

Сонячна фотоелектрична система разом з BESS і мережею спільно постачають електроенергію для навантаження EV. Схема розміщення показана на рисунку 2. Мережа виконує подвійну роль: (i) забезпечує дефіцит

електроенергії, що позначається як  $P^{df}$ , до SPEVCS під час недостатньої потужності та (ii) придбання потужності від SPEVCS у разі надлишку потужності, що позначається як  $P^{sp}$ , є в наявності.

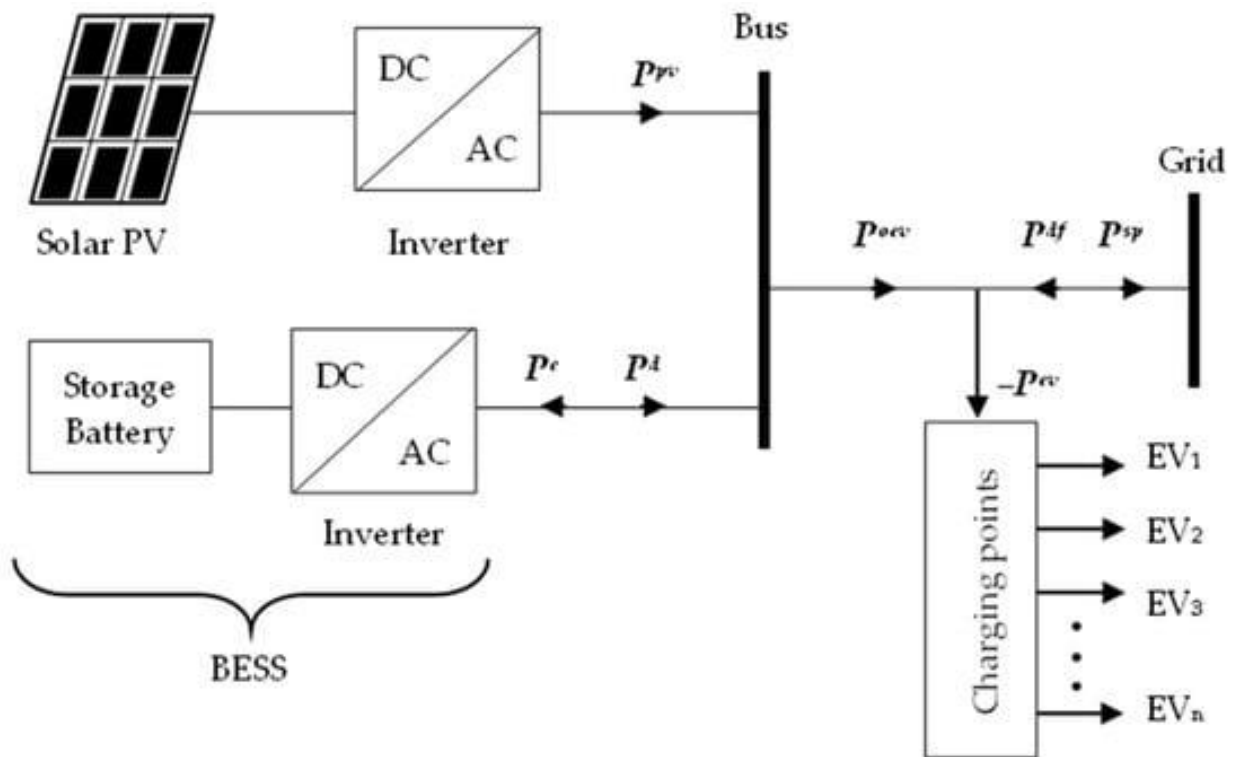


Рисунок 2.2. – SPEVCS із сіткою

### 2.2.1. Дохід і спосіб зарядки EV

Запропонована формулювання враховує дані на 24 години наперед у SPEVCS, які включають прогноз сонячної енергії та ймовірність прибуття EV на CS. Розглядається чистий прибуток за 24 год, позначений як NT. Для спрощення розглядається одна ставка зарядки  $\alpha$  для EV замість розгляду двох окремих цінових тарифів (на основі періодів зарядки в пік і поза піком). Джерелом доходу є заряджання електромобілів та експорт надлишку енергії в мережу. Пріоритетом є зарядка електромобілів, оскільки ціна заряджання електромобілів вища, ніж ціна продажу надлишку енергії в мережу ( $\beta$ ).

Таким чином, чистий дохід – це сукупний дохід від заряджання електромобіля  $R_{ev}$ , продаж електроенергії в мережу  $R_{gr1}$  і продаж енергії, купленої з мережі та проданої в EV  $R_{gr2}$

### 2.2.2. Надлишок і дефіцит влади

Коли сонячна енергія  $P^{pv} = [P_1^{pv}, P_2^{pv}, P_3^{pv}, \dots, P_{NT}^{pv}]$  вище, ніж навантаження  $P^{ev} = [P_1^{ev}, P_2^{ev}, P_3^{ev}, \dots, P_{NT}^{ev}]$ , що зазвичай відбувається під час двох ситуацій, опівдні або коли енергія, необхідна для зарядки електромобілів, низька (наприклад, мала кількість електромобілів для заряджання), це призводить до надлишкової потужності і  $P^{sp} = [P_1^{sp}, P_2^{sp}, P_3^{sp}, \dots, P_{NSP}^{sp}]$ . Випадки, коли  $P^{sp}$  існує в період Нового Заповіту позначається екземплярами NSP. Надлишкова потужність  $P^{sp}$  зберігається в батареї та може бути або експортовано та продано в мережу, або використано протягом відповідного періоду. Враховуючи вихідну потужність  $P_i^{oev}$ , надлишкова потужність  $P_i^{sp}$  в  $i$ -му випадку періоду Нового Заповіту є

$$P_i^{sp} = P_i^{oev} - P_i^{ev}, \\ \forall_{t=0, \dots, NT} (P_t^{oev} - P_t^{ev} \geq 0), \quad (2.1)$$

де  $P_t^{ev}$  і  $P_t^{oev}$  є чистою вихідною потужністю від навантаження SPEVCS та EV відповідно. Дефіцит потужності  $P^{df} = [P_1^{df}, P_2^{df}, P_3^{df}, \dots, P_{NDF}^{df}]$  який буде імпортований із мережі, зрештою продається електромобілю. Випадки, коли  $P^{df}$  існує в період Нового Заповіту позначаються NDF. The  $P^{df}$  можна альтернативно розглядати як дохід за зниженою вартістю  $(\alpha - \gamma)$ , де  $\gamma$  – ціна, за якою  $P^{df}$  закуповується з сітки. Дефіцит потужності  $P^{df}j$  у  $j$ -му випадку в

період Нового Заповіту тоді

$$\begin{aligned} P_j^{df} &= P_j^{ev} - P_j^{oev}, \\ \forall_{t=0, \dots, NT} (P_t^{ev} - P_t^{oev} &\geq 0). \end{aligned} \quad (2.2.)$$

Автономна або автономна SPEVCS страждає від стохастичних характеристик сонячної енергії. Для такої позамережевої SPEVCS невідповідність між характеристиками сонячної енергії та непередбачуваною появою електромобілів вимагає більшої ємності для накопичувачів енергії [17, 18], що ще більше ускладнює управління енергією в CS. Таким чином, щоб підтримувати як сонячну фотоелектричну систему, так і BESS, SPEVCS має бути підключено до мережі. Це дозволяє SPEVCS імпортувати електроенергію, коли сукупний вихід сонячної енергії та BESS не може задовольнити попит на навантаження, і експортувати надлишок електроенергії в мережу. Обмеження надлишкової потужності  $P^{sp}$  і дефіциту потужності  $P^{df}$  є

$$0 \leq P_t^{sp} \leq \overline{P_t^{sp}} U_t^{sp}, \quad (2.3.)$$

$$0 \leq P_t^{df} \leq \overline{P_t^{df}} U_t^{df}, \quad (2.4)$$

де  $\overline{P_t^{sp}}$  є верхньою межею для надлишкової потужності, і  $\overline{P_t^{df}}$  є верхньою межею дефіцитної потужності.

SPEVCS має або імпортувати, або експортувати електроенергію з/до електромережі лише в заданий час  $t$ . Для виконання цієї умови використовується наступне обмеження

$$U_t^{sp} + U_t^{df} \leq 1, \quad (2.5)$$

де двійкові змінні  $U_t^{sp}$  є складовою частиною  $U^{sp} = [U_1^{sp}, U_2^{sp}, U_3^{sp}, \dots, U_{NSP}^{sp}]$  що вказує на робочий стан надлишкової потужності  $P^{sp}$ , і  $U_t^{df}$  є складовою

частиною  $U^{df} = [U_1^{df}, U_2^{df}, U_3^{df}, \dots, U_{NDF}^{df}]$  що вказує на робочий стан дефіциту потужності  $P^{df}$ . Під час формулювання моделі додаткові бінарні змінні (наприклад,  $U^{pv}$ ,  $U^{sp}$ ,  $U^{df}$ ) були визначені для представлення робочого стану відповідних компонентів системи. Хоча реалізація бінарних змінних збільшує складність моделі, вона дозволяє моделювати додаткові стани. Використовуючи двійкові змінні (вектори), можна моделювати різні робочі стани компонентів системи, відображаючи конкретні та аварійні робочі стани. Ці стани можна далі інтегрувати в роботу. Введення двійкових змінних також дозволяє розглядати зупинки через обмежену доступність обладнання, обслуговування, поломки, перевищення максимально допустимої потужності або розбіжності з продажем енергії.

### 2.2.3. Чистий дохід

Загальний дохід є сумою наступних трьох компонентів.

(i) Дохід від зарядки електромобіля становить

$$R_{ev} = \sum_{t=1}^{NT} (P_t^{pv} + \eta^b P_t^d - P_t^c) \alpha. \quad (2.6)$$

$$R_{ev} = \sum_{t=1}^{NT} P_t^{oev} \alpha. \quad (2.7)$$

(ii) Дохід, отриманий від продажу надлишкової електроенергії  $P^{sp}$  до сітки є

$$R_{gr1} = \sum_{i=1}^{NSP} P_i^{sp} \beta, \\ \forall_{t=0, \dots, NT} (P_t^{oev} - P_t^{ev} \geq 0). \quad (2.8)$$

(iii) Дохід від продажу електроенергії з мережі, дефіцит

електроенергії, придбаної з мережі та проданої навантаженню EV, можна зручно розглядати як дохід, наданий за

$$R_{gr2} = \sum_j^{NDF} P_j^{df} (\alpha - \gamma) \quad \forall_{t=0, \dots, NT} (P_t^{ev} - P_t^{oev} \geq 0) \quad (2.9)$$

Отже, чистий дохід становить

$$R_{net} = R_{ev} + R_{gr1} + R_{gr2}. \quad (2.10)$$

#### 2.2.4. Формулювання фотоелектричної системи: економічна підмодель

Бета-розподіл можна використовувати для задовільного опису сонячного опромінення [19, 20], і найкращим прогнозом є медіана бета-функції щільності ймовірності [21]. Відповідно, у цьому дослідженні ми розглядаємо медіану 24-годинного прогнозу генерації  $\tilde{P}^{pv}$  як найкращий прогноз. Згодом сонячна фотоелектрична генерація  $P_t^{pv}$  у послідовну  $t$ -ту годину обмежено двійковою змінною  $U_t^{pv}$ .  $U_t^{pv}$  є елементом вектора  $U^{pv} = [U_1^{pv}, U_2^{pv}, U_3^{pv}, \dots, U_{NT}^{pv}]$ , що відображає робочий стан PV фотоелектричної системи та  $\tilde{P}^{pv}$  як зазначено нижче

$$0 \leq P_t^{pv} \leq \tilde{P}_t^{pv} U_t^{pv} \quad (2.11)$$

CPV, яка є загальною вартістю фотоелектричної системи, виходить з урахуванням постійних витрат  $A^{pv}$  і лінійно змінні витрати  $B^{pv}$  фотоелектричної системи, як наведено в посил. [22]. CPV визначається таким чином:

$$CPV = \sum_{t=1}^{NT} A^{pv} U_t^{pv} + B^{pv} P_t^{pv} \quad (2.12)$$

Фіксована вартість включає компоненти фінансових витрат, які не змінюються, такі як експлуатація фотоелектричних панелей (інвестиційні витрати), тоді як лінійно змінювані витрати включають ті, які змінюються залежно від продуктивності пов'язаних компонентів, таких як вартість експлуатації та обслуговування.

### 2.2.5. Модель навантаження

Швидкі зарядні пристрої для електромобілів потужністю від 7 кВт–год до 22 кВт–год зазвичай встановлюються на автостоянках по всій Великобританії [23]. У Польщі на даний момент є 1700 EV CS, з яких близько 30% — це зарядні пристрої постійного струму, а близько 70% — повільні зарядні пристрої змінного струму потужністю не більше 22 кВт/год [24]. Отже, навантаження, яке розглядається в цьому документі, складається з 36 одиниць по 22 кВт/год кожна. Оскільки характеристика EV, що надходить до CS, є високостохастичною, важко точно передбачити попит на навантаження. Залишається проблемою точне прогнозування попиту на навантаження на електромобілі; однак, різні роботи з моделювання прогнозів попиту на зарядку електромобілів для успішного управління та планування зарядки електромобілів були проведені в референсах. [25, 26, 27]. У нашій роботі ми розглядаємо ймовірність прибуття, як наведено в посил. [28]. Ймовірність прибуття EV – це навантаження  $P_t^{ev}$  на кожну  $t$  – годину. Далі це визначається як відносна величина  $\rho_t^{ev}$  (%) ємності зарядної станції  $K$ . Навантаження EV на  $t$  – годину становить

$$P_t^{ev} = K \rho_t^{ev}. \quad (2.13)$$

Крім того, ми розглянули ймовірність прибуття EV і далі звузили її до відносного значення,  $P_t^{ev}$ , яка визначається як відсоток пропускної здатності КС у кожен момент 't'. Це дозволяє нам підтримувати одноманітність в обговоренні ймовірності прибуття EV, одночасно сприяючи детальному аналізу випадку.

### 2.2.6. Система накопичення енергії акумулятора

BESS необхідний для підтримки сонячної фотоелектричної системи, коли вона не в змозі задовольнити попит на навантаження, особливо вночі та коли навантаження EV вище. Сонячна енергія є високостохастичною, тоді як навантаження EV потребує електроенергії протягом дня та ночі. Таким чином, о t – годині сумарна чиста потужність фотоелектричної системи та BESS становить

$$P_t^{oev} = P_t^{pv} + \eta^b P_t^d - P_t^c \quad (2.14)$$

де  $P_t^d$  є розрядною потужністю, а  $P_t^c$  – зарядна потужність батареї в t – вказану годину. Коефіцієнт  $\eta^b$  це ефективність батареї, і  $U_t^c$  і  $U_t^d$  це двійкові змінні, які представляють робочий стан акумулятора під час заряджання та розряджання відповідно. Для батареї рівняння (2.15) і (2.16) дають обмеження під час зарядки та розрядки, відповідно, о t –й годині

$$0 \leq P_t^c \leq \overline{P_t^c} U_t^c, \quad (2.15)$$

$$0 \leq P_t^d \leq \overline{P_t^d} U_t^d \quad (2.16)$$

де  $\overline{P_t^c}$  максимальна зарядна потужність і  $\overline{P_t^d}$  максимальна потужність розряду в момент часу t.

Крім того, було застосовано наступне обмеження, щоб гарантувати, що

акумулятор або виключно заряджається, або виключно розряджається в будь-який момент часу  $t$

$$U_t^c + U_t^d \leq 1 \quad (2.17)$$

(i) Витрати, пов'язані з циклом розряд–заряд.

Кількість циклів заряджання/розряджання впливає на термін служби акумулятора. Тому ця вартість за цикл, пов'язана з кожним циклом зарядки, розглядається та позначається константою  $C^b$ . Для відстеження кожного циклу розряду–заряду, двійкова змінна  $S = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_{NT}]$  використовується наступним чином у момент часу  $t$ ,

$$S_t = \max\{U_t^c - U_{t-1}^c, 0\} \quad (2.18)$$

Згодом загальна вартість розряду–заряду акумулятора становить

$$\kappa^b = \sum_{t=1}^{NT} C^b S_t \quad (2.19)$$

(ii) Обмеження заряду батареї

Характеристики BESS відіграють вирішальну роль у формуванні кінцевого результату. Зокрема, ємність акумулятора, а також його початковий стан заряду, позначений як  $E(0)$ , значно впливають на продуктивність системи. Загальна енергія акумулятора,  $E_t$   $t$ -й годині є

$$E_t = E(0) + \sum_{s=1}^t [P_s^c - P_s^d] \quad (2.20)$$

Обмеження енергії акумулятора є

$$0 \leq E_t \leq \bar{E} \quad (2.21)$$

де  $\bar{E}$  - це максимальна межа заряду акумулятора.

Вартість BESS залежить від зарядки, розрядки та циклу розряд–заряд. Постійні та лінійно змінні витрати під час стану зарядки позначаються  $A^c, B^c$ , відповідно, а постійні та лінійно змінні витрати під час розрядного стану позначені  $A^d, B^d$ , загальна витрата становить

$$TC^b = \kappa^b + \sum_{t=1}^{NT} \left[ \left( A^c U_t^c + B^c P_t^c + A^d U_t^d + B^d P_t^d \right) \right] \quad (2.22)$$

Витрати на придбання та експлуатацію акумуляторів, включаючи обмежену кількість циклів заряду та розряду, суттєво формують продуктивність системи. Підбір ємності батареї повинен ґрунтуватися на умовах експлуатації КС. В рамках цієї роботи був проведений багатофакторний аналіз системи з використанням батарей різної ємності. Такий підхід полегшив визначення оптимальної ємності батареї для КС із відомим робочим профілем.

### 2.2.7. Загальне рішення та чистий прибуток

Чистий прибуток PR виходить із балансу між доходом, заданим у рівнянні (2.10), і загальними витратами на фотоелектричну систему та BESS, визначеними у рівняннях (2.12) і (2.22), відповідно. Чистий прибуток включає дохід від продажу електроенергії в мережу та зарядки навантаження. Його дає

$$PR = R_{net} - CPV - TC^b \quad (2.23)$$

або,

$$PR = \sum_{t=1}^{NT} P_t^{oev} \alpha + \sum_i^{NSP} P_i^{sp} \beta + \sum_j^{NDF} P_j^{df} (\alpha - \gamma) - \sum_{t=1}^{NT} \left( C^b S_t + \sum_{j \in pv, c, d}^{NT} \left( A^j U_t^j + B^j P_t^j \right) \right) \quad (2.24)$$

Загальний вихід системи визначається як

$$P_t^{pv} + \eta^b P_t^d - P_t^c + P_t^{df} - P_t^{sp} \quad (2.25)$$

і повне рішення X відповідно описується

$$X = \left[ U^{sp}, U^{df}, U^c, U^d, P^{sp}, P^{df}, P^c, P^d, S \right] \quad (2.26)$$

Мета полягає в тому, щоб розв'язати  $X$  у рівнянні (2.26) з урахуванням обмежень, наведених у Розділі 2.2.1, Розділі 2.2.2, Розділі 2.2.3, Розділі 2.2.4, Розділі 2.2.5 та Розділі 2.2.6. Враховуючи природу формулювання, для отримання рішення застосовано схему MILP (змішане цілочисельне лінійне програмування). У цій роботі використовувався MATLAB R2022b, і авторами були підготовлені спеціальні сценарії для оголошення та перевірки обмежень і припущень з наступною реалізацією контрольних процедур. Розроблені скрипти дозволяють аналізувати різні параметри системи для оцінки ефективності SPEVCS. За допомогою масштабованого обчислювального коду, підготовленого в середовищі MATLAB, можна аналізувати різні фактори. Анотація коду, яка розглядає деякі обмеження, показана нижче:

```
prob.Constraints.pvconstr = PPV(1:NT) <= PPV(1:NT).*Upv(1,1:NT);
prob.Constraints.charconstr = PBC(1,1:NT) <= PBCMAX.*Uc(1,1:NT);
prob.Constraints.discharconstr = PBD(1,1:NT) <= PBDMAX.*Ud(1,1:NT);
prob.Constraints.spconstr = PSP(1,1:NT) <= PSPMAX(1,1:NT).*Usp(1,1:NT);
prob.Constraints.dfconstr = PDF(1,1:NT) <= PDFMAX(1,1:NT).*Udf(1,1:NT);
prob.Constraints.spconstrp = PSP(1,1:NT) >= 0;
prob.Constraints.dfconstrp = PDF(1,1:NT) >= 0;
```

## 2.3. Дані, результати та аналіз

У цьому розділі наведено набори даних, результати, аналіз і подальші пояснення.

### 2.3.1. Дані SPEVCS

У цьому дослідженні розглядається SPEVCS потужністю 1 МВтр. Розглянуте місце розташування – Варшава, Польща (52,2297° пн.ш., 21,0122° сх.д.). Щоб підвищити ефективність, були враховані дані про генерацію сонячної фотоелектричної енергії в один із найспекотніших днів, коли

опромінення було максимальним. Ці дані, що відповідають 19 липня 2019 р., взяті з випр. [29] і показано на рисунку 2.3 поруч із даними про навантаження EV. Було розглянуто односторонні фотоелектричні панелі з постійним кутом нахилу ( $35^\circ$ ), а відповідні параметри вартості були взяті з посилань. [17, 22].

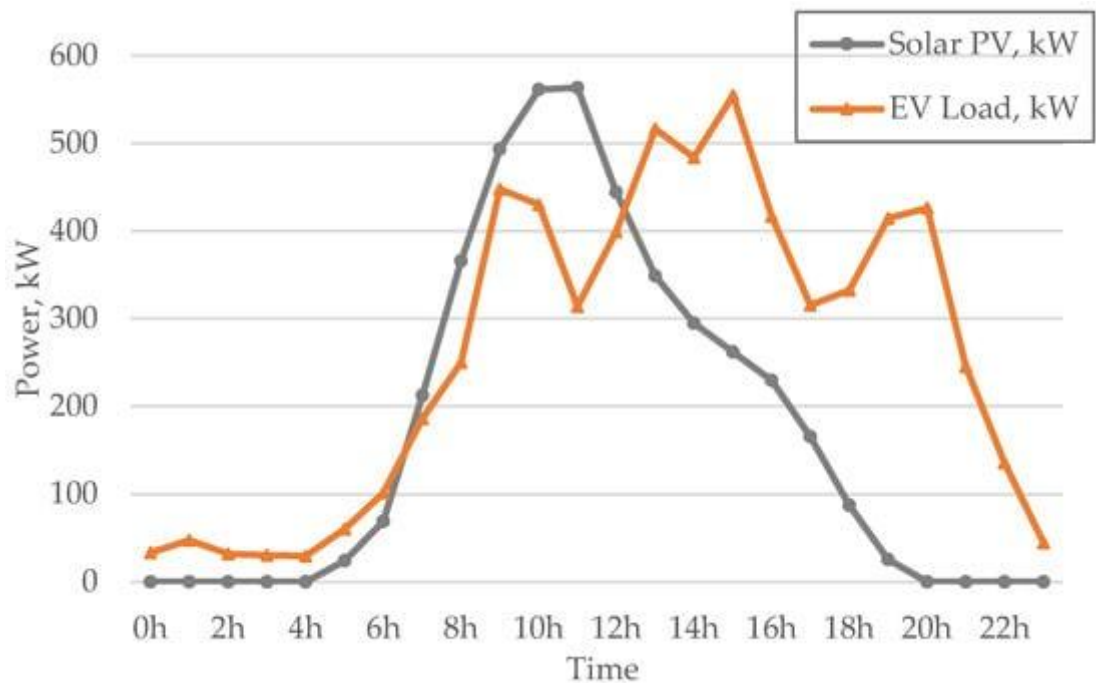


Рисунок 2.3. – Розподіл фотоелектричного та електроелектричного навантаження

Було розглянуто літій-іонну (Li-ion) батарею з життєвим циклом 3500 циклів при 80% глибині розряду (DoD) і загальним терміном служби 10 років разом із відповідними витратами згідно з посиланням. [30]. Тому  $C^b$

було розраховано відповідно на основі цих даних. Витрати, включаючи відповідні дані, взяті з [17. Параметри батареї, розглянуті в дослідженні, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри батареї.

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| Efficiency, $\eta^b$ (%)      | 90   |
| Depth of discharge: DoD (%)   | 80   |
| Battery size: $\bar{E}$ (kWh) | 1000 |

### 2.3.2. Дані про тарифи та навантаження

Численні документи прогнозують надходження електромобілів, особливо з точки зору попиту на електроенергію [31, 32], і варіації в моделі навантаження були дуже мінімальними. У вих. [31], прогнози були створені на основі попиту на електроенергію в результаті заряджання мільйона електромобілів.

Подібним чином у вих. [32] було проведено короткостроковий прогноз ймовірності прибуття EV для зарядки протягом дня. Враховуючи велику кількість вивчених електромобілів, були використані дані ймовірності прибуття електромобілів із посилання [32]. У цьому дослідженні дані були нормалізовані на ємність зарядної станції,  $K$ , і далі надані у відсотках  $K$ , як зазначено в рівнянні (2.13). Максимальне заповнення КС вважається 70%, а навантаження вважається відсотком від потужності КС  $\rho^{ev}$ . Відповідні дані наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Прогноз прибуття EV на добу вперед

| Time                                                      | 0 h  | 1 h  | 2 h  | 3 h  | 4 h  | 5 h  | 6 h  | 7 h  | 8 h  | 9 h  | 10 h | 11 h |
|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EV arrival data from [32]                                 | 282  | 402  | 269  | 251  | 246  | 503  | 850  | 1560 | 2100 | 3757 | 3612 | 2635 |
| Load based on the probability of arrivals $\rho^{ev}$ (%) | 4.2  | 6.0  | 4.0  | 3.8  | 3.7  | 7.6  | 12.8 | 23.5 | 31.6 | 56.5 | 54.3 | 39.6 |
| Time                                                      | 12 h | 13 h | 14 h | 15 h | 16 h | 17 h | 18 h | 19 h | 20 h | 21 h | 22 h | 23 h |
| EV arrival data from [32]                                 | 3354 | 4335 | 4063 | 4654 | 3498 | 2647 | 2795 | 3479 | 3577 | 2059 | 1135 | 374  |
| Load based on the probability of arrivals $\rho^{ev}$ (%) | 50.4 | 65.2 | 61.1 | 70.0 | 52.6 | 39.8 | 42.0 | 52.3 | 53.8 | 31.0 | 17.1 | 5.6  |

Вартість зарядки електромобіля на громадських КС у Польщі становить 2,09 злотих/кВт–год, що приблизно еквівалентно 0,44 дол. США/кВт–год згідно з посиланням. [33]. Ця ставка застосовується до зарядних пристроїв постійного струму з номінальною потужністю 100 кВт або менше, тому ми приймаємо  $\alpha$  рівним 0,44 дол. США/кВт–год.

Наразі в Польщі немає добре налагодженого механізму, який би дозволяв власникам сонячних фотоелектричних систем продавати надлишкову електроенергію назад у мережу. У квітні 2022 року

запроваджено систему нет-білінгу (замість розрахунку нетметрування), за допомогою якої споживачі оплачують надлишок електроенергії, що надходить у мережу, за оптовою ціною, нижчою за куплену електроенергію з мережі. У цій роботі ми розглядаємо  $\beta$  на рівні 0,965 злотих/кВт-год (0,238 дол. США/кВт-год) і  $\gamma$  на рівні 0,739 злотих/кВт-год (0,182 дол. США/кВт-год) [34].

### 2.3.3. Результати та аналіз

Акумулятор літій-іонний, ємністю 1 МВт\*год, ККД ( $\eta^b$ ) 90%, а глибина розряду (DoD) 80% розглядається в цій роботі. Враховуючи, що розмір батареї та початковий SOC мають суттєвий вплив на результати, обговорення ґрунтується на цих факторах. Аналіз на основі оптимального розміру батареї для автономної системи, як визначено за посиланням. [17] було виконано для запропонованої мережевої системи та представлено в наступному розділі.

#### 2.3.3.1. SPEVCS із сіткою

На рисунку 2.3 показано дані про сонячну енергію та прибуття EV. BESS та/або мережа повинні забезпечувати електроенергію, щоб задовольнити потребу в навантаженні протягом 0–4 годин і з 21-ї до 23-ї години, оскільки в ці години сонячна енергія дорівнює нулю. Сонячна потужність висока лише між 7 та 12 годинами ( $P^{pv} > P^{ev}$ ), під час якого система повинна задовольнити попит на навантаження, зарядити батарею та/або продати надлишкову потужність  $P^{sp}$  до сітки.

У цьому аналізі енергоємність акумулятора  $E = 1000$  кВт·год і враховано початкову умову  $E(0) = 500$  кВт·год. Однак обмеження в рівнянні

(2.21) порушується для автономної системи, оскільки вона не може задовольнити загальне навантаження. Для роботи потрібна батарея більшого розміру, що було встановлено  $E = 3000$  кВт/год,  $E(0) = 2500$  кВт/год у вих. [17]. Крім того, дефіцитну потужність можна придбати з мережі, зберігаючи початкову ємність акумулятора.

Той самий розмір батареї зберігається в поточному дослідженні, дозволяючи системі імпортувати дефіцитну потужність з мережі, і проводиться порівняння між результатами, отриманими в реф. [17] та запропонований спосіб. У будь-який момент вважається, що навантаження становить 70% потужності КС.

Таблиця 2.3 показує, що у випадку автономної системи обмеження страждають від порушення, що призводить до потреби у більшій батареї. Крім того, підключена до мережі система дає прибуток у розмірі 3129,6 доларів США при збереженні існуючого розміру батареї.

Таблиця 2.3. Порівняльний аналіз із реф. [17] для попередньо визначених параметрів:  $E = 1000$  кВт/год і  $E(0) = 500$  кВт/год.

| Off-Grid System—Profit Using Ref. [17]                                                          | Grid-Connected System—Profit                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Not possible to optimize as the battery size is small.<br>Violation of constraint Equation (21) | Deficit power is purchased from the grid,<br>resulting in a profit of USD 3129.6 |

Було проведено аналіз і представлено обговорення на основі цих значень для запропонованої системи підключення до мережі. Надлишкова потужність  $P^{sp}$  і дефіциту потужності  $P^{df}$  проти  $P^{pv}$  і  $P^{ev}$  показані на рисунку 2.4. Як видно, коли навантаження  $P^{ev}$  вище, ніж сонячна енергія  $P^{pv}$  між 0 год. і 6 год. та 13 год. і 23 год., дефіцитна потужність купується з мережі. Навантаження задовольняється додатковою потужністю від мережі, батареї або комбінації обох, для яких фактор залежить від обмежень для максимального прибутку. Так само, коли сонячна енергія перевищує навантаження, надлишок електроенергії між 7 та 12 годинами продається в

мережу. Будь-яка додаткова потужність від фотоелектричної системи в години пік може бути продана в мережу, використана для зарядки акумулятора або одночасно використана для заряджання акумулятора та подачі електроенергії в мережу.

Потужність мережі, енергія батареї, сонячна енергія та навантаження EV показані на рисунку 2.5. Позитивна потужність мережі вказує на надлишкову потужність  $P^{sp}$ , тоді як негативна потужність мережі вказує на дефіцит потужності  $P^{df}$ . Як видно на рисунку 2.5, з 13 до 19 години навантаження забезпечується виключно сонячною енергією та мережею. Однак через 20 годин, оскільки сонячна енергія відсутня, енергія мережі використовується для заряджання батареї, щоб підтримувати стан заряду  $E(0)$  на рівні 500 кВт-год наприкінці періоду NT, а також для задоволення навантаження. Тому в кінці періоду NT SOC або початкова енергія батареї підтримується на рівні 500 кВт/год.

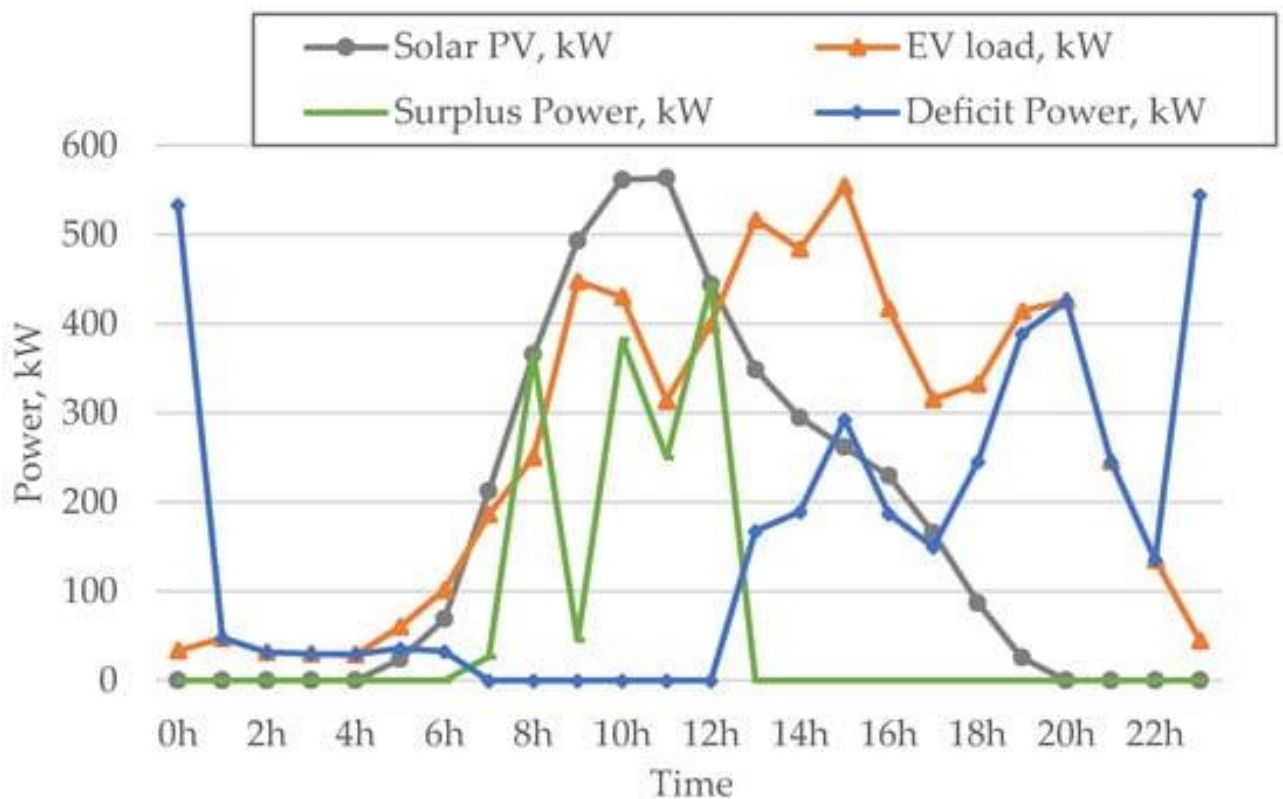


Рисунок 2.4. – Надлишкова потужність  $P^{sp}$  і дефіциту потужності  $P^{df}$

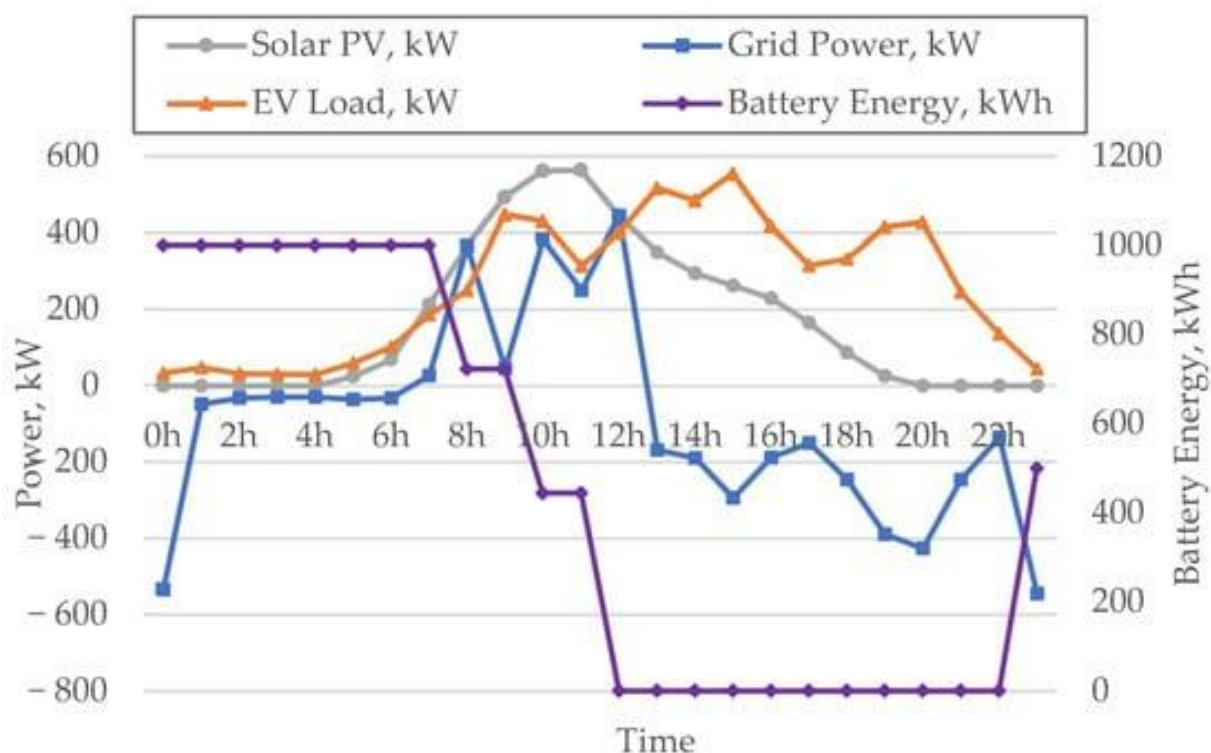


Рисунок 2.5. – Потужність мережі та енергія акумулятора

З 7 години, коли  $P_{pv} > P_{ev}$ , сонячна енергія (212,63 кВт) постачає електроенергію на навантаження (186,12 кВт) і одночасно експортує надлишок електроенергії в мережу (26,50 кВт); отже, потужність мережі становить 26,50 кВт. Графік стану зарядки та розрядки батареї представлено на рисунку 6, де батарея повністю заряджена до своєї ємності 1000 кВт і показує розряд через 8 год, 10 год та 12 год. Батарея заряджається через мережу для підтримки  $E(0)$  на рівні 500 кВт наприкінці періоду NT.

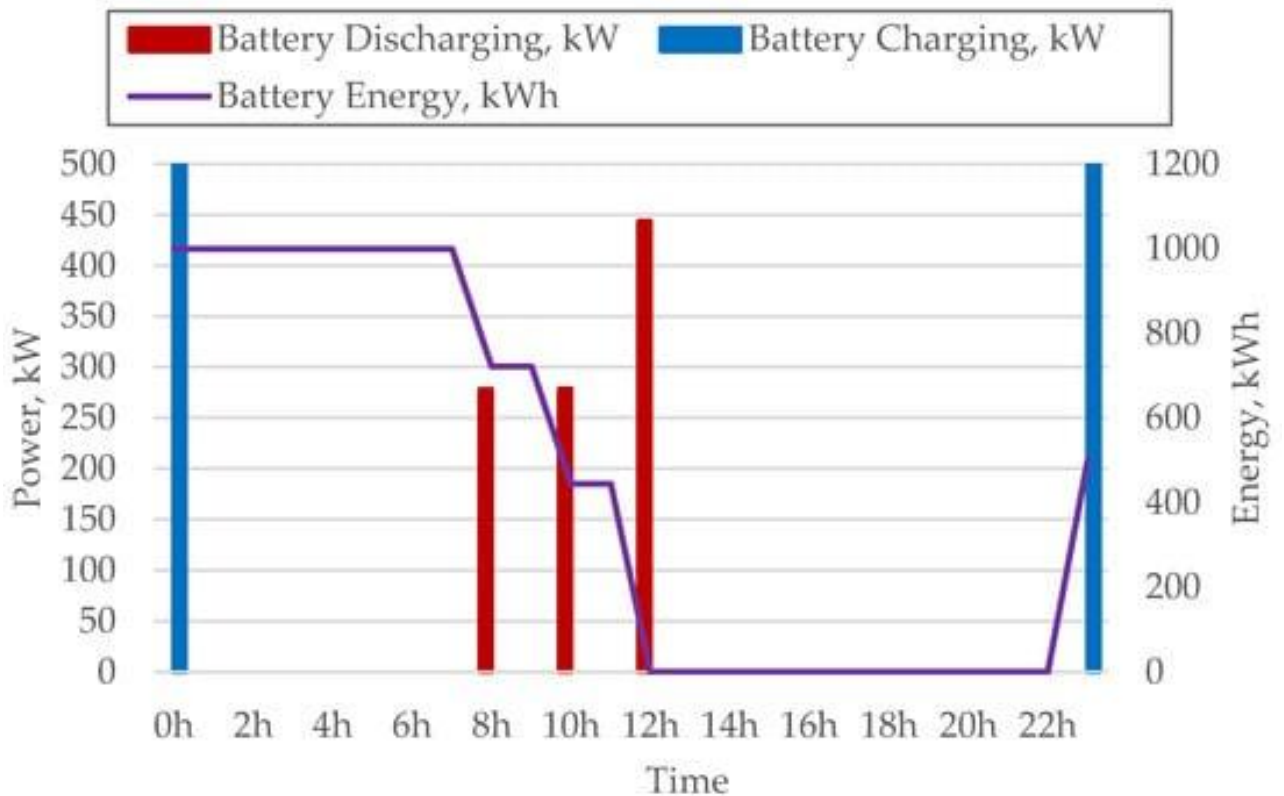


Рисунок 2.6. – Графік зарядки та розрядки батареї

BESS функціонує, постачаючи електроенергію для задоволення вимог навантаження, вводячи електроенергію в мережу або використовуючи комбінацію обох стратегій для максимізації загальної прибутковості. Щоб забезпечити цілісність роботи, застосовується відповідне обмеження, яке обмежує акумулятор лише в режимі заряджання або розряджання в будь-який конкретний момент. Це обмеження гарантує плавне управління потоком енергії. Змінна оптимізації  $S$ , яка описує цикл заряджання–розряджання, показана на рисунку 2.7. Протягом усього періоду NT  $S$  підтримується на рівні 1, що спостерігається о 21 годині.

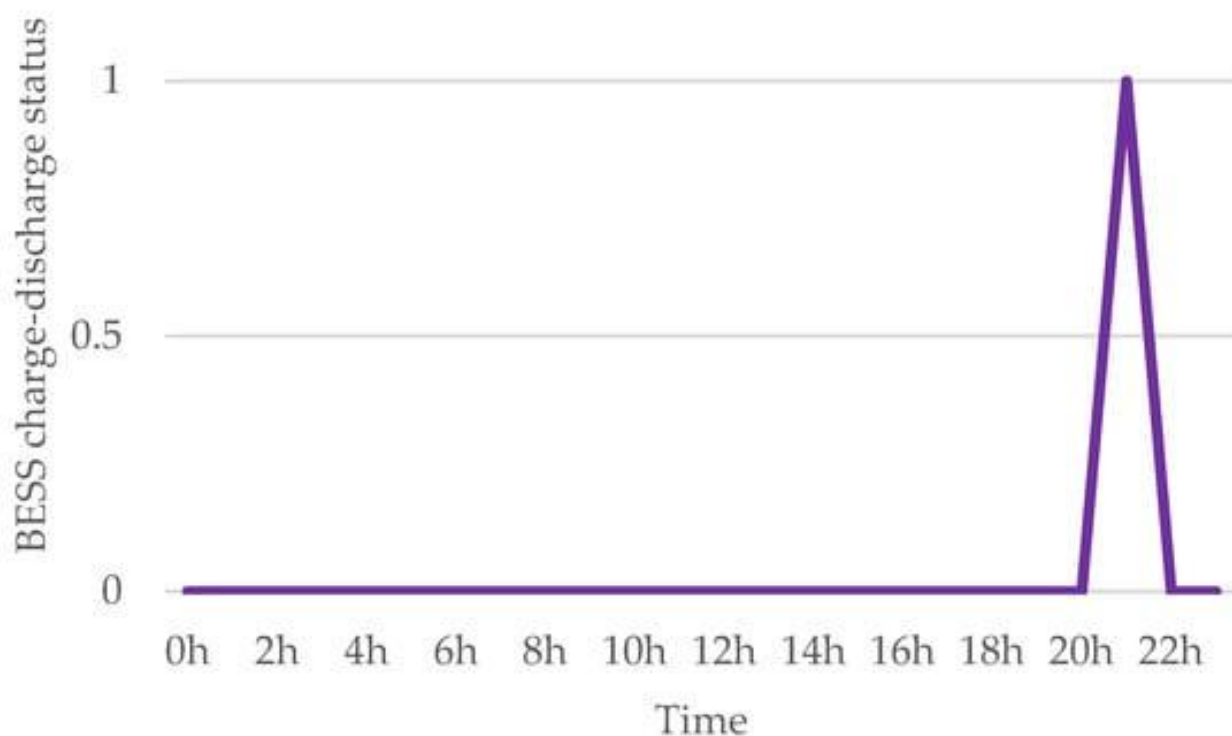


Рисунок 2.7. – Кількість циклів заряду акумулятора (зарядка–розрядка)

Запропонована формула також демонструє свою ефективність завдяки використанню надлишкової енергії, яка інакше витрачається даремно. Надлишок енергії розподіляється або для зарядки батареї, або для продажу в мережу за існуючим ринковим тарифом або комбінацією обох. Отже, цей підхід оптимально використовує як доступну сонячну енергію, так і можливості BESS, що призводить до покращеного планування та прибутку для SPEVCS.

### 2.3.3.2. Оптимальний розмір батареї

У вих. [17], запропоноване формулювання було проведено на автономній фотоелектричній камері комерційного EV CS для отримання максимального прибутку. BESS має значний вплив на норму прибутку. Сонячна фотоелектрична система сама по собі не здатна задовольнити попит на навантаження. Такі вимоги можуть бути задоволені:

- (i) Збільшення розміру батареї та/або
- (ii) Купівля дефіцитної електроенергії з мережі.

Отже, визначено оптимальний розмір батареї та  $E(0)$ . Алгоритм реф. [17] виглядає наступним чином:

(1) Введення даних

- Надайте дані (сонячна PV, ймовірність EV, константи).
- Визначте ймовірність прибуття EV або попит на навантаження.

(2) Формулювання моделі

- Визначте змінні для сонячної PV, навантаження EV, BESS і загальної системи.

(3) Розрахунок доходу

- Визначте умови для розрахунків доходів на основі продажу електроенергії навантаженню EV.

(4) Керування надлишковою потужністю

- Якщо вихідна потужність сонячної енергії перевищує попит на навантаження EV, зберігайте надлишкову потужність в акумуляторі та встановіть сприятливі періоди часу для використання накопиченої надлишкової потужності.

(5) Оптимізація

- Використовуйте метод MILP для визначення оптимального рішення.
- Визначте цільові функції та обмеження на основі стратегії зарядки, розрахунку доходу, управління надлишковою потужністю та характеристик системи.

(6) Рішення (режим 1)

- Використовуйте алгоритм MILP, щоб вирішити задачу оптимізації та отримати оптимальне рішення для максимізації прибутку від автономної сонячної фотоелектричної системи.

(7) Рішення (режим 2)

- Використовуйте алгоритм MILP, щоб вирішити проблему оптимізації, послабивши обмеження на ємність батареї, щоб можна було досягти

оптимального розміру батареї для максимального прибутку.

Тому у вих. [17], оптимальний розмір батареї для максимального прибутку виявився значно великим. Розмір батареї та SOC були визначені  $E = 3000$  кВт/год і  $E(0) = 2500$  кВт/год відповідно. Однак із запропонованим методом SPEVCS з однаковими специфікаціями батареї та підключеним до мережі забезпечує більший прибуток. Таблиця 4 показує прибуток, який можна отримати із запропонованою системою в порівнянні з автономною системою, запропонованою в посиланні. [17].

Таблиця 2.4. – Порівняльний аналіз рішення з оптимальним розміром батареї,  $E = 3000$  кВт/год,  $E(0) = 2500$  кВт/год.

| Profit as per Ref. [17] | Profit—Proposed Method |
|-------------------------|------------------------|
| USD 2674.3              | USD 3739               |

Запропонована формула забезпечує загальний щоденний прибуток у розмірі 3739 доларів США. Однак це не рекомендується через значний розмір батареї, необхідної для SPEVCS потужністю 1 МВт/пік, що призведе до додаткових пов'язаних витрат і початкових витрат серед іншого. З іншого боку, як показано в попередньому розділі, вибір батареї з меншою ємністю 1000 кВт/год дає прибуток у розмірі 3129,6 доларів США, що призводить до незначної різниці лише в 509,4 доларів США.

Визначення оптимального розміру батареї для SPEVCS вимагає багатогранного аналізу, що виходить за рамки простих міркувань прибутку. Економічні фактори, включаючи витрати на встановлення, обслуговування та інфраструктуру, повинні узгоджуватися з фінансовими цілями проекту. Водночас сумлінна оцінка впливу на навколишнє середовище, включаючи видобуток ресурсів і виробничі процеси, пов'язані з більшими батареями, має вирішальне значення для забезпечення екологічної стійкості. Крім того, перспективний підхід є важливим для оцінки довгострокової стабільності

вибраного розміру батареї, враховуючи такі фактори, як тривалість життя, довговічність циклу та сумісність із технологіями, що розвиваються. Впровадження MILP покращує процес оптимізації, забезпечуючи систематичну та математичну основу для точного визначення оптимального розміру батареї та прибутку. Цей аналітичний підхід розглядає дискретні змінні, такі як ємність батареї, поряд із безперервними змінними, сприяючи більш точному представленню обмежень реального світу та сприяючи більш надійному та надійному процесу прийняття рішень для SPEVCS. Враховуючи ці міркування в процесі прийняття рішень, можна зробити розумний вибір для оптимізації прибутковості, одночасно сприяючи стійкій та екологічно відповідальній SPEVCS.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Було запропоновано інноваційний підхід для оптимізації роботи комерційної зарядної станції для електромобілів (SPEVCS) на основі фотоелектричних сонячних батарей, інтегрованої з системою зберігання енергії акумулятора (BESS) і взаємодією з мережею. Ефективність препарату підтверджено за допомогою комплексних наборів даних, аналізу результатів і подальших пояснень.

Використаний набір даних включав сонячну фотоелектричну генерацію, параметри BESS, витрати на взаємодію з мережею, ймовірності прибуття EV та вимоги до навантаження. Ці набори даних були вирішальними для встановлення ефективності запропонованої методології. SPEVCS, розглянутий у цьому дослідженні, хоча й був гіпотетичним, точно відображав реальні умови, а достовірність набору даних підтвердила достовірність дослідження. Дослідження проводилося в Польщі, тому продуктивність запропонованого алгоритму оцінювалася в репрезентативних енергетичних умовах, коли фотоелектричні панелі працювали нижче своїх номінальних характеристик, що призводило до складних умов CS.

## ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Аналіз показав, що запропонована формула пропонує ефективні рішення як для автономних, так і для мережових систем. У випадку автономного сценарію батарея більшого розміру була визначена як необхідна для задоволення потреб у навантаженні, тоді як у конфігурації з підключенням до мережі був прийнятий підхід, орієнтований на отримання прибутку. Процес оптимізації ефективно збалансував виробництво сонячної енергії, зарядку, розрядку акумулятора та взаємодію з мережею для максимізації прибутку. Надлишок сонячної енергії оптимально використовувався шляхом його зберігання в акумуляторі або продажу в мережу. Навпаки, у періоди дефіциту сонячної енергії спостерігалось ефективне керування електромережею та розрядом батареї для задоволення попиту на навантаження.

Дослідження також вивчало оптимальний розмір батареї для максимізації прибутку. Порівняння показало, що хоча більший розмір батареї потенційно міг би дати трохи вищі прибутки, практичність і економічна ефективність впровадження такої системи залишалися проблемою. Таким чином, запропонована формула запропонувала більш прийнятний розмір батареї, що дозволило досягти значних прибутків без істотного збільшення витрат.

На завершення запропонована формулювання продемонструвала збалансований підхід до використання сонячної енергії, можливостей BESS і взаємодії з електромережами для отримання оптимального прибутку в SPEVCS. Завдяки інтелектуальному управлінню енергетичними потоками та взаємодіями запропонований метод продемонстрував свій потенціал для підвищення ефективності та стійкості систем відновлюваної енергії.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Solar Energy. Available online: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy> (accessed on 21 September 2023).
2. Cifuentes-Faura, J. European Union Policies and Their Role in Combating Climate Change over the Years. *Air Qual. Atmos. Health* 2022, 15, 1333–1340. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
3. Wassiliadis, N.; Schneider, J.; Frank, A.; Wildfeuer, L.; Lin, X.; Jossen, A.; Lienkamp, M. Review of Fast Charging Strategies for Lithium-Ion Battery Systems and Their Applicability for Battery Electric Vehicles. *J. Energy Storage* 2021, 44, 103306. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Miri, I.; Fotouhi, A.; Ewin, N. Electric Vehicle Energy Consumption Modelling and Estimation—A Case Study. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45, 501–520. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Wang, G.; Xu, Z.; Wen, F.; Wong, K.P. Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013, 28, 2363–2372. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Baik, S.; Jin, Y.; Yoon, Y. Determining Equipment Capacity of Electric Vehicle Charging Station Operator for Profit Maximization. *Energies* 2018, 11, 2301. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Funke, S.Á.; Sprei, F.; Gnann, T.; Plötz, P. How Much Charging Infrastructure Do Electric Vehicles Need? A Review of the Evidence and International Comparison. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 2019, 77, 224–242. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Khan, W.; Ahmad, A.; Ahmad, F.; Saad Alam, M. A Comprehensive Review of Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles. *Smart Sci.* 2018, 6, 100006. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Falvo, M.; Sbordone, D.; Bayram, I.S.; Devetsikiotis, M. EV Charging Stations and Modes: International Standards. In *Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*,

SPEEDAM 2014, Ischia, Italy, 1 June 2014; pp. 1134–1139. [Google Scholar]

10. Mukherjee, J.C.; Gupta, A. A Review of Charge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grid. *IEEE Syst. J.* 2015, 9, 1541–1553. [Google Scholar] [CrossRef]

11. Lee, J.H.; Chakraborty, D.; Hardman, S.J.; Tal, G. Exploring Electric Vehicle Charging Patterns: Mixed Usage of Charging Infrastructure. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 2020, 79, 102249. [Google Scholar] [CrossRef]

12. Nishimwe, H.L.F.; Yoon, S.-G. Combined Optimal Planning and Operation of a Fast EV-Charging Station Integrated with Solar PV and ESS. *Energies* 2021, 14, 3152. [Google Scholar] [CrossRef]

13. Jiang, W.; Zhen, Y. A Real-Time EV Charging Scheduling for Parking Lots with PV System and Energy Store System. *IEEE Access* 2019, 7, 86184–86193. [Google Scholar] [CrossRef]

14. Moon, H.; Park, S.Y.; Jeong, C.; Lee, J. Forecasting Electricity Demand of Electric Vehicles by Analyzing Consumers' Charging Patterns. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 2018, 62, 64–79. [Google Scholar] [CrossRef]

15. Alghamdi, T.G.; Said, D.; Mouftah, H.T. Profit Maximization for EVSEs-Based Solar Energy in Smart Cities. In *Proceedings of the 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Harbin, China, 28 June 2021; pp. 1575–1580. [Google Scholar]

16. Wang, S.; Bi, S.; Zhang, Y.-J.A.; Huang, J. Electrical Vehicle Charging Station Profit Maximization: Admission, Pricing, and Online Scheduling. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2018, 9, 1722–1731. [Google Scholar] [CrossRef]

17. Dukpa, A.; Butrylo, B. MILP-Based Profit Maximization of Electric Vehicle Charging Station Based on Solar and EV Arrival Forecasts. *Energies* 2022, 15, 5760. [Google Scholar] [CrossRef]

18. Puranen, P.; Kosonen, A.; Ahola, J. Technical Feasibility Evaluation of a Solar PV Based Off-Grid Domestic Energy System with Battery and Hydrogen Energy Storage in Northern Climates. *Sol. Energy* 2021, 213, 246–259. [Google Scholar] [CrossRef]

19. Singla, A.; Singh, K.; Kumar Yadav, V. Optimization of Distributed Solar Photovoltaic Power Generation in Day-Ahead Electricity Market Incorporating Irradiance Uncertainty. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2021, 9, 545–560. [Google Scholar] [CrossRef]
20. Khatod, D.K.; Pant, V.; Sharma, J. Evolutionary Programming Based Optimal Placement of Renewable Distributed Generators. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 683–695. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Dukpa, A.; Duggal, I.; Venkatesh, B.; Chang, L. Optimal Participation and Risk Mitigation of Wind Generators in an Electricity Market. *IET Renew. Power Gener.* 2010, 4, 165. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Lugo-Laguna, D.; Arcos-Vargas, A.; Nuñez-Hernandez, F. A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology. *Sustainability* 2021, 13, 3238. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Development of Rapid Ultra Rapid Charging UK. Available online: <https://uk.mer.eco/news/the-development-of-rapid-ultra-rapid-charging-in-the-uk/> (accessed on 14 June 2022).
24. Ministry of Climate and Environment—Gov.Pl Website; New Programme of NFOŚiGW—An Impulse for the Development of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Poland. Available online: <https://www.gov.pl/web/climate/new-programme-of-nfosigw--an-impulse-for-the-development-of-electric-vehicle-charging-infrastructure-in-poland> (accessed on 12 July 2022).
25. Nait-Sidi-Moh, A.; Ruzmetov, A.; Bakhouya, M.; Naitmalek, Y.; Gaber, J. A Prediction Model of Electric Vehicle Charging Requests. *Procedia Comput. Sci.* 2018, 141, 127–134. [Google Scholar] [CrossRef]
26. He, Y.; Venkatesh, B.; Guan, L. Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles. *IEEE Trans. Smart Grid* 2012, 3, 1095–1105. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Xydias, E.S.; Marmaras, C.E.; Cipcigan, L.M.; Hassan, A.S.; Jenkins, N. Forecasting Electric Vehicle Charging Demand Using Support Vector

Machines. In Proceedings of the 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2–5 September 2013; pp. 1–6. [Google Scholar]

28. Quiros-Tortos, J.; Ochoa, L.; Butler, T. How Electric Vehicles and the Grid Work Together: Lessons Learned from One of the Largest Electric Vehicle Trials in the World. *IEEE Power Energy Mag.* 2018, 16, 64–76. [Google Scholar] [CrossRef]

29. Renewables.ninja. Available online: <https://www.renewables.ninja/> (accessed on 14 June 2022).

30. Mongird, K.; Viswanathan, V.; Balducci, P.; Alam, J.; Fotedar, V.; Koritarov, V.; Hadjerioua, B. An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics. *Energies* 2020, 13, 3307. [Google Scholar] [CrossRef]

31. Lojowska, A.; Kurowicka, D.; Papaefthymiou, G.; van der Sluis, L. Stochastic Modeling of Power Demand Due to EVs Using Copula. *IEEE Trans. Power Syst.* 2012, 27, 1960–1968. [Google Scholar] [CrossRef]

32. Li, Y.; Huang, Y.; Zhang, M. Short-Term Load Forecasting for Electric Vehicle Charging Station Based on Niche Immunity Lion Algorithm and Convolutional Neural Network. *Energies* 2018, 11, 1253. [Google Scholar] [CrossRef]

33. GreenWay. Your Partner in Electromobility. Available online: <https://greenwaypolska.pl/uslugi-ladowania> (accessed on 22 August 2023).

34. RCEm. Market Monthly Electricity Price—PSE. Available online: <https://www.pse.pl/oire/rcem-rynkowa-miesieczna-cena-energii-elektrycznej> (accessed on 10 August 2023).

35. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей — 2019. ДП «НЕК «Укренерго». URL: <http://www.nerc.gov.ua/?news=10017> (дата звернення: 22.07.2020).

36. Харазішвілі Ю. М. Системна безпека сталого розвитку: інструментарій оцінки, резерви та стратегічні сценарії реалізації : монографія

/ НАН України, Ін-т економіки промислості. Київ, 2019. 304 с.