

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-24м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Богдан ІСКРА
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК

Олександр ПАЯНОК

(прізвище та ініціали)

«25» 11 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ЕОЕМ

Олександр БАБЕНКО

(прізвище та ініціали)

«19» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

«25» 11 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“14” 10 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Іскрі Богдану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії.

Керівник роботи Паянок Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф. КЕМСК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від від “24” вересня 2025 року № 313

2. Термін подання студентом роботи 25.11.2025р.

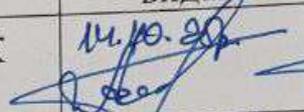
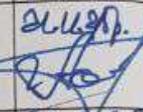
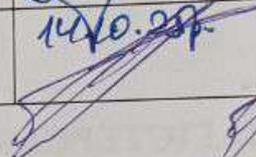
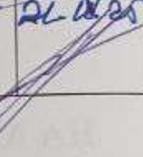
3. Вихідні дані до роботи: Технічна документація та перелік літературних джерел, що стосуються опису та автоматизації технологічного процесу керування мережею сонячної фотоелектричної станції з системами зберігання енергії.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку автоматизованих систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії 2 Розробка структури автоматизованої систем керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії 3 Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії 4 Розробка схеми автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії 5 Розрахунок та моделювання автоматизованої системи керування у програмному забезпеченні smartdesign 6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Призначення та можливості систем керування СЕС з УЗЕ; Основні проблеми та виклики; Огляд існуючих апаратно-програмних рішень систем керування СЕС з УЗЕ; Порівняння функцій існуючих апаратно-програмних рішень системи керування СЕС з УЗЕ; Розробка структури автоматизованої систем керування; Функціональні можливості автоматизованої

системи керування; Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи керування СЕС з УЗЕ; Структурна схема підключення автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ; Алгоритм функціонування автоматизованої системи керування енергопотоків; Розрахунок автоматизованої системи керування у програмному забезпеченні SmartDesign; Моделювання автоматизованої системи керування у програмному забезпеченні SmartDesign; Висновки; Наукове і практичне значення одержаних результатів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Паянок О.А.	 14.10.2017	 21.11.2017
Економічна частина	к. т. н., доц. каф. ЕСЕМ Шулле Ю.А.	 14.10.2017	 21.11.2017

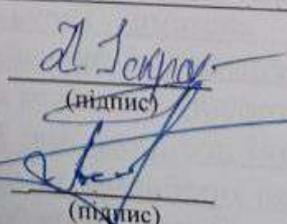
7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	24.09.2017	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.2017	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.2017	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.2017	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.2017	
6	Нормоконтроль МКР	24.11.2017	
7	Попередній захист МКР	25.11.2017	
8	Рецензування МКР	19.12.2017	
9	Захист МКР	23.12.2017	

Студент

Керівник роботи


(підпис)

Іскра Б.І.
(прізвище та ініціали)

Паянок О. А.
(прізвище та ініціали)

УДК: 62

Іскра Б

сонячної фото

Магістерська

електротехнік

Вінниця: ВНТ

На укр.

У маг

автоматизова

фотоелектрич

сучасні підхо

впровадженн

енергосистем

Розроб

споживання

зменшення с

енергоавтоно

У еко

розраховано

Отрим

придатність

накопичення

Графіч

В роз

експлуатації

чинників ото

Ключо

мережевий

енергетична

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.311.243:681.5

Іскра Б.І. Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2025. 130 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 22 назв; рис.: 37; табл. 17.

У магістерській кваліфікаційній роботі запропоновані рішення щодо автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії. Основну увагу зосереджено на сучасних тенденціях розвитку мережевих СЕС, вимогах до роботи в режимі нульового експорту та рішеннях з інтеграції систем накопичення енергії для підвищення ефективності й надійності електропостачання.

Проведено аналіз сучасних підходів до керування СЕС з УЗЕ, розглянуто апаратно-програмні засоби та тенденції розвитку енергосистем із впровадженням EMS. Визначено вимоги до системи керування, основні режими роботи та параметри функціонування гібридної енергетичної системи.

Здійснено вибір обладнання, сформовано структуру автоматизованої системи, розроблено структурну та схему підключення системи керування. Створено алгоритм керування енергопотоками з пріоритетом власного споживання та контролем експорту, а також логіку заряджання та розряджання УЗЕ.

Моделювання енергобалансу проведено у програмному середовищі SmartDesign 2.0 для СЕС та установки зберігання енергії ємністю. Результати моделювання підтвердили, що впровадження системи забезпечує скорочення споживання електроенергії з мережі, зниження пікових навантажень і підвищення енергетичної автономності підприємства.

У економічній частині проаналізовано доцільність впровадження та розраховано ключові енергетичні показники.

Отримані результати демонструють ефективність запропонованої автоматизованої системи керування та можуть бути використані при проектуванні та експлуатації сучасних мережевих СЕС з накопичувачами енергії.

Графічна частина складається з 17 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: сонячна фотоелектрична станція, система зберігання енергії, мережевий інвертор, нульовий експорт, автоматизована система керування, енергетична безпека, енергоменеджмент.

ABSTRACT

UDC: 621.311.243:681.5

Iskra B.I. Automated network architecture control system for a solar photovoltaic plant with electricity storage units. Master's qualification work in the specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 130 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 22 titles; fig.: 37; tabl. 17.

In the master's thesis, solutions were proposed for the automated control system of a grid-connected photovoltaic power plant architecture with energy storage systems. The main focus is placed on modern trends in the development of grid-connected PV systems, requirements for zero-export operation, and integration of energy storage systems to improve energy efficiency and power supply reliability.

An analysis of modern approaches to controlling PV plants with ESS has been carried out, including the review of hardware-software solutions and trends in energy systems with the implementation of Energy Management Systems (EMS). The requirements for the control system, main operating modes, and parameters of a hybrid energy system were determined.

The equipment was selected, the structure of the automated control system was developed, and the structural and connection diagrams were designed. An energy-flow control algorithm was implemented, prioritizing self-consumption and export limitation, as well as the charging and discharging logic of the energy storage system.

Energy-balance modeling was performed in the SmartDesign 2.0 software environment for the PV plant and energy storage system. The results confirmed that the implementation of the system reduces grid electricity consumption, decreases peak loads, and increases the energy autonomy of the facility.

The economic section analyzed the feasibility of implementation and determined key energy indicators.

The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed automated control system and can be used in the design and operation of modern grid-connected PV plants with energy storage.

The graphical part consists of 17 posters presenting the results of the work.

The occupational safety section defines the main provisions regarding the safe operation of the electrical system under the influence of environmental hazards.

Key words: solar photovoltaic power plant, energy storage system, grid-tied inverter, zero export, automated control system, energy security, energy management.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	12
1.1 Призначення та можливості систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії	13
1.2 Сучасні вимоги до систем керування мережевими сонячними електростанціями з накопичувачами енергії	17
1.3 Огляд існуючих апаратно-програмних рішень систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії.....	21
1.4 Перспективи розвитку інтегрованих систем енергетичного менеджменту (EMS) для автоматизованої система керування СЕС та УЗЕ.	36
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	40
2.1 Загальна характеристика об'єкта автоматизованої системи керування	40
2.2 Визначення цілей, завдань та вимог до системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ	43
2.3 Опис режимів роботи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії	46
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	52

3.1 Технічне обґрунтування вибору складових автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії	52
3.1.1 Вибір параметрів СЕС	54
3.1.2 Вибір параметрів УЗЕ	55
3.1.3 Вибір пристроїв системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії.....	56
3.2 Економічне обґрунтування вибору складових автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії	58
3.2.1 Визначення капітальних вкладень.....	58
3.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу	61
3.2.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	62
3.3 Розрахунок терміну окупності автоматизованої системи керування.....	64
3.3.1 Виріток електричної енергії СЕС	64
3.3.2 Виріток електричної енергії УЗЕ з впровадженням автоматизованої системи	66
3.3.3 Термін окупності автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії	69
4 РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	70
4.1 Розробка схеми підключення та автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії	70
4.2 Алгоритм функціонування автоматизованої системи керування енергопотоками	75

5 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ SMARTDESIGN	79
5.1 Вихідні дані для моделювання	79
5.2 Моделювання автоматизованої системи керування мережевої архітектури СЕС та УЗЕ у SmartDesign.....	82
5.3 Аналіз енергетичних втрат та ефективності системи.....	84
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	89
6.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів об'єкта	89
6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	91
6.2.1 Безпечна організація робочих місць під час оперативного обслуговування електроустановок	91
6.2.2 Електробезпека	93
6.2.3 Пожежна безпека.....	94
6.3 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	95
ВИСНОВКИ	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	101
ДОДАТКИ	104
ДОДАТОК А (обов'язковий) Технічне завдання.....	104
ДОДАТОК Б Графічна частина.....	109
ДОДАТОК В Протокол перевірки дипломної роботи на наявність текстових запозичень	21

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ФЕС – фотовольтаїчна електрична станція;
СЕС – сонячна електростанція;
УЗЕ – установка зберігання електроенергії;
ESS — Energy Storage System (система накопичення енергії);
ВДЕ – відновлювані джерела електроенергії;
EMS — Energy Management System (система енергоменеджменту);
ФЕМ – фотоелектричний модуль;
ЕМ – електрична мережа;
ЛЕП – лінія електропередачі;
ЗЗ — захисне заземлення;
ПУЕ — Правила улаштування електроустановок;
Пн — потужність номінальна;
P_{max} — максимальна потужність;
 η — коефіцієнт корисної дії;
I_{sc} — струм короткого замикання;
V_{oc} — напруга холостого ходу;
AC — Alternating Current (змінний струм);
DC — Direct Current (постійний струм).

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні енергетичні системи зазнають трансформації у напрямі децентралізації, цифровізації та інтеграції відновлюваних джерел енергії. В умовах зростання частки сонячної генерації особливо актуальним стає питання забезпечення стабільності електромереж, оптимального розподілу енергопотоків та підвищення рівня енергоефективності.

Мережеві сонячні фотоелектричні станції (СЕС), які є найбільш поширеним типом відновлюваних джерел енергії, не здатні функціонувати без зовнішньої опорної мережі — при її зникненні генерація припиняється. Крім того, відповідно до сучасних технічних вимог, такі СЕС мають працювати у режимі нульового експорту електроенергії, що вимагає складного балансування між генерацією, споживанням і накопиченням енергії. Це потребує застосування просунутих систем керування, здатних забезпечити аналітичний контроль та оперативне керування енергопотоками.

Інтеграція систем накопичення електроенергії у структуру мережевих сонячних електростанцій дозволяє забезпечити стабільну роботу енергетичних об'єктів, зменшити пікові навантаження, підвищити рівень самоспоживання та знизити залежність від зовнішньої мережі. Водночас, ефективність таких систем безпосередньо залежить від застосування сучасних методів автоматизованого керування та енергетичного менеджменту.

Для України актуальність теми посилюється умовами енергетичної нестабільності, наслідками воєнних дій, загрозами для енергетичної інфраструктури та необхідністю підвищення енергетичної автономності промислових і критично важливих об'єктів. Використання гібридних систем на базі СЕС і накопичувачів енергії сприяє формуванню стійких локальних енергосистем і розвитку мікромереж.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної електростанції з установками зберігання енергії є важливим та актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям енергетики, підвищує надійність та автономність електропостачання та забезпечує ефективне використання відновлюваних джерел енергії. Реалізація таких систем сприятиме розвитку інтелектуальних енергетичних мереж (Smart Grid), інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищенню енергетичної безпеки держави.

Об'єктом дослідження є автоматизовані процеси керування енергопостачанням у мережевих фотоелектричних системах з накопичувачами енергії.

Предметом дослідження є алгоритми та структурні рішення автоматизованої системи керування, що забезпечують підвищення ефективності мережевих сонячних фотоелектричних станцій з установками зберігання енергії шляхом оптимального керування енергопотоками, дотримання режиму нульового експорту та підвищення надійності електропостачання споживачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ.

Мета і завдання дослідження.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розроблення та впровадження автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії, що забезпечує оптимальне керування енергопотоками, підтримання режиму нульового експорту та підвищення надійності й енергоефективності електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно **розв'язати такі задачі:**

- Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку автоматизованих систем керування мережевими сонячними електростанціями з установками зберігання енергії;
- Дослідити вимоги до функціонування мережових СЕС в умовах нульового експорту та визначити критерії ефективності роботи системи з накопичувачем енергії;
- Оцінити існуючі апаратно-програмні рішення керування СЕС і УЗЕ, включно із сучасними системами енергоменеджменту (EMS) та алгоритмами контролю енергопотоків;
- Сформувати архітектуру автоматизованої системи керування мережевою фотоелектричною станцією з накопичувачем енергії;
- Визначити вимоги до обладнання та виконати технічний вибір складових системи, включно з параметрами СЕС, УЗЕ та пристроями керування;
- Розробити структурну та електричну схеми підключення системи автоматизації мережевої СЕС з УЗЕ;
- Створити алгоритм управління енергопотоками з урахуванням пріоритету самоспоживання, обмеження експорту, режимів заряджання та розряджання УЗЕ;
- Реалізувати моделювання роботи системи у програмному середовищі SmartDesign, визначити енергетичні показники та оцінити ефективність автоматизованого керування;
- Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження системи на базі розробленої моделі та визначити строк окупності;
- Розробити заходи з охорони праці та безпеки, пов'язані з експлуатацією мережевої СЕС з системою накопичення енергії.

Реалізація запропонованої системи дозволить оптимізувати використання сонячної енергії, зменшити залежність від зовнішньої мережі та забезпечити стійкість електропостачання. Це створює передумови для

впровадження Smart Grid-технологій та підвищення енергетичної незалежності підприємств в Україні.

Методи дослідження базуються на принципів побудови та функціонування систем автоматизованого керування, системного аналізу енергетичних процесів, методів синтезу алгоритмів керування енергопотоками у гібридних енергетичних системах, методів моделювання процесів заряджання та розряджання систем накопичення енергії, а також інструментів імітаційного моделювання в середовищі SmartDesign. Для обґрунтування технічних рішень застосовано аналітичні та порівняльні методи оцінки ефективності автоматизованих систем керування мережевими сонячними електростанціями.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше розроблено структурні та електричні схеми автоматизованої системи керування мережевою фотоелектричною станцією з установками зберігання енергії, а також сформовано алгоритм її функціонування, який відрізняється від відомих рішень здатністю до оптимального розподілу енергопотоків у реальному часі, забезпеченням режиму нульового експорту та підвищеним рівнем енергоефективності й надійності електропостачання.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

- обґрунтованому виборі та розрахунку основних компонентів системи: фотоелектричних модулів, інверторного обладнання, установки зберігання енергії та засобів автоматизації;
- розробленні структурної та електричної схем автоматизованої системи керування мережевою СЕС з УЗЕ;
- створенні алгоритму керування енергопотоками з урахуванням режиму нульового експорту, пріоритету власного споживання та оптимального використання накопичувача енергії;
- моделюванні роботи системи у програмному середовищі SmartDesign та підтвердженні ефективності обраного алгоритму автоматизації;

– забезпеченні можливості підвищення надійності електропостачання та рівня енергетичної автономності підприємств;

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорені на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2025» та на «LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки (2025 р.)».

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 2 тези доповідей матеріалів конференцій:

ВПРОВАДЖЕННЯ МЕРЕЖЕЖЕВОЇ АРХІТЕКТУРИ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ/ Б.І. Іскра, О.А. Паянок, – Матеріали конференції «LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки (2025)», Вінниця, 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/24082> – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 4 с.

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З СИСТЕМАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ/ Б.І. Іскра, О.А. Паянок, – Матеріали конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2025», Вінниця, 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/924> – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 3 с.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вартість електроенергії в Україні поступово зростає і далі наближається до європейського рівня. Це ставить нові завдання перед бізнесом – зберегти певний рівень рентабельності в умовах постійного збільшення витрати електричної енергії. [1]. Проблема розробки системи керування для мережевих інверторів є надзвичайно актуальною, оскільки вони є найпоширенішим типом сонячних електростанцій. Мережеві сонячні електростанції не можуть працювати без опорної мережі, і у разі зникнення зовнішньої мережі така станція припиняє роботу. Тому проблема розробки системи керування СЕС з іншими генеруючими установками та забезпечення нульового експорту електроенергії в нормальному режимі роботи СЕС стоїть дуже гостро.

Розвиток сонячної фотоелектричної генерації та систем накопичення енергії (УЗЕ) внаслідок переходу до відновлюваних джерел та декарбонізації енергетики набирає значущості у світовому та локальному контексті. Поєднання таких технологій із автоматизованими системами керування створює якісно новий рівень продуктивності, гнучкості й надійності енергетичних систем.

Глобально видно, що зростає частка сонячної фотоелектрики (СЕС) та систем накопичення: наприклад, огляд показує, що інтеграція мережевої сонячної електростанції та установки зберігання електроенергії у будівлях стала ефективною стратегією для досягнення вуглецевої нейтральності. [2]. Далі, ринки мікромереж (microgrid), розподілених джерел та накопичення зростають двозначно як відповідь на виклики стійкості мережі й геополітичну нестабільність.

У контексті сучасних викликів, що виникли в енергетичному секторі України внаслідок військової агресії та системних атак на критичну інфраструктуру, питання енергетичної стійкості підприємств набуло стратегічного значення. Масштабні відключення електроенергії, пошкодження високовольтних мереж, дефіцит генеруючих потужностей та обмеження з боку операторів систем розподілу (ОСР) вимагають від бізнесу впровадження автономних та гнучких рішень електропостачання. У цих умовах інтеграція сонячних фотоелектричних станцій (СЕС) із установками зберігання енергії (УЗЕ) та сучасними автоматизованими системами керування стає одним із ключових інструментів гарантування безперервності виробничих процесів та операційної стабільності підприємств.

1.1 Призначення та можливості систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії

Енергетика є одним з головних секторів світової економіки, які забезпечують необхідні умови для життєдіяльності людини. Споживання енергоресурсів збільшується рік від року, що негативно впливає на стан біосфери Землі, яка формувалася упродовж кількох мільярдів років. Щоб розв'язувати цю проблему, класичну електроенергетику, засновану на викопному паливі, трансформують та диверсифікують, збільшуючи кількість відновлюваних джерел енергії.

Мережеві сонячні електростанції – це фотоелектричні енергетичні системи, що виробляють електроенергію з сонячного випромінювання та працюють у синхронізації з загальною енергосистемою (електричною мережею). Основна функція таких станцій полягає у генерації електроенергії та передачі її споживачеві або в енергомережу, забезпечуючи покриття власного навантаження або постачання надлишків за встановленими правилами. [3].

Такі станції складаються з сонячних фотомодулів, інверторів, засобів комутації, захисної апаратури та систем моніторингу.

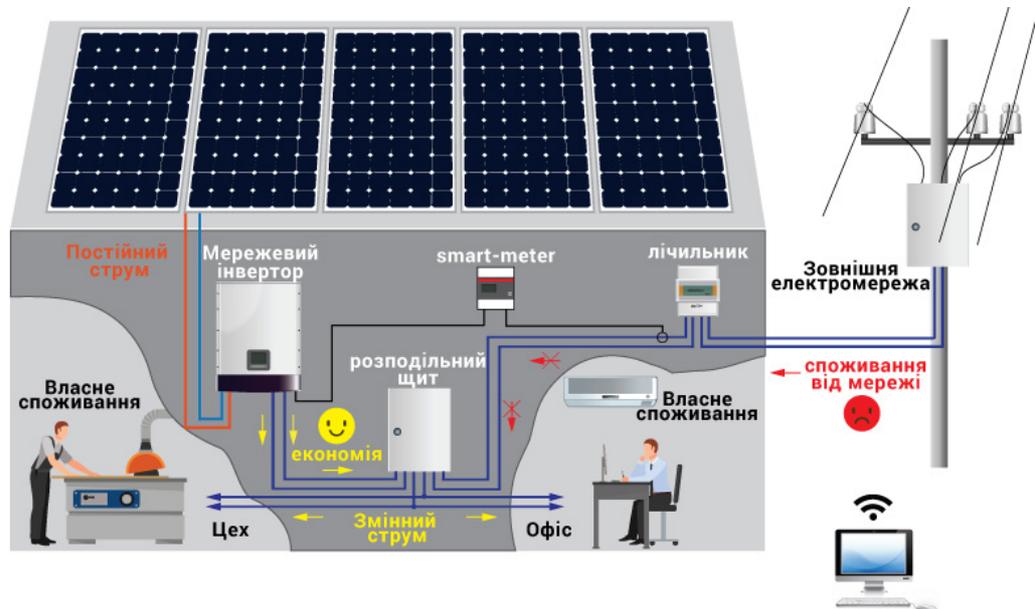


Рисунок 1.1– Структура мережевої електростанції.

Мережевий інвертор перетворює енергію від сонячних панелей на змінний струм і синхронізує її з параметрами електромережі. Він контролює напругу й частоту, автоматично вимикається при збої або відсутності напруги в мережі та запобігає зворотній подачі енергії, забезпечуючи безпечну й стабільну роботу системи.

Установка зберігання електроенергії (УЗЕ) — це передове технологічне рішення для зберігання енергії, яке широко застосовується в секторі відновлюваної енергетики. Його основна функція полягає в накопиченні електроенергії, що виробляється з відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія, та її вивільненні під час періодів пікового попиту, відключень електроенергії або високих цін на електроенергію.

Найбільш типовим сценарієм застосування BESS є інтеграція із сонячними системами: зарядження в сонячні денні години та вивільнення електроенергії вночі або в періоди дефіциту електроенергії, що допомагає

користувачам досягти енергетичної самодостатності, оптимізації витрат та надійності електропостачання. BESS відіграє особливо важливу роль, особливо у вирішенні проблем періодичного виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії. [4]

На рисунку 1.2 зображено структурну схему інтеграції системи зберігання електроенергії до електричної мережі підприємства.

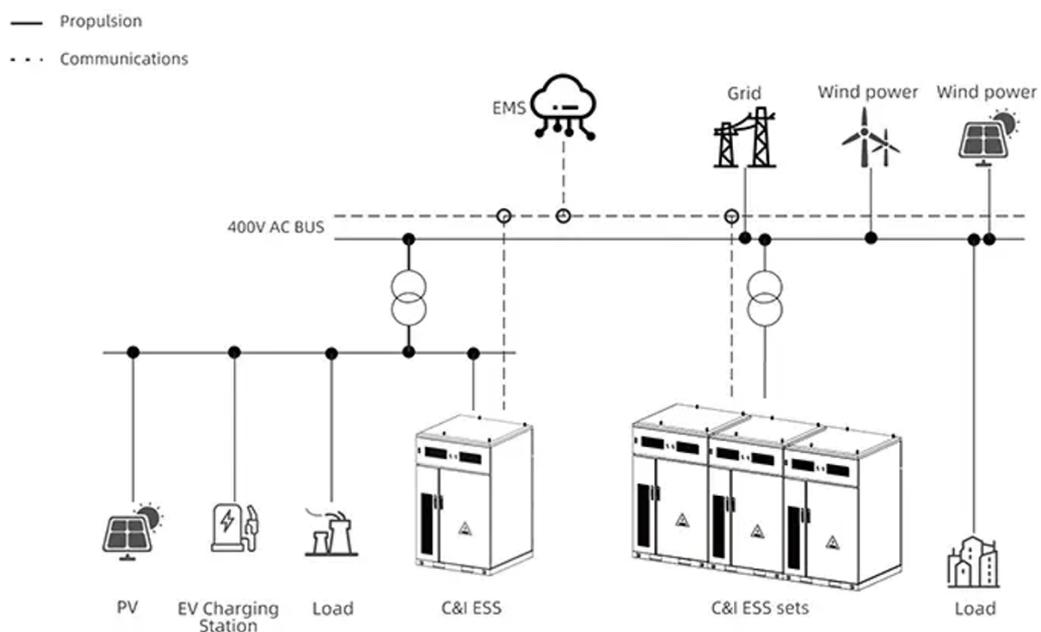


Рисунок 1.2 – Структура установки зберігання електроенергії

Аналізуючи можливості систем керування сонячними електричними станціями (СЕС) вказує на їх велике значення у забезпеченні ефективності та надійності електропостачання. Впровадження таких систем дозволяє оптимізувати використання сонячної енергії та уникнути експорту електроенергії в мережу. Це призводить до підвищення якості енергопостачання та забезпечення надійної роботи СЕС у різних умовах експлуатації на підприємстві. Враховуючи потенціал сучасних технологій у сфері сонячної енергетики, розвиток та впровадження нових підходів до накопичення, збереження та розподіл електричної енергії має беззаперечне значення [5].

Призначення систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання енергії є ключовим елементом в організації надійного та ефективного енергозабезпечення підприємства. Такі системи забезпечують стабільність роботи, оптимальне використання генерованої енергії, підвищення енергонезалежності та підтримання безперервності технологічних процесів.

Функціонування системи керування охоплює широкий спектр режимів та алгоритмів, спрямованих на координацію роботи сонячної генерації, накопичувачів енергії та навантажень підприємства. До основних призначень таких систем належать:

- Оптимізація використання енергії - система керування забезпечує розподіл енергії між внутрішніми споживачами, мережею та накопичувачем з урахуванням поточних потреб і доступної генерації. Це дозволяє мінімізувати споживання електроенергії з мережі та максимізувати частку власного споживання.
- Контроль та керування зарядом/розрядом УЗЕ - система визначає оптимальні умови та моменти заряджання і розряджання накопичувача, підтримуючи його ресурс, забезпечуючи рівномірне навантаження та балансування енергетичних потоків.
- Забезпечення режиму резервного живлення - у разі зникнення напруги в мережі, система автоматично переходить у режим автономної роботи, забезпечуючи живлення критичних навантажень та безпеку технологічних процесів.
- Обмеження експорту електроенергії (Zero Export) - система керування забезпечує дотримання вимог оператора системи розподілу щодо заборони або обмеження експорту електроенергії в мережу, динамічно регулюючи потужність інверторів.

- Забезпечення стабільності та якості електроенергії - підтримка стабільної частоти, напруги та допустимих параметрів електропостачання відповідно до стандартів і вимог мережі.
- Моніторинг та діагностика - безперервний контроль параметрів роботи СЕС та УЗЕ, фіксація подій, діагностика несправностей та передача даних на SCADA або енергоменеджмент-платформи підприємства.
- Підвищення енергонезалежності та економічної ефективності - коректна робота системи керування дозволяє підприємству знизити витрати на електроенергію, уникати пікових тарифів, працювати автономно та планувати енергоспоживання.

Отже, системи керування сонячними електростанціями з установками зберігання енергії відіграють ключову роль у забезпеченні збалансованої, ефективної та надійної роботи енергетичної інфраструктури підприємства. Використання сучасних методів керування та обробки даних дає змогу досягти оптимального розподілу енергопотоків, підвищити частку власного споживання, зменшити залежність від зовнішньої мережі та забезпечити безперервність роботи критичних навантажень. Такий підхід відповідає сучасним вимогам енергетичної безпеки й сталого розвитку та становить фундамент для подальшої модернізації енергетичних систем підприємств.

1.2 Основні проблеми та виклики для систем керування мережевими сонячними електростанціями з накопичувачами енергії

Проведений вище аналіз можливостей функціонування мережесонячних електростанцій у поєднанні з установками зберігання енергії за допомогою автоматизованої систем керування показав, що ключові технічні виклики, характерні для систем цього типу, полягають у наступному:

1. Мінливість генерації сонячної енергії та стохастичний характер навантаження споживача. Сонячна генерація є непостійною та залежить від зовнішніх природних чинників (інсоляція, температура, сезонність, хмарність). Одночасно споживання електроенергії на підприємстві змінюється відповідно до виробничих циклів та технологічних процесів. Це зумовлює потребу у джерелі резервного живлення або системах накопичення енергії, здатних підтримувати баланс між виробленою та спожитою енергією в умовах нестабільної генерації.

2. Залежність мережевих СЕС від зовнішньої електричної мережі. Мережеві сонячні електростанції потребують постійної взаємодії з електромережею для синхронізації напруги та частоти. За відсутності напруги у мережі або при аварійних ситуаціях стандартні мережеві інвертори зупиняють генерацію. Це вимагає впровадження систем керування та комутації, здатних забезпечити переходи між мережевим та автономним режимами та підтримку живлення критичних споживачів.

3. Складність інтеграції PV-BESS у промислову інфраструктуру. Інтеграція системи сонячної генерації та накопичувачів вимагає узгодження між силовим обладнанням, інверторами, контролерами, релейним захистом, системами автоматики та SCADA/EMS. Це підвищує технічну складність проєкту, потребує кваліфікованого інженерного супроводу та ретельного етапу проєктування.

4. Високі капітальні витрати на впровадження. Створення комплексної системи СЕС із накопичувачем енергії потребує значних інвестицій у генераційне обладнання, інверторні системи, системи керування та автоматизації. Тому важливим аспектом проєкту є економічне обґрунтування, оптимальний підбір обладнання та вибір режимів експлуатації.

5. Забезпечення якості електроенергії при паралельній роботі з мережею. При роботі сонячної електростанції та системи зберігання енергії у

паралелі з зовнішньою мережею необхідно підтримувати нормативні параметри якості електроенергії, зокрема рівень напруги, частоти та гармонічних складових. Поява вищих гармонік, коливання напруги або частоти можуть негативно впливати на роботу електротехнічного обладнання підприємства, викликати його перегрівання, зниження ресурсу або аварійні відключення. Система керування повинна забезпечувати фільтрацію перешкод, коректне регулювання параметрів інверторів та узгодження режимів роботи з оператором системи розподілу для гарантування стабільних та нормативних характеристик електропостачання.

6. Необхідність ефективного балансування генерації та споживання. Системи керування повинні забезпечувати оптимальний розподіл електроенергії між внутрішніми споживачами, накопичувачами та мережею, враховуючи поточні та прогнозовані енергетичні потреби. Неефективний розподіл може призводити до перевантаження обладнання, втрат енергії та підвищення експлуатаційних витрат.

7. Деградація та термокерування акумуляторних систем. Акумуляторні батареї схильні до старіння та втрати ємності, що залежить від глибини циклів, температури, режимів роботи та якості елементів. Коректна система термоконтролю та управління зарядом-розрядом є критично важливою для продовження терміну служби батарей та забезпечення їхньої безпечної експлуатації.

8. Забезпечення безперервного переходу між мережевим та острівним режимами. У разі відключення основного живлення система повинна оперативно перемикатися на автономний режим із забезпеченням живлення критичних навантажень. Реалізація «безшовного» переходу потребує складної логіки керування, відповідного комутаційного обладнання та стабільної синхронізації.

На рисунку 1.3 зображено блок-діаграма основних проблем та викликів у процесі впровадження автоматизованих систем керування

мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії.



Рисунок 1.3 – Блок-діаграма основних проблем і викликів у процесі впровадження систем автоматизованого керування.

Окрім технічних аспектів проектування та експлуатації мережевих сонячних електростанцій із системами накопичення енергії, важливим фактором залишаються низка системних і організаційних викликів, що суттєво впливають на ефективність реалізації таких проєктів.

В умовах активної цифровізації енергетичної галузі особливої актуальності набувають питання інформаційної безпеки. Використання хмарних платформ, систем телеметрії та віддаленого доступу для керування СЕС і УЗЕ супроводжується підвищеними вимогами до кіберзахисту, оскільки недоліки у цьому напрямі можуть призвести до порушень у роботі енергетичного комплексу.

Додатковою складністю є нормативно-правові та бюрократичні бар'єри. Отримання технічних умов, погодження проєктних рішень, а також

введення об'єкта в експлуатацію часто потребують значних часових та адміністративних ресурсів, що впливає на загальні терміни реалізації проєкту та його фінансові показники.

Крім того, недостатня визначеність у чинній нормативній базі, зокрема щодо правил балансування, тарифної політики, надання допоміжних послуг (таких як регулювання частоти) та механізмів енергетичного арбітражу, створює додаткові ризики для інвесторів та операторів СЕС з накопичувачами. Така ситуація ускладнює стратегічне планування та формування довгострокових моделей роботи енергетичних систем цього типу.

1.3 Огляд існуючих апаратно-програмних рішень систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії.

У зв'язку зі зростанням ролі відновлюваної генерації та переходом підприємств до концепцій Smart Grid, Active Consumer, Microgrid, на ринку сформувались різні підходи до реалізації енергоменеджменту та автоматизації. Сучасні системи керування сонячними електростанціями з установками зберігання енергії мають високу варіативність реалізації. Це зумовлено різним призначенням таких об'єктів, специфікою підключення до електромережі, а також вимогами нормативних документів щодо режиму нульового експорту, резервного живлення та інтеграції додаткових джерел енергії.

Під час впровадженні систем керування критично важливим є визначення функціональної архітектури, типу обладнання та алгоритмів взаємодії між підсистемами. Вибір технічного рішення безпосередньо впливає на енергоефективність, надійність та можливість подальшого розширення енергокомплексу підприємств.

Існуючі типи систем керування сонячною електричною станцією з УЗЕ можна класифікувати за низкою ключових характеристик, що визначають їхню архітектуру, функціональність, режими роботи та рівень інтеграції з іншими елементами енергосистеми підприємства. Така класифікація дозволяє здійснити правильний вибір системи з урахуванням вимог об'єкта, режимів експлуатації, надійності електропостачання та економічної доцільності.

1) За режимом роботи енергосистеми:

Системи керування класифікуються залежно від сценаріїв взаємодії СЕС, УЗЕ та зовнішньої електромережі:

Мережеві (Grid-Tied) системи функціонують паралельно з електричною мережею та призначені для зниження споживання електроенергії з зовнішніх джерел. Вони здатні підтримувати режим нульового експорту, що є особливо важливим для промислових підприємств та об'єктів із регуляторними обмеженнями.

Автономні (Off-Grid) системи працюють без підключення до зовнішньої мережі та забезпечують енергоживлення лише за рахунок власної генерації та накопичувачів енергії. Такі рішення застосовуються там, де відсутнє мережеве електропостачання або виникає потреба у повній енергетичній незалежності, з фокусом на живлення критичних навантажень.

Найбільш універсальним варіантом є гібридні (Hybrid / Microgrid-Ready) системи, які об'єднують можливості двох попередніх підходів. Вони дозволяють працювати як у паралелі з мережею, так і в автономному режимі, забезпечують взаємодію з генеруючим обладнанням та надають можливість гнучкої оптимізації енергобалансу підприємства. Завдяки цьому гібридні системи можуть адаптуватися до різних умов експлуатації та забезпечувати безперервність електропостачання критичних споживачів.

2) За функціональними можливостями:

Рівень інтелектуальних функцій системи керування визначає її здатність забезпечувати стабільну, безпечну та енергоефективну роботу сонячної електростанції з установками зберігання енергії. Такі системи поділяють на базові та розширені:

- Базові рішення зазвичай забезпечують стандартний набір можливостей для підтримання роботи фотоелектричних інверторів та основних режимів енергосистеми. До їхнього функціоналу належать дистанційний моніторинг і базовий контроль роботи інверторів, реалізація алгоритмів нульового експорту енергії в мережу та виконання аварійних функцій захисту. Такі системи можуть обмежувати генерацію у відповідь на зміну навантаження, проте їхні можливості управління енергобалансом та роботою накопичувачів, як правило, обмежені.

- Розширені системи управління (EMS) забезпечують значно ширший набір інтелектуальних функцій і орієнтовані на комплексні енергетичні рішення підприємств. Вони дозволяють оптимізувати процеси заряджання та розряджання УЗЕ з урахуванням графіків споживання та генерації, а також визначати пріоритетність навантажень для забезпечення безперервного живлення критично важливих споживачів. До їхнього функціоналу входить реалізація режимів peak shaving та керування енергоспоживанням відповідно до тарифних зон (ToU-управління), що дає можливість знижувати пікові навантаження та оптимізувати витрати на електроенергію.

Серед інших ключових можливостей розширених автоматизованих систем керування мережевою архітектурою — прогнозування генерації та споживання за допомогою історичних даних, моделей навантаження та погодних параметрів, а також інтеграція з генеруючих об та підтримка режимів мікромережі. Це забезпечує підвищений рівень автономності енергосистеми, безперервність живлення та високу стійкість до зовнішніх збурень електромережі.

3) За архітектурою системи керування

За архітектурою побудови системи керування СЕС з УЗЕ можуть бути централізованими або децентралізованими.

Централізовані системи керування передбачають використання одного основного контролера, який виконує всі ключові функції: координує роботу інверторів, системи накопичення енергії, генеруючих установок та комутаційного обладнання. Такий підхід забезпечує просту структуру управління, зменшує кількість апаратних компонентів і, відповідно, вартість впровадження. Однак централізована архітектура має обмежені можливості масштабування та модернізації, оскільки розширення системи або зміна режимів роботи можуть вимагати значного доопрацювання програмної логіки або навіть заміни контролера.

На відміну від цього, децентралізовані системи керування базуються на використанні кількох спеціалізованих контролерів, що виконують різні функції: інвертори, контролери УЗЕ, контролери ДГУ та програмовані логічні контролери (PLC) обмінюються даними між собою та працюють у єдиному інформаційному полі. Така архітектура забезпечує високу гнучкість, надійність і можливість адаптації до складних енергетичних систем, зокрема мікромереж з декількома джерелами живлення. Недоліком є більші вимоги до інтеграції обладнання та вища вартість реалізації, що пов'язано з використанням додаткових модулів і складнішою логікою керування.

4) З можливістю інтеграції з додатковими джерелами генерації

Системи керування сонячними електростанціями з накопичувачами енергії можуть відрізнятися за здатністю взаємодіяти з іншими джерелами електричної енергії, такими як дизель-генераторні установки або когенераційні модулі. Цей фактор визначає рівень автономності енергосистеми, її здатність працювати у відокремленому режимі та забезпечувати резервування критичних споживачів.

Системи без інтеграції з резервними джерелами реалізують роботу лише на основі фотоелектричної генерації та акумуляторних систем зберігання енергії. У такому випадку баланс енергії забезпечується шляхом прямого використання сонячної енергії та накопичення її надлишків у батареях для подальшого споживання. Подібні рішення мають простішу структуру і нижчі інвестиційні витрати, проте їхня здатність забезпечувати живлення в умовах відсутності електромережі обмежена тривалістю автономної роботи УЗЕ та поточними умовами генерації.

Системи з інтеграцією резервних джерел генерації характеризуються значно вищим рівнем гнучкості та надійності. Вони дозволяють використовувати дизель-генератори або когенераційні установки як додаткові джерела електроенергії у випадку нестачі сонячної генерації або в аварійних ситуаціях. Така конфігурація забезпечує можливість роботи у складі мікромережі, підтримання частоти та напруги в ізольованому режимі, а також реалізацію функції black-start, коли система може самостійно відновити живлення після повного знеструмлення.

Завдяки цьому такі системи здатні підтримувати безперервне живлення критично важливих споживачів, забезпечуючи високу енергетичну стійкість підприємства. Водночас їх впровадження потребує складніших алгоритмів керування, узгодження протоколів комунікації між обладнанням та додаткових капітальних витрат.

Розглянемо рисунок 1.4 автоматизовану систему керування мережевою архітектурою на базі гібридних інверторів з установками зберігання електроенергії.[6]

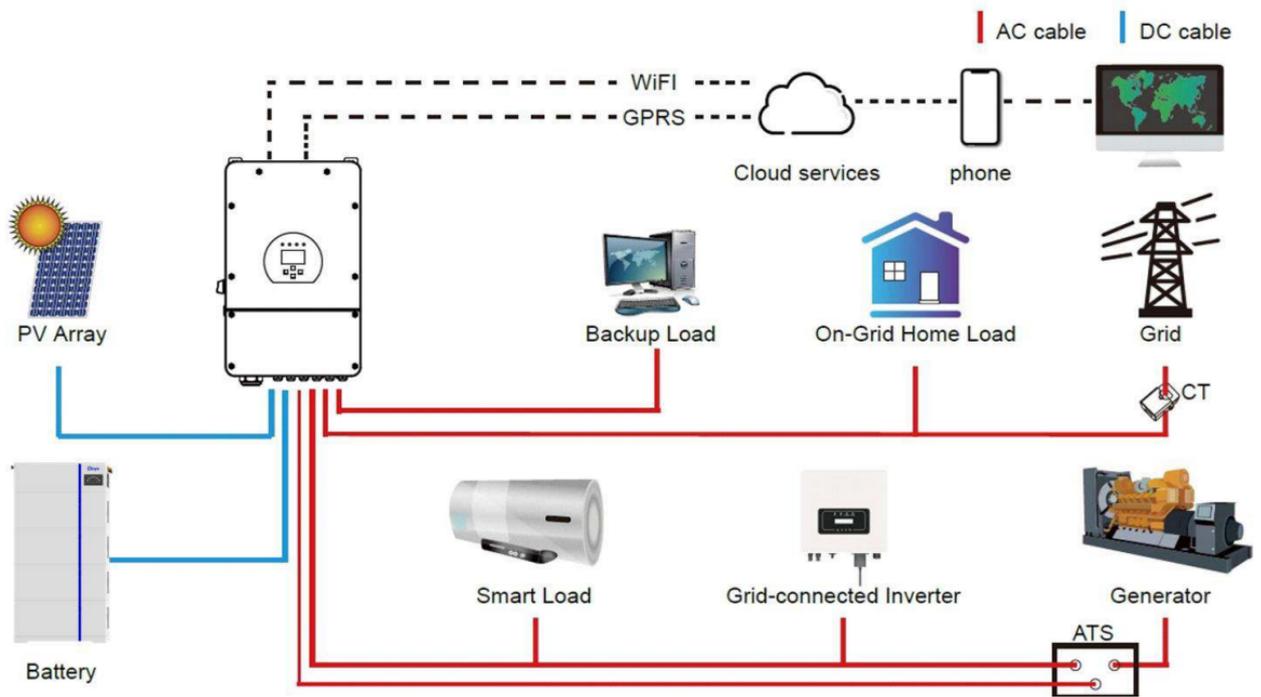


Рисунок 1.4 – Автоматизована система керування мережевою архітектурою на базі гібридних інверторів з установками зберігання електроенергії.

Одним із найбільш поширених підходів до побудови систем керування сонячними електростанціями з установками зберігання енергії є використання гібридних інверторів. Такі пристрої поєднують функції мережевого інвертора та перетворювача для керування акумуляторними батареями, а також забезпечують базовий алгоритм енергоменеджменту. Гібридні інвертори є комплексними рішеннями «все-в-одному», що дозволяє спростити структуру системи, зменшити кількість обладнання та скоротити вартість впровадження.

До основних функцій гібридних інверторів належать:

- перетворення енергії від фотоелектричних модулів у змінний струм;
- заряджання та розряджання акумуляторної батареї із контролем стану заряду (SOC);
- забезпечення резервного живлення в разі відсутності напруги в мережі;

- реалізація режимів самоспоживання (self-consumption) та обмеження експорту в мережу (zero-export/limited-export);
- інтеграція з енергомережами низької та середньої потужності.

Завдяки вбудованим алгоритмам керування енергопотоками, гібридні інвертори дозволяють швидко розгорнути систему з накопичувачем без необхідності застосування складних SCADA-систем та додаткових контролерів. Це робить їх доцільними для побутових і малих комерційних СЕС, а також для об'єктів, де критичною є вартість та швидкість реалізації.

Разом із тим, застосування гібридних інверторів має низку обмежень, що ускладнює їх використання в промислових енергетичних комплексах, а саме:

- обмежена кількість сценаріїв енергоменеджменту та неможливість гнучкої логічної оптимізації;
- у більшості моделей - недостатня масштабованість та складність інтеграції з іншими джерелами генерації (дизель-генераторами, когенераційними установками);
- обмежені можливості роботи в складі мікромережі та обмеження щодо формування власної синусоїди при живленні критичних споживачів;
- залежність від вбудованої логіки виробника та відсутність можливості адаптації під специфічні технологічні процеси підприємства;
- як правило, відсутність повноцінних функцій SCADA та промислових протоколів (OPC UA, IEC-104, IEC-61850 тощо).

У таблиці 1.1 наведено порівняння характеристик системи на базі гібридних інверторів та архітектури з окремими установками зберігання енергії (УЗЕ), що реалізовані із застосуванням промислового PCS-інвертора та системи EMS. Аналіз охоплює ключові технічні, експлуатаційні та економічні параметри систем, що дозволяє обґрунтувати вибір архітектури для промислової СЕС з високими вимогами до керування енергетичними потоками та надійності.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик систем на базі гібридних інверторів та систем з окремими установками зберігання енергії (УЗЕ), побудованих за принципом мережевої архітектури з використанням PCS-інвертора.

Параметр	УЗЕ	Гібридний інвертор + модульна АКБ
Кількість циклів	До 10000 (DoD 100%) -25..+45°C	6000 циклів (DoD 90%) 25±2°C
Деградація	Рівномірна, контрольована, низька	Нерівномірна, неконтрольована, висока
Ефективність циклу (RTE)	91.3%	84-85%
Пожежна безпека	Висока	Низька
Термін експлуатації	15 років	5–8 років
Гарантія	До 10 років системна гарантія	Часто 5 років на інвертор та акумулятори
Вартість за кВт·год циклу	Нижча в довгостроковій перспективі	Вища через менший ресурс
EMC	Class B	Class A
Безпека	Сертифікована, вбудовані системи захисту, IP66, C5 антикорозія	Залежить від зовнішніх умов, часто IP20/IP21, ризику короткого замикання
Охолодження	Гібридне охолодження забезпечує різницю 2.2 °C між елементами	Без активного охолодження – перегрів до 35°C+, що прискорює деградацію

Отже, гібридні інвертори є ефективним та економічно доцільним рішенням для малих і середніх об'єктів, де вимоги до кастомізації та інтеграції є помірними. Однак для промислових підприємств, мікромереж та об'єктів з розподіленою генерацією більш доцільним є використання спеціалізованих систем енергоменеджменту (EMS) на базі промислових контролерів та SCADA-платформ, які забезпечують розширені можливості налаштування, масштабування та інтеграції.

Розглянемо наступне існуюче апаратно-програмне рішення автоматизованої систем керування мережевою архітектурою на базі промислової EMS-платформи (Encombi) з інтегрованими установками зберігання електроенергії на рисунку 1.5. [7]

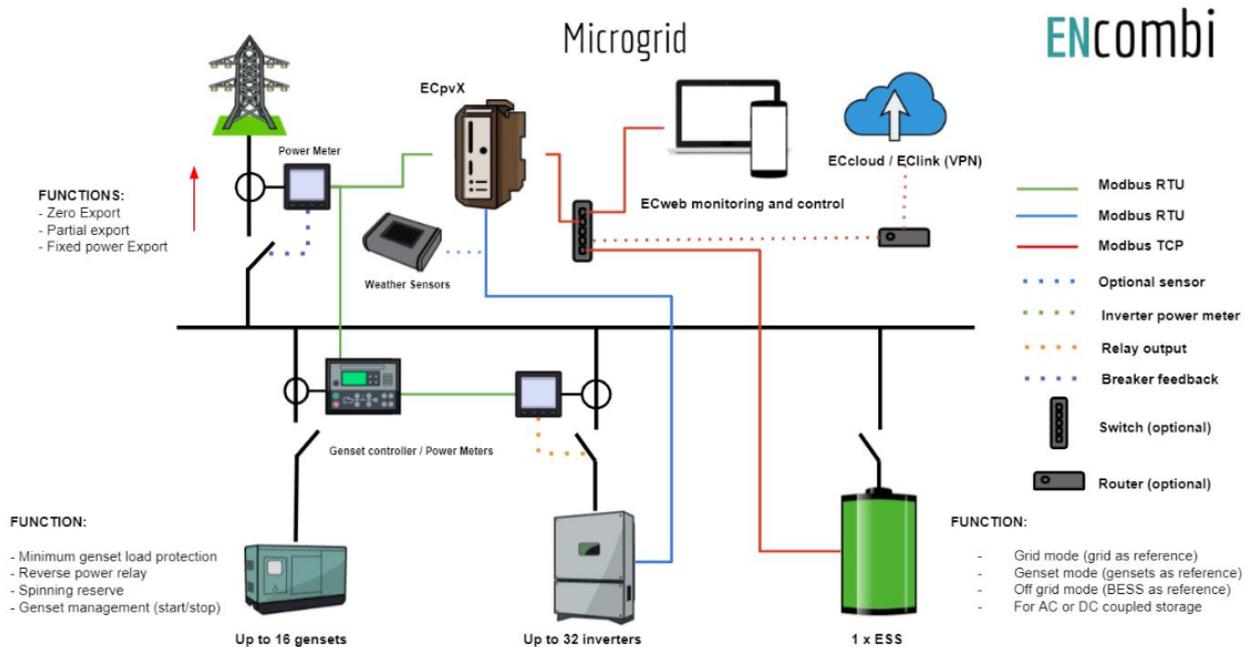


Рисунок 1.5 – Автоматизована система керування мережевою архітектурою на базі промислової EMS-платформи з установками зберігання електроенергії.

Промислові системи енергоменеджменту (EMS, Energy Management System) являють собою комплекс апаратно-програмних засобів, призначених для централізованого моніторингу, аналізу та керування енергетичними потоками на об'єктах з розподіленою генерацією та системами накопичення енергії. Такі системи забезпечують координацію роботи фотоелектричних установок, акумуляторних станцій, дизель-генераторних установок, мережевого живлення та критичних навантажень у рамках єдиної архітектури управління.

Промислові EMS-платформи широко застосовуються на великих підприємствах, критичній інфраструктурі, у мікромережах та на об'єктах, де необхідна висока надійність, автоматизація, можливість масштабування та інтеграція різнорідного обладнання.

Основні функції промислових EMS:

- інтегроване керування потоками енергії між СЕС, УЗЕ, мережею та резервними джерелами;
- балансування генерації та споживання з урахуванням прогнозу навантаження і погоди;
- підтримка режимів zero-export, peak shaving, time-of-use;
- резервування та автоматичний перехід у режим мікромережі (microgrid / island mode);
- функції black-start та синхронізація з мережею/ДГУ;
- моніторинг SOC/SOH батарей, робота з BMS та PCS;
- інтеграція з промисловими протоколами (Modbus, OPC UA, IEC-104/61850, MQTT);
- аварійна діагностика, захист та журналювання подій/

Однією з ключових переваг промислових EMS є гнучкість конфігурації та можливість адаптації алгоритмів управління під специфіку об'єкта. Система може реалізовувати складні сценарії, зокрема прогнозування навантаження, прогноз генерації на основі метеоданих, інтелектуальне перемикання режимів роботи джерел електроенергії, а також оптимізацію використання накопичувачів залежно від тарифної зони або технічних обмежень мережі.

Промислові EMS забезпечують високу надійність, резервування та роботу в режимі мікромережі з функцією black-start, що забезпечує запуск без зовнішнього живлення. Це критично для підприємств із безперервними процесами та об'єктів критичної інфраструктури.

Основним недоліком є висока вартість впровадження. Система потребує окремого промислового контролера, комунікаційних модулів, багатофункціональних лічильників, трансформаторів струму, серверної інфраструктури на базі промислового контролера, спеціалізованого програмного забезпечення. Додатково необхідне обладнання для комутації, мережевого обміну даними, паралельної роботи з PCS-інверторами й BMS-системами.

Варто враховувати й обмеження щодо її сумісності зі складними схемами електропостачання, зокрема з декількома вводами та секційними вимикачами, що унеможлиблює стандартне використання EMS у таких випадках.

Таким чином, подібна архітектура є доцільним і ефективним рішенням для підприємств з малими та середніми встановленими потужностями, але з простою та одновводною схемою зовнішнього електропостачання, де необхідне базове керування енергопотоками та інтеграція системи накопичення енергії. У таких випадках впровадження промислової EMS дозволяє забезпечити керування СЕС та УЗЕ без потреби у складних мікромережевих функціях, зберігаючи при цьому високу надійність енергопостачання та гнучкість у майбутній модернізації.

Водночас важливо зазначити, що така система не забезпечує «безшовне» перемикання між режимами роботи, і в момент переходу з мережевого режиму на автономний або назад можливі короткочасні перерви живлення. Тому її застосування обмежене об'єктами, де відсутні особливо критичні навантаження, чутливі до миттєвих просідань або переривань живлення.

Розглянемо наступне існуюче апаратно-програмне рішення автоматизованої систем керування мережевою архітектурою на базі SCADA-системи з інтегрованими установками зберігання електроенергії на рисунку 1.6. [8]

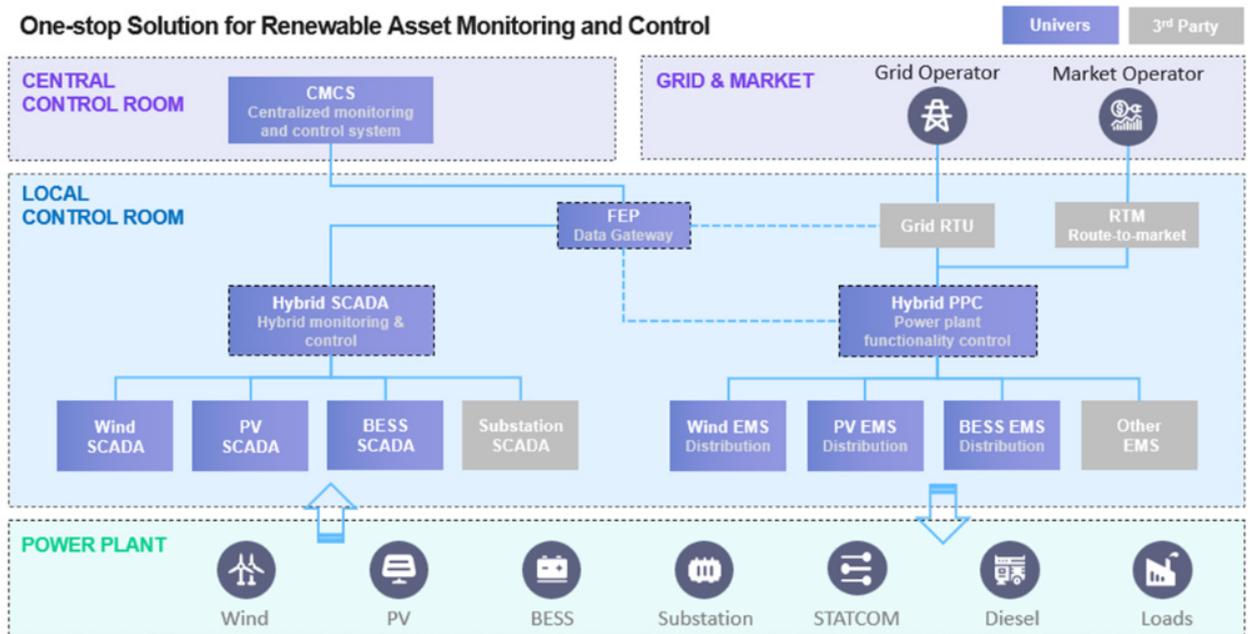


Рисунок 1.6 – Автоматизована система керування мережевою архітектурою на базі промислової SCADA-системи з установками зберігання електроенергії.

SCADA (аббр. від англ. Supervisory Control And Data Acquisition — моніторинг та збір даних) - складний програмний комплекс призначений для збору, обробки та зберігання інформації в режимі реального часу. SCADA розробляється індивідуально під кожен окремий об'єкт, з притаманними тільки йому особливостями. Об'єктом в даному випадку може виступати, як окрема машина (верстат), лінія, цех, підприємство, так і група підприємств. [9].

Основною функцією SCADA є безперервний моніторинг параметрів генерації та споживання електроенергії у реальному часі. Система відображає напруги, струми, потужність, стан заряду акумуляторних батарей (SOC), температуру елементів, стан інверторів і комутаційного обладнання. Завдяки цьому забезпечується оперативне реагування на будь-які відхилення та аварійні ситуації. Крім моніторингу, SCADA надає можливість дистанційного керування режимами роботи обладнання, комутаційними апаратами, PCS-інверторами, а також формує архіви подій і графіки,

необхідні для подальшого аналізу та оптимізації роботи енергетичного комплексу.

Система підтримує широкий набір промислових протоколів зв'язку — Modbus TCP/RTU, OPC UA, IEC-104, IEC-61850, MQTT — що забезпечує сумісність із обладнанням різних виробників та інтеграцію з іншими рівнями автоматизації, зокрема системами АСКОЕ, ERP чи хмарними сервісами моніторингу. На основі отриманих даних SCADA може передавати інформацію до системи енергоменеджменту EMS або диспетчерського пункту, де відбувається аналіз і прийняття рішень щодо балансування генерації, навантаження чи використання накопичувачів.

До основних переваг SCADA-систем належать централізований контроль за всіма елементами енергосистеми, підвищення надійності та безпеки роботи станції, а також можливість швидкого виявлення і локалізації несправностей. Використання графічних мнемосхем і звітів спрощує роботу оператора, забезпечуючи наочне відображення стану обладнання та енергетичних потоків. Накопичення історичних даних дає змогу проводити енергоаудит, оцінювати ефективність роботи СЕС і УЗЕ, а також прогнозувати споживання й генерацію.

Разом із тим SCADA має певні недоліки. Її впровадження потребує значних інвестицій у програмне забезпечення, серверну інфраструктуру та комунікаційні засоби. Система потребує стабільного каналу зв'язку та належної підтримки з боку кваліфікованого персоналу. У складних архітектурах з великою кількістю вузлів інтеграція SCADA вимагає ретельного проєктування та налаштування взаємодії між усіма компонентами.

У промисловій практиці для керування СЕС із накопичувачами енергії застосовують SCADA-платформи Siemens WinCC, Schneider EcoStruxure Power SCADA та ComAp, які забезпечують моніторинг, аналітику, формування звітів і інтеграцію з системами EMS.

Таблиця 1.2 – Порівняння гібридних інверторів, промислових EMS та SCADA-систем.

Параметр / Функція	Гібридні інвертори (all-in-one)	Промислова EMS-платформа (Encombi та аналоги)	SCADA-система (WinCC, EcoStruxure, ComAp)
Основне призначення	Базове керування СЕС та АКБ у межах комплектного інвертора	Оптимізація енергопотоків та комплексне керування СЕС+УЗЕ+ДГУ	Моніторинг, збирання даних, диспетчеризації
Рівень інтелектуального управління	Низький / середній	Високий (динамічні алгоритми енергобалансу)	Середній (керування часткове, залежить від конфігурації)
Режими роботи	Grid-tied, резервне живлення, zero-export	Microgrid, island mode, peak shaving, ToU, zero-export, black-start	Залежить від підключених контролерів; microgrid – через сторонню логіку
Керування УЗЕ	Обмежене, фіксована логіка виробника	Гнучке: charge/discharge, SOC/SOH, стратегічне планування	Моніторинг + часткове керування через PCS/PLC
Підтримка ДГУ/когенерації	Обмежена або відсутня	Повна інтеграція (AGC, синхронізація, black-start)	Через контролери, залежить від проекту
Можливість роботи в мікромережі	Частково, із затримками	Повноцінна підтримка мікромережі	Опосередковано, через PLC/EMS
Протоколи комунікації	Переважно Modbus TCP/RTU	Modbus, CAN, OPC UA, IEC-104, IEC-61850, MQTT	Найширший набір промислових протоколів
Гнучкість конфігурації	Низька (залежність від прошивки виробника)	Висока, можливість кастомізації алгоритмів	Дуже висока (індивідуальна розробка)
Розширення та масштабування	Обмежене (мала кількість сценаріїв)	Повноцінне масштабування	залежить від SCADA-сервера
Моніторинг в реальному часі	Є, але спрощений	Інтегрований, з розширеною аналітикою	Глибокий моніторинг усіх вузлів системи
Black-start	Немає	Є	Є
Вартість впровадження	Низька	Середня / висока	Висока
Сфера застосування	Побутові та малі комерційні СЕС	Промислові об'єкти, мікромережі, складні системи	Великі підприємства, критична інфраструктура.
Основні недоліки	Мала гнучкість, обмежена інтеграція, слабе масштабування	Висока вартість, складність інтеграції	Довгий час впровадження, потреба у кваліфікації

Порівнюючи доступні підходи до керування сонячними електростанціями з установками зберігання енергії показало, що локальні засоби автоматизації - SCADA, контролери інверторів або гібридні інвертори - не забезпечують необхідного рівня гнучкості, масштабованості та стабільності для роботи мережевої СЕС в умовах нульового експорту та багатовузлової енергетичної архітектури. Їхні обмеження стосуються як алгоритмів балансування енергопотоків, так і можливостей інтеграції додаткових джерел, систем резервування та динамічного прогнозування.

Промислова EMS-платформа є оптимальним рішенням, оскільки підтримує комплексне керування СЕС, УЗЕ, генераторами та навантаженнями в реальному часі, забезпечує точне дотримання режиму нульового експорту та дозволяє реалізувати індивідуальні логіки енергоменеджменту. Вона має розширені засоби комунікації, діагностики та кіберзахисту, а також підтримує масштабування - від окремої станції до повноцінної мікромережі.

Таким чином, вибір промислової EMS обґрунтований її функціональністю, надійністю та здатністю забезпечити стабільну, керовану та ефективну роботу мережевої сонячної електростанції з інтегрованими установками зберігання енергії. Це робить EMS найдоцільнішою платформою для розробки системи автоматизованого керування.

Отже, проведений аналіз існуючих підходів до класифікації автоматизованими систем керування сонячними електричними станціями з установками зберігання енергії показав, що вибір архітектури та функціонального рівня системи безпосередньо залежить від режимів роботи об'єкта, наявності резервних джерел живлення, вимог до автономності та економічної ефективності. Центральним аспектом сучасних рішень є забезпечення гнучкого енергобалансу, підтримка режиму нульового експорту, інтеграція з дизель-генераторами та забезпечення стабільного живлення критичних навантажень.

Розвиток технологій накопичення енергії та інтелектуальних систем керування зумовлює перехід від простих централізованих схем до багаторівневих децентралізованих рішень із розширеним функціоналом та можливістю роботи в мікромережових режимах. Це створює передумови для впровадження енергоефективних і надійних систем на промислових об'єктах, а також підтверджує актуальність обраного в роботі підходу - використання сучасної EMS-архітектури для інтеграції СЕС та УЗЕ з потенціалом масштабування та адаптації під різні сценарії енергозабезпечення підприємства.

1.4 Перспективи розвитку інтегрованих систем енергетичного менеджменту (EMS) для автоматизованої система керування СЕС та УЗЕ

В умовах швидкого зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), впровадження енерго-активних споживачів та переходу до гнучких мереж з нульовим експортом, інтегровані системи енергетичного менеджменту (Energy Management System, EMS) набувають вирішального значення як ключовий елемент автоматизації керування системами генерації, зберігання й споживання.[10]. Подібні рішення дають змогу досягти високих показників енергоефективності, відповідати стандартам ISO 50001 і забезпечувати стабільну роботу підприємств.

В основі лежать програмні та апаратні модулі, які інтегруються з уже наявною інфраструктурою і пропонують механізми аналітики, моніторингу та управління. В умовах зростаючих цін на енергоносії та посилення норм з енергозбереження, впровадження програми стає не просто модною тенденцією, а нагальною потребою.

Завдяки правильно обраній платформі рішення можна досягати значної економії, підвищуючи продуктивність компанії та знижуючи ризик збоїв або несправностей у роботі обладнання. [11]

Потенціал ринку EMS в Україні величезний. Це зумовлено трьома основними факторами:

Підвищені вимоги до стійкості: Через регулярні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури підприємства вимушені впроваджувати рішення, що забезпечують автономність і безперервність роботи. Використання систем енергоменеджменту (EMS) у комплексі з накопичувачами енергії (BESS) та власною генерацією, зокрема сонячними електростанціями, формує базову платформу енергетичної безпеки та гарантує стійкість виробничих процесів навіть за умов зовнішніх загроз. [12]

Реформа енергетичного сектору та інтеграція з ЄС: Інтеграція України до європейського економічного простору та дотримання вимог European Green Deal зумовлюють необхідність для вітчизняних підприємств впроваджувати сучасні підходи до енергетичного менеджменту та сталого розвитку.[13] Зокрема, українські експортери поступово переходять до використання систем енергоменеджменту відповідно до стандарту ISO 50001, здійснюють заходи із декарбонізації виробництва, а також забезпечують прозоре облікування та звітність щодо вуглецевого сліду продукції. Такі вимоги стають не просто рекомендацією, а фактичним критерієм доступу на європейські ринки, де енергоефективність, низьковуглецевий профіль та цифровізований контроль енергоспоживання визначають конкурентоспроможність підприємства. EMS-системи в цьому контексті перетворюються на ключовий інструмент для відповідності новим регуляторним нормам і мінімізації енергетичних витрат.

Розвиток ВДЕ та зменшення витрат на електроенергію: Розвиток відновлюваних джерел енергії на підприємствах є одним із найефективніших шляхів зниження витрат на електроенергію та підвищення енергетичної автономності. Встановлення сонячних електростанцій, вітрових установок і систем накопичення дозволяє скоротити обсяги закупівлі електроенергії з мережі та захиститися від коливань тарифів. Для максимальної ефективності

ВДЕ інтегруються з системою енергетичного менеджменту (EMS), яка координує роботу локальної генерації, споживачів та накопичувачів енергії. Завдяки цьому підприємство отримує оптимальний розподіл енергопотоків, підвищення частки власного споживання та стабільне зменшення операційних витрат.

Використання прогнозної аналітики та штучного інтелекту. У найближчій перспективі можна очікувати подальшого вдосконалення прогнозних та інтелектуальних модулів EMS. Зокрема, передбачається застосування глибоких нейронних мереж, здатних забезпечувати точність прогнозів на рівні 95–98 %, а також впровадження систем автоматичного формування оптимальних сценаріїв керування на добу, тиждень чи місяць наперед. Все більшого поширення набудуть адаптивні алгоритми, які самостійно враховують особливості конкретного підприємства та поступово вдосконалюють свою роботу. Важливою тенденцією стане інтеграція енергетичних моделей із цифровими двійниками технологічних об'єктів, а також підключення EMS до зовнішніх джерел даних - погодних сервісів, ринкових цінових сигналів і інформації про стан енергомережі.

Інтеграція з ринком електроенергії та послугами системи. У багатьох країнах підприємства, оснащені СЕС та УЗЕ, уже активно беруть участь у таких ринках, отримуючи додатковий дохід. В Україні нормативна база також рухається у цьому напрямку.

EMS здатна забезпечити:

- роботу в режимах енергетичного арбітражу (купівля дешевого нічного ресурсу — використання вдень),
- оптимальну участь у ринку «ніч-день» та на добу наперед,
- надання допоміжних послуг системі (регулювання частоти, резерви потужності, балансування),
- координацію роботи УЗЕ для покриття піків і стабілізації мережі,
- взаємодію з агрегаторами гнучкості.

Для цього EMS повинна мати модулі прогнозування цін, швидкого реагування та точного контролю параметрів генеруючих та накопичувальних установок.

Отже, перспективи розвитку інтегрованих систем енергетичного менеджменту (EMS) визначаються зростанням частки ВДЕ, необхідністю підвищення енергетичної стійкості та вимогами європейських стандартів. EMS поступово трансформуються у інтелектуальні платформи, що поєднують генерацію, накопичення та споживання енергії в єдину керовану систему. Використання прогнозної аналітики, штучного інтелекту та цифрових двійників значно розширює функціональні можливості таких рішень. У перспективі EMS забезпечуватимуть не лише енергоефективність і автономність підприємств, а й їхню участь у ринках гнучкості та системних послуг, формуючи основу майбутніх мікромереж і віртуальних електростанцій. [14]

Висновок: У розділі розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку автоматизованих систем керування сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання енергії. Вони забезпечують ефективну взаємодію між генерацією, накопиченням та споживанням, підвищуючи стабільність і енергоефективність роботи СЕС та УЗЕ. Сучасні вимоги передбачають підтримку гнучких режимів, інтеграцію з накопичувачами та відповідність стандартам енергетичного менеджменту.

Огляд існуючих рішень засвідчив перехід від простих контролерів до комплексних платформ енергоменеджменту. Перспективи розвитку полягають у впровадженні прогнозної аналітики, штучного інтелекту та інтеграції з ринком електроенергії. Таким чином, майбутні системи ставатимуть більш інтелектуальними, гнучкими та здатними забезпечувати максимальну ефективність енергетичних систем підприємств.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Загальна характеристика об'єкта автоматизовано системи керування

У цьому пункті роботи проведемо детальний аналіз споживання електроенергії підприємства з метою визначення оптимальних параметрів автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричними станціями з установками.

Об'єкт знаходиться в Київській області та представляє собою один із найсучасніших сортувальних центрів України. Тут впроваджено високотехнологічну автоматизовану систему, що забезпечує обробку сотень тисяч відправлень щодня як з усієї країни, так і з-за кордону.[15]

Об'єктом автоматизації є мережевий енергетичний комплекс, що включає сонячну фотоелектричну станцію та установку зберігання електроенергії, інтегровані в єдину систему керування енергопотоками. Такий об'єкт функціонує у динамічних умовах роботи електромережі та характеризується змінними режимами генерації, споживання та зарядно-розрядних процесів накопичувача.

Система електроживлення підприємства виконана за двотрансформаторною схемою з секційним вимикачем на шині 0,4 кВ. Трансформатори можуть працювати як паралельно від двох незалежних ліній живлення, так і від однієї секції у разі виходу з ладу або відключення однієї з ліній. У нормальному режимі секційний вимикач знаходиться у розімкненому стані, а навантаження розподіляється між двома трансформаторами. Додатково на об'єкті встановлено сонячну електростанцію та дизель-генераторну установку.

Основною особливістю об'єкта є необхідність забезпечення режиму нульового експорту, оптимізації власного енергоспоживання та можливості резервування живлення критичних споживачів.[16]

Мережева сонячна станція працює як джерело генерованої потужності, що залежить від інсоляції, температури модулів та погодних умов. Її структура включає фотоелектричні модулі, стрингові інвертори, комутаційно-захисну апаратуру та систему збору даних.

У межах проєкту пропонується інтегрувати установку зберігання електроенергії до загальної архітектури мережевої СЕС, що забезпечить розширення функціональних можливостей системи та підвищення її енергоефективності. Впровадження УЗЕ дозволить не лише збільшити частку власного споживання електроенергії за рахунок використання збережених надлишків у пікові години, але й забезпечити роботу об'єкта в режимах обмеження експорту, підтримку параметрів напруги, компенсацію миттєвих коливань потужності та можливість часткового резервування критичних споживачів. Інтеграція накопичувача в систему керування створює умови для формування гнучкої мережевої архітектури з високим рівнем стабільності та прогнозованості енергопотоків.

Для розрахунку оптимальної потужності УЗЕ потрібно визначити навантаження споживачів. Дані про споживання електроенергії підприємства були отримані шляхом моніторингу та вимірювань, здійснених безпосередньо на об'єкті протягом певного періоду часу. В таблиці 2.1 подано показники електроспоживання підприємства за місяцями та в розрізі річного циклу.

Таблиця 2.1 – Дані електроспоживання підприємства за місяцями протягом року.

Місяць	Місячне споживання, кВт*год	Річне споживання, кВт*год
Січень	175 704	1 426 268
Лютий	152 134	
Березень	160 772	
Квітень	100 411	
Травень	88 295	
Червень	81 024	
Липень	84 140	
Серпень	90 373	
Вересень	98 683	
Жовтень	114 264	
Листопад	129 846	
Грудень	150 621	

На основі даних таблиці 2.1 сформовано річну навантажувальну діаграму підприємства, подану на рисунку 2.1. Побудована діаграма дозволяє наочно простежити динаміку споживання електроенергії протягом року та визначити періоди максимальних навантажень.

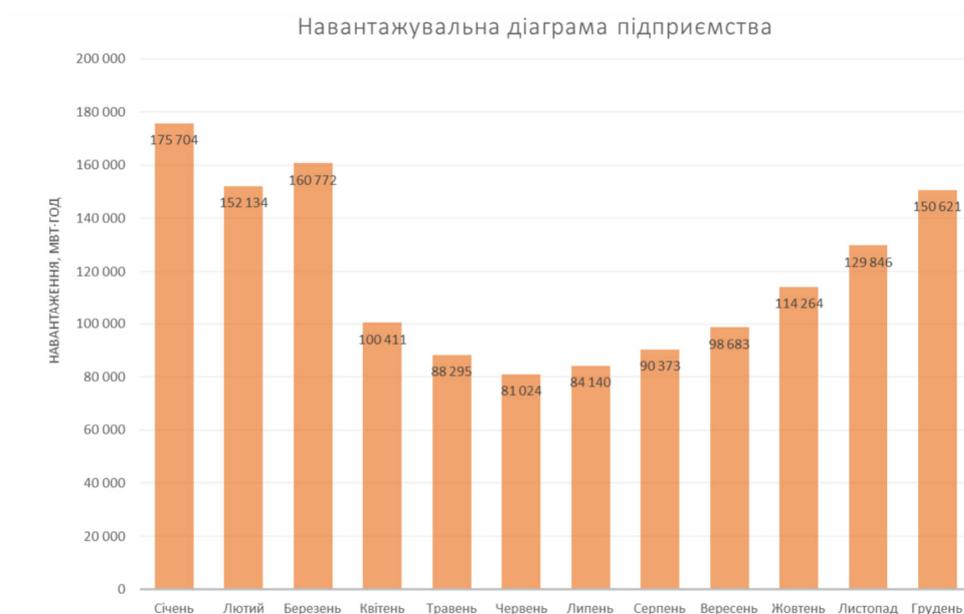


Рисунок 2.1 – Навантажувальна діаграма споживання електроенергії підприємством протягом року.

Навантажувальна діаграма споживання електроенергії підприємством протягом року демонструє стабільний характер електроспоживання з виразними сезонними коливаннями. Підприємство має значний обсяг річного споживання.

З огляду на наведені дані, об'єкт має високий потенціал для впровадження автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії. Наявність великого і відносно рівномірного споживання, а також існуюча власна генерація створюють умови для ефективнішого керування енергопотокami, оптимізації покриття навантаження та зменшення частки електроенергії, отриманої з мережі. Використання автоматизованої системи керування дозволить підвищити енергонезалежність підприємства, забезпечити гнучке переключення режимів роботи, зменшити пікові навантаження на мережу та оптимізувати використання власних ресурсів, включаючи сонячну генерацію та енергонакопичення.

2.2 Визначення цілей, завдань та вимог до системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ

Основною метою побудови системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії є забезпечення максимально ефективного, безпечного та стабільного функціонування енергетичного комплексу в умовах змінних режимів роботи електромережі та локального навантаження. Така система покликана забезпечити оптимальний розподіл енергопотоків між СЕС, УЗЕ, внутрішнім навантаженням підприємства та зовнішньою мережею, підтримки параметрів якості електроенергії та підвищення рівня енергонезалежності об'єкта.

Для досягнення поставленої мети система керування повинна вирішувати низку ключових завдань. Одним із базових завдань є контроль виробітку сонячної електростанції та координація роботи інверторного

обладнання відповідно до поточного стану генерації та обмежень, визначених оператором системи розподілу. Не менш важливою є організація зарядно-розрядних процесів установки зберігання енергії з урахуванням добового графіка споживання, наявних надлишків СЕС, вимог до резервування та технічних обмежень обладнання.

Система має забезпечувати мінімізацію енергетичних втрат, раціональне використання накопиченої енергії, згладжування пікових навантажень та підвищення частки власного споживання від СЕС. Окремим завданням є реалізація механізмів моніторингу, діагностики та протиаварійного захисту об'єкта.[17]

До системи керування висуваються комплексні технічні та експлуатаційні вимоги, які визначаються специфікою інтеграції сонячної електростанції та установки зберігання енергії у спільну мережеву інфраструктуру. Система повинна забезпечувати надійну та безперервну комунікацію між усіма елементами енергетичного комплексу, використовуючи уніфіковані протоколи та інтерфейси, зокрема Modbus TCP/RTU, CAN або Ethernet. Висока швидкість обробки інформації та точність регулювання є обов'язковими характеристиками, оскільки від них залежить стабільність взаємодії між сонячною генерацією, УЗЕ та зовнішньою мережею.

Система керування також повинна забезпечувати можливість детального моніторингу стану обладнання, реєстрацію аварійних подій і відхилень, а також зберігання історичних даних для подальшого аналізу. Серед обов'язкових вимог - підтримка механізмів кіберзахисту, що гарантують безпечний доступ до системи та запобігають несанкціонованим впливам на її роботу.

Проведений аналіз цілей, завдань та вимог до системи керування підкреслює, що побудова мережевої архітектури сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії потребує комплексного підходу до

інтеграції всіх її складових. Ефективна система керування має забезпечувати взаємодію між СЕС, УЗЕ, внутрішнім навантаженням та зовнішньою електромережею, підтримуючи стабільність енергопостачання та досягнення необхідних експлуатаційних показників.

Мета системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ [18]:

- Забезпечення оптимального розподілу енергопотоків між СЕС, УЗЕ, внутрішнім навантаженням та мережею.
- Зниження залежності від центральної мережі та підвищення енергонезалежності підприємства.
- Підвищення частки власного споживання за рахунок використання акумульованої енергії у періоди високих навантажень або низької генерації.
- Мінімізація енергетичних втрат і витрат підприємства через інтелектуальне керування генерацією та накопиченням.
- Енергетична стійкість підприємства у випадках втрати мережевого живлення
- Можливість отримання додаткового доходу за рахунок продажу надлишкової електроенергії у періоди високих тарифів та закупівлі її у часи мінімальних цін.

Отже, правильно реалізована система керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та економічної доцільності роботи підприємства, а також формує основу для подальшого розвитку та масштабування енергетичної інфраструктури.

2.3 Опис режимів роботи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії

Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії функціонує на основі низки режимів роботи, що забезпечують гнучке та стабільне управління енергопотоками всередині підприємства. Система враховує змінність сонячної генерації, добовий характер навантаження, вартість електроенергії у різні періоди, доступність зовнішньої мережі та рівень заряду накопичувача, що дозволяє формувати оптимальні алгоритми роботи комплексу.

Одним із ключових режимів є режим максимального самоспоживання, у якому пріоритет надається власній генерації СЕС для покриття внутрішніх потреб підприємства. Надлишок енергії спрямовується на зарядження установки зберігання енергії, а у разі повного заряду - відбувається автоматичне обмеження генерації відповідно до умов нульового експорту. Ілюстрація цього режиму наведена на рисунку 2.2.

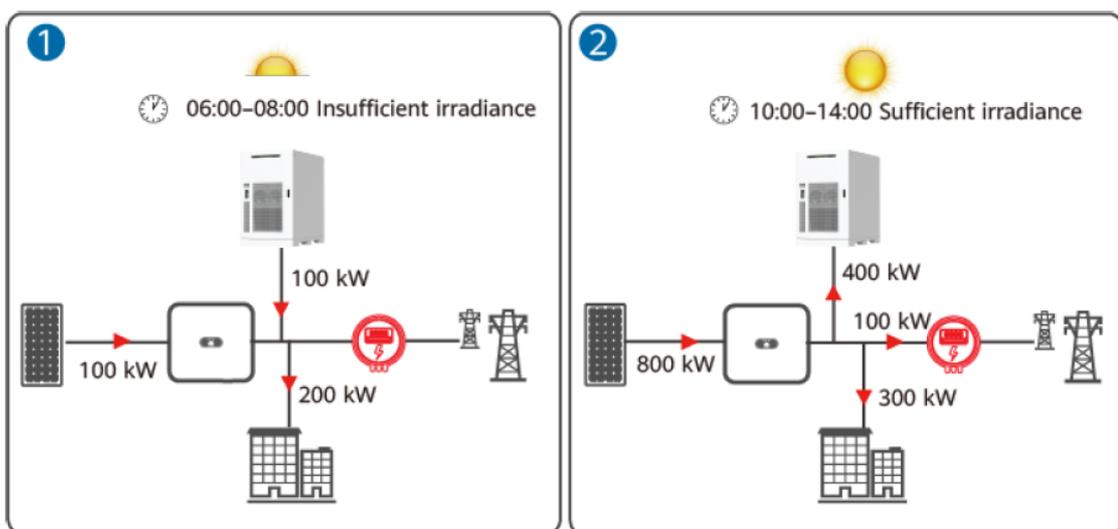


Рисунок 2.2 – Ілюстрація режиму максимальне самопоживання.

У режимі TOU (Time-of-Use) система оптимізує енергетичні потоки з урахуванням тарифних зон доби. Під час дії низьких тарифів накопичувач може заряджатися як від СЕС, так і від електромережі, тоді як у години високих тарифів відбувається розрядження УЗЕ для зменшення витрат підприємства. Даний режим особливо ефективний для об'єктів з диференційованим тарифоутворенням. Приклад роботи цього режиму наведено на рисунку 2.3.[19]

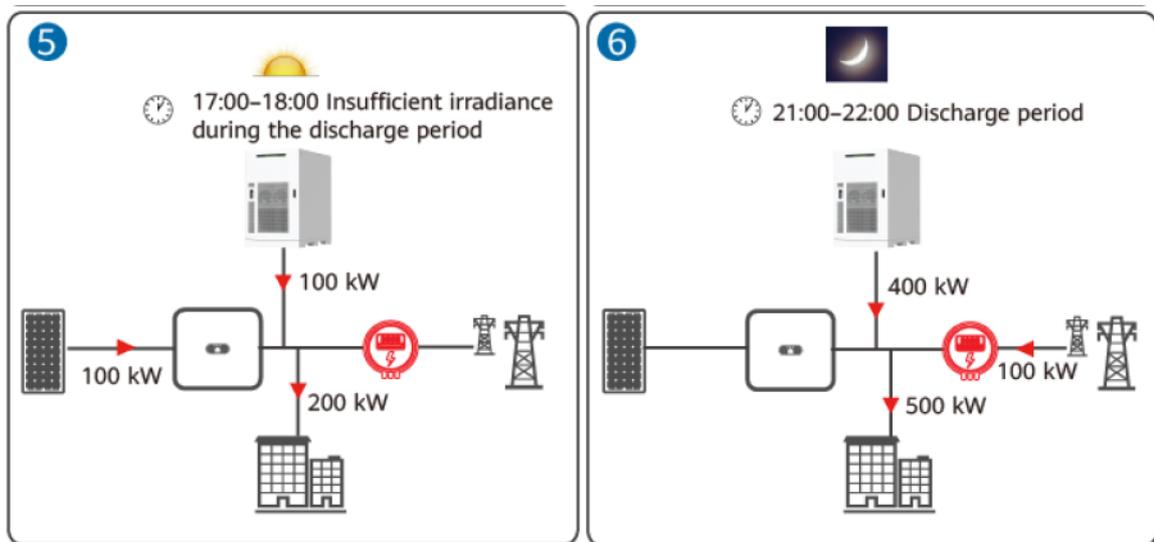


Рисунок 2.3 – Ілюстрація режиму TOU (Час використання).

Для зниження пікових навантажень система застосовує режим Peak-shaving, у якому установка зберігання енергії компенсує короточасні стрибки споживання.[19] Це дозволяє уникнути перевищення договірних потужностей, зменшити навантаження на мережеву інфраструктуру та оптимізувати витрати на електроенергію. Візуалізацію роботи цього режиму наведено на рисунку 2.4.

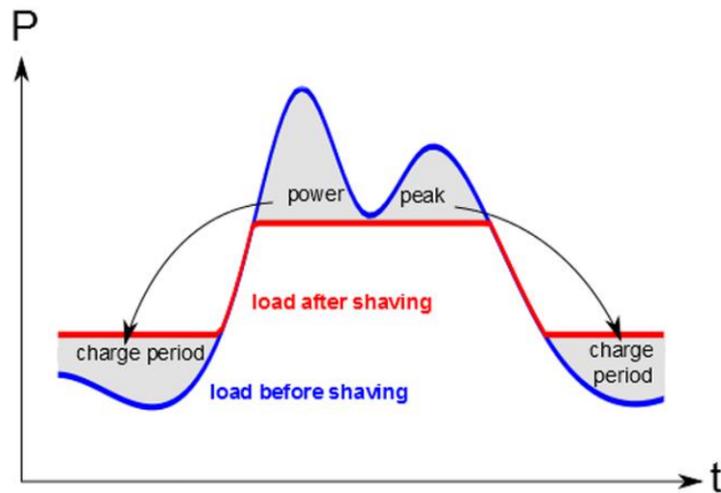


Рисунок 2.4 – Ілюстрація режиму Peak-shaving (Зниження піків)

Важливим аспектом є режим плавного переходу між мережею та автономною роботою, що формує локальну мікромережу підприємства. Система забезпечує автоматичний перехід між on-grid та off-grid режимами, підтримуючи безперебійне живлення критичних споживачів у разі аварійних ситуацій у зовнішній мережі.

Окремим режимом є уникнення реконструкції мережевої інфраструктури підприємства. Завдяки зниженню пікових навантажень та оптимізації внутрішніх енергетичних потоків підприємство може збільшити доступну потужність без необхідності модернізації трансформаторів або прокладання нових кабельних ліній. Це дозволяє зменшити капітальні вкладення та покращити гнучкість роботи енергетичного комплексу.

Для об'єктів, підключених до ринкових платформ, система підтримує режим інтеграції з ринком «на добу наперед» (РДН).[23] Він забезпечує можливість продажу надлишкової електроенергії у періоди високих цін та зарядження УЗЕ у години низьких тарифів, що відкриває додаткові економічні вигоди для підприємства. Характер зміни цін протягом доби представлено на рисунку 2.5. У режимі автономного використання підприємство може забезпечувати безперервне живлення критичних технологічних процесів, незалежно від зовнішнього стану мережі.

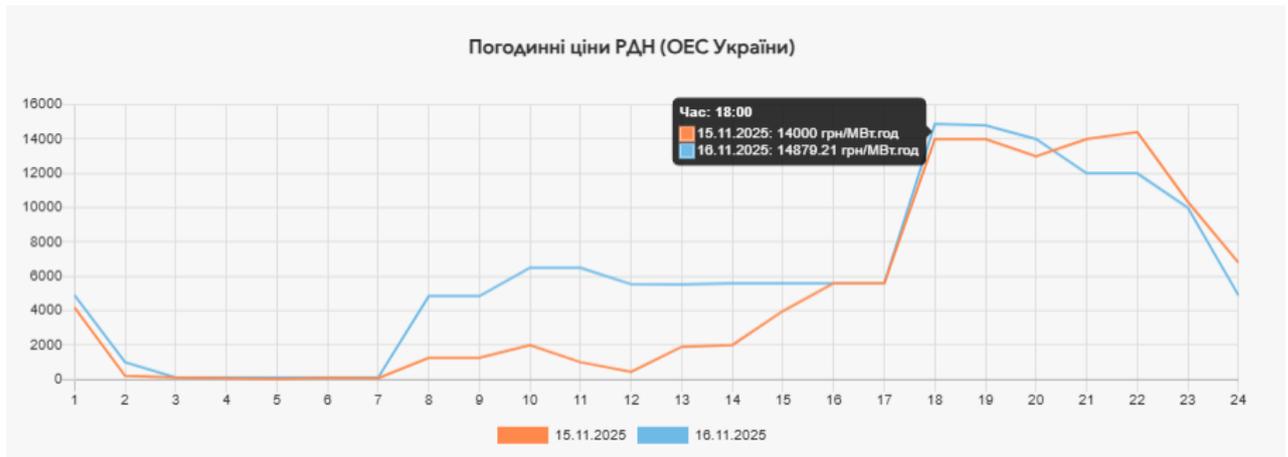


Рисунок 2.5 – Погодинні ціни РДН (ОЕС України)

Таблиця 2.2 – Коротка характеристика режимів роботи автоматизованої система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії.

Режим роботи	Коротка характеристика
Максимальне самоспоживання	Пріоритетне використання власної генерації для зменшення закупівлі електроенергії.
TOU (Час використання)	Оптимізація енергоспоживання згідно з тарифними зонами.
Peak-shaving	Зменшення пікових навантажень шляхом розрядження УЗЕ.
On-grid / Off-grid	Автоматичний перехід між мережею та автономним режимом.
Острівний режим	Підтримання безперебійного живлення при зникненні зовнішньої мережі.
Уникнення реконструкції мережі	Компенсація пікових навантажень для уникнення модернізації електромереж.
Розширення доступної потужності	Додавання потужності з УЗЕ у моменти піків споживання.
Інтеграція з РДН	Продаж надлишків у дорогі години та зарядження у дешеві.
Автономне використання	Незалежна робота окремих ділянок підприємства.

Подібна структура автоматизованої системи управління мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ з можливістю роботи в on/off-grid режимах наведена на рисунку 2.6.

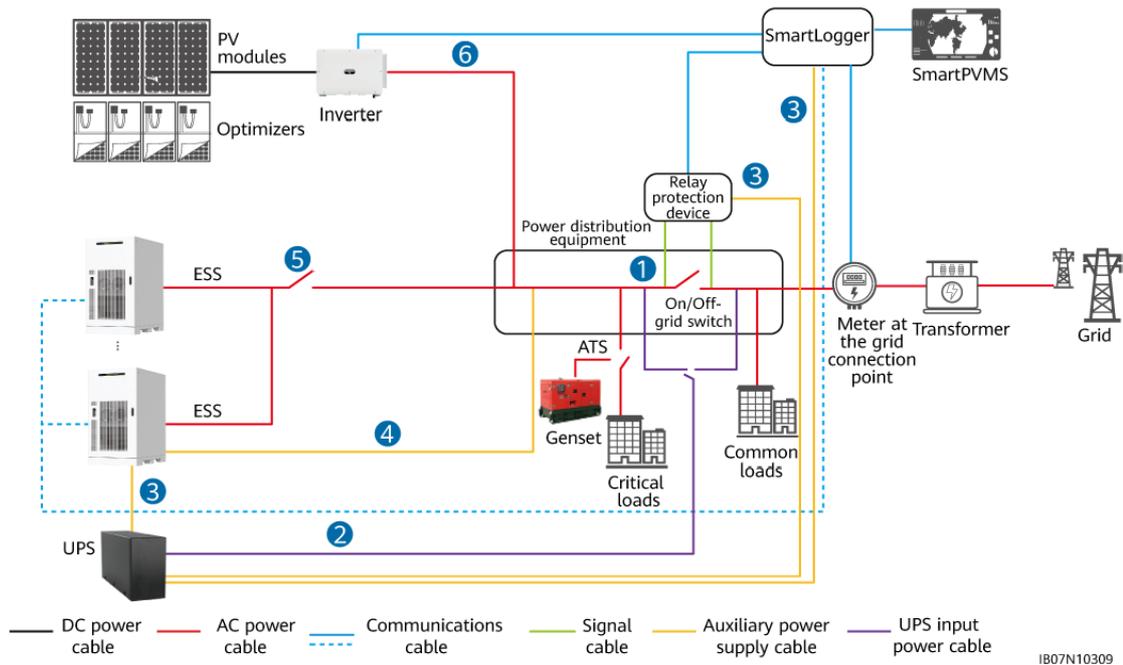


Рисунок 2.6 – Структурна схема автоматизованої системи управління мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з системами зберігання енергії.(on/off-grid PV+ESS. (режим VSG))

У наведеній структурній схемі розглянуто типове рішення для об'єктів із одним вводом мережі, що дозволяє скоротити складність системної інтеграції та використати базові функції керування енергопотоками. Архітектура такого типу не потребує розгалужених мережевих підключень або складних комутаційних рішень, що робить її оптимальною для малих і середніх підприємств, де ключовим завданням є підвищення енергонезалежності та забезпечення резервування.

Система підтримує основні режими роботи - самоспоживання, зарядження та розрядження УЗЕ відповідно до графіка навантаження,

зниження пікових потужностей та автоматичне перемикання між on-grid і off-grid режимами. На відміну від розширених EMS-рішень, ця конфігурація не передбачає повноцінного відстеження цін на ринку «на добу наперед» (РДН) і не виконує автоматизованої оптимізації з урахуванням тарифної динаміки. Водночас система має можливість встановлювати часові інтервали для закупівлі електроенергії з мережі та її продажу, що дозволяє підприємству частково адаптувати роботу до добових тарифних коливань.

Висновок: У даному розділі проведено комплексний аналіз об'єкта автоматизації, визначено цілі, завдання та основні вимоги до побудови системи керування мережевою архітектурою СЕС з установками зберігання енергії, а також детально описано можливі режими її роботи. Встановлено, що ефективне функціонування такого енергетичного комплексу потребує узгодженої роботи сонячної генерації, УЗЕ та мережевої інфраструктури, що забезпечується за рахунок впровадження сучасних алгоритмів управління, підтримки on/off-grid режимів, оптимізації енергопотоків та підвищення енергонезалежності підприємства. Розглянуті режими підтверджують можливість адаптивної роботи системи в різних експлуатаційних умовах, що створює основу для подальшого впровадження її структурної та функціональної архітектури у наступних розділах.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Техніко-економічне обґрунтування є ключовим етапом оцінки доцільності впровадження автоматизованої системи керування мережею сонячної електростанції з інтегрованими установками зберігання енергії. Воно дозволяє визначити економічні переваги, технологічні вигоди та очікуваний ефект від модернізації енергетичної інфраструктури підприємства. Запропонована система автоматизації спрямована на підвищення енергоефективності, забезпечення стабільного функціонування СЕС у режимі нульового експорту, оптимізацію режимів зарядження та розрядження УЗЕ, а також мінімізацію втрат електроенергії та експлуатаційних витрат. Виконання техніко-економічних розрахунків дає змогу обґрунтувати економічну доцільність впровадження та визначити очікуваний фінансовий результат для підприємства.

3.1 Технічне обґрунтування вибору складових автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії

Однією з ключових особливостей розробленої автоматизованої системи керування є її здатність забезпечувати стабільне та передбачуване електропостачання автономного споживача, інтегруючи роботу сонячної електростанції та установок зберігання енергії в єдину інтелектуальну мережеву архітектуру. Запропонована структура дозволяє не лише передавати споживачеві електроенергію, але й формувати оптимальний баланс між генерацією, споживанням і накопиченням, що є критично важливим для сучасних промислових об'єктів.

До обладнання, яке застосовується в мережевих фотоелектричних системах із накопичувачами, висуваються особливі технічні вимоги, зумовлені змінною інтенсивністю сонячної радіації та динамічними режимами навантаження. Фотоелектрична генерація має нерівномірний характер, залежить від освітленості, температури та погодних умов. В умовах такої варіативності необхідно забезпечити точне керування інверторною технікою, акумуляторними модулями та захисною апаратурою в широкому діапазоні робочих режимів. Це вимагає застосування швидкодіючих алгоритмів, надійних засобів моніторингу та інтелектуальних систем оптимізації енергопотоків.

Аналіз апаратно-програмних рішень показує, що питання вибору платформи керування для складних мережевих СЕС не є однозначним. Зокрема, застосування лише вбудованих контролерів інверторів забезпечує базове керування генерацією, але не дозволяє повноцінно координувати взаємодію з установками зберігання енергії, дизель-генераторами чи зовнішньою мережею. У свою чергу, локальні PLC-системи мають гнучку архітектуру, але потребують значних зусиль для реалізації енергоменеджменту. Саме тому для нової впроваджуваної системи найбільш доцільним є використання промислової EMS-платформи, яка поєднує точність вимірювання, можливість глибокого налаштування логіки керування та підтримку комунікаційних протоколів всіх типів інверторного та накопичувального обладнання.

Вибір фотоелектричних модулів у запропонованій системі є менш складним завданням, оскільки сучасні високоефективні полікристалічних панелей забезпечують стабільний коефіцієнт корисної дії та тривалий термін експлуатації. Основним критерієм стає відповідність їх електротехнічних характеристик вимогам обраних інверторів та загальної конфігурації поля.

Сучасні системи накопичення енергії (УЗЕ) продемонстрували високу надійність і ефективність, особливо у застосуванні з літій-залізо-фосфатною

(LFP) хімією. Вони здатні працювати у широкому діапазоні потужностей, швидко реагувати на зміни навантаження та забезпечувати резервування електроживлення. Інтеграція УЗЕ значно підвищує стійкість системи до відхилень зовнішньої мережі та мінімізує небажаний експорт енергії.

Таким чином, розроблювана система керування є новим комплексним рішенням, що поєднує фотоелектричну генерацію, накопичувачі енергії та інтелектуальну EMS-платформу в єдину архітектуру. Її впровадження забезпечує підвищення енергоефективності, стабільність електропостачання й можливість роботи як у складі мережі, так і в автономних режимах. Саме сукупність цих технічних характеристик обґрунтовує вибір відповідних складових системи та визначає їхню доцільність для сучасних енергетичних об'єктів.

3.1.1 Вибір параметрів СЕС

Розглянутий об'єкт є діючою мережею сонячною електростанцією, яка має встановлену потужність 1 021,44 кВт DC та інверторну потужність 800 кВт AC. Ці параметри визначають вихідні технічні умови для розробки автоматизованої системи керування та інтеграції установок зберігання енергії в існуючу інфраструктуру.

Фотоелектричне поле станції сформоване з 1536 модулів Risen RSM132-8-665M, що відзначаються високою ефективністю, стабільністю роботи в умовах мінливої сонячної активності та підтвердженою надійністю матеріалів. Сукупна встановлена потужність DC формує оптимальний енергетичний ресурс для роботи інверторної частини та реалізації алгоритмів енергоменеджменту.

Перетворення постійного струму в змінний здійснюється за допомогою 8 мережевих інверторів Huawei SUN2000-100KTL-M2, кожен номінальною потужністю 100 кВт. Це сучасні трифазні інвертори з високим ККД (до 98,7%), широким діапазоном роботи MPPT, підтримкою високовольтних стрингів і розвиненими функціями комунікації.

Їх застосування є доцільним з таких причин:

- підтримка роботи в мережевому режимі з можливістю обмеження активної потужності;
- сумісність із системами EMS та можливість зовнішнього керування через Modbus TCP;
- точне вимірювання параметрів генерації в реальному часі;
- висока надійність, підтверджена міжнародною сертифікацією;
- можливість групового керування через SmartLogger або централізовану платформу.

Співвідношення DC/AC = 1,28 для даної СЕС є технічно оптимальним. Воно забезпечує повніше використання потенціалу сонячного масиву протягом року, компенсує ранкові та вечірні зниження генерації.

3.1.2 Вибір параметрів УЗЕ

Для забезпечення стабільної роботи сонячної електростанції та підтримання режимів енергобалансу передбачається встановлення системи накопичення енергії загальною потужністю 1080 кВт та ємністю 2150 кВт·год. Конструктивно УЗЕ складається з модульних блоків потужністю 108 кВт і ємністю 215 кВт·год кожен, що забезпечує гнучкість масштабування та підвищену надійність під час експлуатації.

Обрана конфігурація дозволяє системі ефективно вирівнювати добові коливання генерації та споживання, покривати пікові навантаження та зменшувати залежність від зовнішньої електромережі. Завдяки достатній потужності та значному запасу енергії УЗЕ здатна швидко реагувати на зміну режимів роботи інверторів та компенсувати короточасні провали сонячної генерації. Це забезпечує стабільність роботи критично важливих споживачів та зменшує ризики виникнення аварійних ситуацій.

Важливою перевагою такої конфігурації є можливість роботи в острівному режимі (islanding). УЗЕ забезпечує підтримання напруги та частоти в локальній мережі у разі зникнення зовнішнього живлення,

формує власний енергетичний контур і дозволяє об'єкту продовжувати роботу автономно.

У рамках проєкту система накопичення енергії буде використовуватися за принципом багаторежимної оптимізації, спрямованої на зменшення витрат на електроенергію та підвищення енергоефективності об'єкта. Передбачається, що УЗЕ заряджатиметься у нічні години за зниженим тарифом, накопичуючи енергію для подальшого використання. У ранкові години система виконуватиме часткове покриття навантаження, зменшуючи обсяг споживання з мережі.

У денний період заряджання УЗЕ здійснюватиметься від сонячної генерації, що дозволить максимально використати власну відновлювану енергію. Вечірні пікові години, коли спостерігається найвища вартість електроенергії, компенсуються розрядкою УЗЕ, що суттєво зменшуватиме витрати на закупівлю електроенергії та знижуватиме навантаження на мережу.

Такий режим роботи накопичувача забезпечує економічну доцільність, оптимізує використання генерованої енергії та дозволяє ефективно працювати як у звичайних умовах, так і в обмежених режимах роботи мережі.

3.1.3 Вибір пристроїв системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії

Для забезпечення узгодженої роботи всіх елементів енергетичного комплексу та реалізації функцій енергоменеджменту передбачається застосування центрального контролера, який виконуватиме роль основного керуючого пристрою системи. Контролер буде відповідальний за збір, обробку та передачу інформації між комутаційним обладнанням, інверторами СЕС, системою накопичення енергії та дизельним генератором.

Центральний контролер здійснюватиме отримання даних від ввідних вимикачів, що дозволяє визначати режими підключення станції до зовнішньої електромережі та оперативно реагувати на зміни її параметрів. Паралельно з цим він забезпечує безперервний моніторинг і аналіз параметрів генерації СЕС, формуючи команди для обмеження потужності або оптимізації роботи інверторів відповідно до вимог енергосистеми та режиму нульового експорту.

Важливою функцією контролера є керування режимами роботи УЗЕ, включно з процесами зарядження та розрядження, що дозволяє підтримувати енергетичний баланс і забезпечувати покриття навантаження у пікові періоди. Контролер також інтегрується з дизель-генератором, забезпечуючи можливість його автоматичного запуску, підключення до навантаження та використання у резервних або аварійних режимах, що підвищує надійність енергопостачання.

Керування секційним вимикачем здійснюється в автоматизованому режимі, що дозволяє змінювати внутрішню конфігурацію електричних зв'язків та забезпечувати роботу станції в островному режимі у разі втрати зв'язку з мережею. Одночасно контролер постійно виконує вимірювання навантаження в реальному часі, визначаючи поточний енергобаланс та забезпечуючи коректність алгоритмів енергоменеджменту.

Аналіз потужності та профілю генерації СЕС, який також виконує центральний контролер, дає можливість прогнозувати виробіток та формувати оптимальні сценарії роботи енергетичного комплексу. Сукупність цих функцій забезпечує узгоджену взаємодію всіх елементів системи та підвищує ефективність її роботи в різних режимах.

Підтримка сучасних протоколів зв'язку (Modbus TCP/RTU, CAN, Ethernet) гарантує сумісність з обладнанням різних виробників та високу швидкодію обміну даними.

Таким чином, вибір центрального контролера є ключовим технічним рішенням, оскільки він забезпечує єдину логіку керування, підвищує надійність енергосистеми та створює основу для реалізації функцій промислової EMS-платформи.

3.2 Економічне обґрунтування вибору складових автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії

3.2.1 Визначення капітальних вкладень

Вартість кожного із елементів автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи електротехнічного комплексу	Ціна, грн.
Елементи електротехнічного комплексу СЕС	
Мережевий інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M2 (100 кВт) (2 шт.)	6 593 295,36
Фотогальванічні панелі Risen RSM132-8-665M (1536 шт.)	1 870 000,16
Пристрій керування SmartLogger 3000A (2шт.)	52 275,02
Кріплення СЕС: баластна система (1536 компл.)	5 275 719,50
DC- PV 1×6 мм ² — 10 029 м; конектори MC4 — 1090 шт.	758 925,63
АС-кола: АВВГнг 4×95 — 281 м; АВВГнг 1×240 — 595 м.	168 944,28
Зв'язок: оптоволоконний кабель — 140 м; F/UTP-cat5e — 1400 м.	36 874,00
Щитові виробы: шафи 1000×1600×300 — 2 шт; 800×600×200 — 1 шт; 600×600×200 — 1 шт; 400×500×200 — 1 шт.	264 073,00
Кабельні лотки: 50×50 — 450 м; 100×50 — 190 м; 200×50 — 87 м; 400×50 — 80 м;	251 351,13
Заземлення: вертикальні електроди D16×1500 — 36 шт; дрiт Al D10 — 2470 м; смуга 25×4 — 20 м.	390 917,20
Комутація та вимірювання: A2B 250 TMF 160A — 8 шт; S5 800A — 2 шт; ТТ 800/5 — 6 шт; ТТ 2000/5 — 3 шт;	150 549,80
Загальна вартість СЕС	15 804 650, 06
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	2 054 604, 57
Витрати на будівельні роботи (10%)	1 580 465, 06
Капітальні витрати (інвестиції) СЕС	19 439 719, 57

Продовження таблиці 3.1

Елементи електротехнічного комплексу УЗЕ	
Установка зберігання електроенергії (УЗЕ) Luna2000-215-2S10 (10 шт.)	29 537 502,3
Обладнання 0,4 кВ щити 2000x1000x600 УЗЕ (6 шт.)	5 902 534,22
Комутація та вимірювання 0,4 кВ КТП ТТ 1200/5 — (12 шт.);	589 985,96
Кабельно-провідникова продукція АС- кола-(1162м.), вита пара-(29м.), двостінна гофрована труба- (354 м.)	1 820 365,35
Лоточна продукція та аксесуари 500×80 — 18 м; 200×80 — (21 м) та метизи.	46 972,59
Заземлення: вертикальні заземлювачі G-18/30 L=3— 20 шт; злучники – 40 шт. смуга 40×4 — (90 м.)	47 490,00
Блискавкозахист: Блискавкоприймач з бетонною основою (комплект) 6м – (2 шт.)	22 780,00
Допоміжне живлення	179 877,00
Загальна вартість УЗЕ	38 147 593,62
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	4 959 187,17
Витрати на будівельні роботи (10%)	3 814 759,36
Капітальні витрати (інвестиції) УЗЕ	46 921 540,15
Елементи електротехнічного комплексу автоматизованої системи керування	
Щит керування (центральний контролер 1) (шафа 800×600×200)	294 000,00
Щит керування (центральний контролер 2) (шафа 800×600×200)	294 000,00
Щит керування (Mains Controller 3,4,5) (шафа 1000×800×300)	210 000,00
Модулі синхронізації вимикачів (MCB1/MCB2/BCB/SCB)	220 000,00
Контролер генератора (Genset)	95 500,00
Живлення та інформаційні комунікації (Кабель КВВГнг 4x2,5, клеми, кабелі, реле, вита пара, живлення 24В, UPS)	119 523,80
Загальна вартість автоматизованої системи керування	1 233 023,80
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	160 293,09
Витрати на будівельні роботи (10%)	123 302,38
Капітальні витрати (інвестиції) автоматизованої системи керування	1 516 619,27
Загальна вартість автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ.	55 185 267,48
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	7 174 084,77
Витрати на будівельні роботи (10%)	5 518 526,75
Капітальні витрати (інвестиції) автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ.	67 877 879,00

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки, монтаж цього обладнання та витрати на будівництво. А також потрібно розрахувати амортизаційні відрахування.

Вартість доставки обладнання розраховуються в залежності від відстані, маси вантажу та тарифу залізничного перевезення на відстань одного кілометра тони вантажу. Монтажні роботи розраховуються відповідно до нормативів вартості монтажних робіт. Спрощуючи розрахунок, вартість доставки та монтажних робіт, можна прийняти рівними 13% від загальної вартості обладнання:

$$C_{DM} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)}, \quad (3.1)$$

$$C_{DM} = 55\,185\,267,48 \cdot 0,13 = 7\,174\,084,77 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_B = C_{\Sigma} \cdot 0,1 \text{ (грн.)}, \quad (3.2)$$

$$C_B = 55\,185\,267,48 \cdot 0,1 = 5\,518\,526,75 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні відрахування знаходяться із добутку норми амортизації на первісну вартість об'єкту основних фондів:

$$A_p = \frac{C_{\Sigma} \cdot H_A}{100\%}, \quad (3.3)$$

де H_A – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації СЕС та УЗЕ приймемо за 20 років норма амортизації буде рівною 5%)

$$A_p = \frac{55\,185\,267,48 \cdot 5\%}{100\%} = 2\,759\,263,37 \text{ (грн.)}.$$

3.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до правил улаштування електроустановок обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого а група допуску по електробезпеці не нижче третьої.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} + C_{3Д}, \quad (3.4)$$

де C_{30} – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3Д}$ – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (3.5)$$

де N – кількість робітників які обслуговують автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ ($N = 1$ чол.);

T_1 – годинна тарифна ставка робітника першого розряду ($T_1 = 45$ грн.);

K – тарифний коефіцієнт (для робітника четвертого розряду: $K = 2,03$.
Із таблиці 3.2);

K_C – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_C = 1$);

β – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ($\beta = 1$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу обслуговування автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (3.6)$$

де ε – відносна тривалість увімкнення ($\varepsilon = 0,5$);

$Z_{\text{РД}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{РД}} = 250$ днів/рік);

$Z_{\text{РЗ}}$ – кількість робочих змін ($Z_{\text{РЗ}} = 1$);

$t_{\text{РЗ}}$ – тривалість робочої зміни ($t_{\text{РЗ}} = 1$).

Таблиця 3.2– Тарифна сітка працівників погодинної оплати праці

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{ef}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125 \text{ (год./рік)}.$$

$$C_{30} = 1 \cdot 45 \cdot 2,03 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 11418 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата (премія) становить 10% від розміру основної заробітної плати і відповідно становить:

$$C_{3Д} = 11418 \cdot 0,1 = 1141,8 \text{ (грн.)}.$$

В цілому загальні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ становитимуть:

$$C_3 = 11418 + 1141,8 = 12559,8 \text{ (грн.)}.$$

3.2.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт обладнання автоматизованої системи керування та енергетичної інфраструктури проводиться безпосередньо на місці його встановлення з повним або частковим відключенням окремих елементів мережі. Для виконання ремонтних робіт залучається кваліфікований персонал, який забезпечує безпечну зупинку, відключення і подальше введення в експлуатацію обладнання.

Фінансові витрати на проведення ремонтів включають в себе вартість комплектуючих, запасних частин, кабельно-провідникової продукції, модулів комутації, вимірювальних трансформаторів та інших елементів, що підлягають заміні або регламентному обслуговуванню. Крім того, до складу витрат входить оплата праці фахівців з технічного обслуговування,

налагодження та діагностики, які виконують весь комплекс робіт з підтримання працездатності системи.

Найбільш трудомісткими з точки зору ремонту є елементи мережевої архітектури СЕС та системи зберігання енергії (УЗЕ). Фотомодулі, інвертори, батарейні шафи, комунікаційні модулі та силові вимикачі працюють у змінних температурних і електричних навантаженнях, що потребує регулярного огляду, очищення, підтягування контактів, а у випадку виходу з ладу — демонтажу та заміни окремих секцій

Графік планових попереджувальних ремонтних робіт представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3– Графік планових ремонтних робіт

Найменування обладнання	Види ремонтних робіт по місяцях												Трудоміст-ть, люд-год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Фотомодулі та кріплення СЕС			12			12			12			16	52
Інвертори мережеві (8 шт.)		8			8			8			10		34
УЗЕ (шафи, BMS/PCS)	10			10			10			10			40
EMS/контролери/ зв'язок			6			6			6			6	24
Кабельні мережі DC/AC			6			6			6			6	24
РУ-0,4кВ, вимикачі, КТ/лічильники		6									6	6	18
Дизель-генератор (ДГУ)	6			6			6			6			24
	Загальна трудомісткість												216

Виконання даних ремонтних робіт, будемо вважати, проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефР}} \text{ (грн.)}, \quad (3.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 45 \cdot 2,7 \cdot 216 = 26244 \text{ (грн.)}.$$

Величина додаткової заробітної плати ремонтного персоналу становить 20%, визначається високим рівнем кваліфікації працівника, який має в разі потреби ремонтувати декілька самодостатніх електромеханічних пристроїв (СЕС, УЗЕ та автоматизованої системи керування),:

$$C_{\text{ЗДР}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,2 \text{ (грн.)}, \quad (3.8)$$

$$C_{\text{ЗДР}} = 26244 \cdot 0,2 = 5248,8 \text{ (грн.)}.$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{\text{ЗР}} = C_{\text{ЗОР}} + C_{\text{ЗДР}} \text{ (грн.)}, \quad (3.9)$$

$$C_{\text{ЗР}} = 26244 + 5248,8 = 31492,8 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи розраховуються відносно основної заробітної плати ремонтного персоналу, і становлять 15 % від її величини.

$$C_{\text{К}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,15 \text{ (грн.)}, \quad (3.10)$$

$$C_{\text{К}} = 26244 \cdot 0,15 = 3936,6 \text{ (грн.)}.$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{\text{В}} = A_{\text{Р}} + C_{\text{З}} + C_{\text{ЗР}} + C_{\text{К}} \text{ (грн.)}, \quad (3.11)$$

$$C_{\text{В}} = 2\,759\,263,37 + 12559,8 + 31492,8 + 3936,6 = 2\,807\,252,57 \text{ (грн.)}$$

3.3 Розрахунок терміну окупності автоматизованої системи керування

3.3.1 Виріток електричної енергії СЕС

Результати розрахунків по виробітку сонячної енергії зведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Фінансові показники СЕС по місяцям

Місяць	Виробіток, (кВт год)	Власне споживання (кВт год)	Економія від власного споживання ($\approx 5,8$ грн/кВт·год)	Дохід від продажу надлишку (РДН \approx 4,88 грн/кВт·год)
Січень	27 700	175 704	$27\,700 \times 5,8 = 160\,660$ грн	
Лютий	45 300	152 134	$45\,300 \times 5,8 = 262\,740$ грн	
Березень	91 300	160 772	$91\,300 \times 5,8 = 529\,540$ грн	
Квітень	121 200	100 411	$100\,411 \times 5,8 = 582\,384$ грн	$(121\,200 - 100\,411) \times 4,88 = 100\,448$ грн
Травень	150 900	88 295	$88\,295 \times 5,8 = 512\,111$ грн	$(150\,900 - 88\,295) \times 4,88 = 305\,957$ грн
Червень	160 400	81 024	$81\,024 \times 5,8 = 469\,939$ грн	$(160\,400 - 81\,024) \times 4,88 = 386\,313$ грн
Липень	156 500	84 140	$84\,140 \times 5,8 = 488\,012$ грн	$(156\,500 - 84\,140) \times 4,88 = 354\,101$ грн
Серпень	135 700	90 373	$90\,373 \times 5,8 = 524\,163$ грн	$(135\,700 - 90\,373) \times 4,88 = 220\,826$ грн
Вересень	98 100	98 683	$98\,100 \times 5,8 = 568\,980$ грн	-
Жовтень	61 600	114 264	$61\,600 \times 5,8 = 357\,280$ грн	-
Листопад	26 600	129 846	$26\,600 \times 5,8 = 154\,280$ грн	-
Грудень	21 500	150 621	$21\,500 \times 5,8 = 124\,700$ грн	-
За рік:	1 096 800	1 426 268	$\approx 4\,814\,789$ грн	$\approx 1\,367\,645$ грн
Разом валовий ефект				$\approx 6\,182\,434$ грн/рік
Податок (19,5%)				$\approx 266\,691$ грн
Прибуток від продажу (після продажу)				$\approx 1\,100\,954$ грн
Чистий прибуток після податку (19,5 %):				4 734 789 млн грн/рік

Основні вхідні дані, прийняті для розрахунку:

Потужність СЕС (PV-модулів) – 1 021,44 кВт DC та інверторну потужність 800 кВт AC;

Власне споживання – 1 426 268 кВт год/міс;

Економія від власного споживання ($\approx 5,8$ грн/кВт·год);

Дохід від продажу надлишку (РДН $\approx 4,88$ грн/кВт·год);

Ставка оподаткування – 19,5 %.

Таким чином, в результаті проведеного розрахунку, було отримано величину прибутку від реалізації сонячної енергії, який складає:

$$C_{PCEC} = 4\,734\,789 (\text{грн}).$$

3.3.2 Виробіток електричної енергії УЗЕ з впровадженням автоматизованої системи

Основні вхідні дані, прийняті для розрахунку:

У складі сонячної електростанції передбачено встановлення установки зберігання енергії (УЗЕ) типу Huawei LUNA2000-215-2S10 загальною потужністю 1080 кВт та загальною ємністю 2150 кВт·год (10 модульних блоків по 108 кВт·215 кВт·год).

Сонячна електростанція має встановлену потужність 1 021,44 кВт DC та 800 кВт AC інверторної потужності.

Вихідні технічні параметри УЗЕ згідно з технічними характеристиками системи: глибина розряду (DoD) становить=90 %, коефіцієнт корисної дії повного циклу (η)=90 %.

Таким чином, корисна ємність на один цикл становить:

$$E_{use} = C_{УЗЕ} \cdot DoD \text{ (кВт}\cdot\text{год)}, \quad (3.12)$$

$$E_{use} = 2150 \cdot 0,9 = 1935 \text{ (кВт}\cdot\text{год)}.$$

Енергія, що реально віддається в мережу після урахування втрат, дорівнює:

$$E_{out} = E_{use} \cdot \eta \text{ (кВт} \cdot \text{год)}, \quad (3.13)$$

$$E_{out} = 1935 \cdot 0,9 = 1741,5 \text{ (кВт} \cdot \text{год)}.$$

За номінальної потужності 1080 кВт процесів заряджання та розряджання становить приблизно 1,8 години та 1,6 години відповідно, що повністю відповідає тривалості ранкових або вечірніх пікових періодів споживання. Така тривалість циклу дає змогу максимально ефективно використовувати акумульовану енергію саме в години найвищої потреби підприємства та вартості електроенергії.

Розрахунок проводиться для режиму двох циклів на добу, який є найбільш ефективним для забезпечення як енергетичної самодостатності підприємства, так і підвищення економічної віддачі:

Перший цикл — денний заряд акумуляторів (у першу чергу з надлишкової генерації СЕС, за необхідності — частково з мережі) та вечірній розряд у пікові години навантаження.

Другий цикл — нічний заряд із мережі за мінімальним тарифом і ранковий розряд у період ранкового піку.

Для розрахунків прийнято середньомісячні ціни ринку «на добу наперед» (РДН), отримані з реальних даних за жовтень 2025 року:

- 1) нічна(E_{cost_n}) — 3,748 грн/кВт·год,
- 2) денна(E_{cost_d}) — 4,44 грн/кВт·год,
- 3) вечірня(E_{cost_p}) — 10,5 грн/кВт·год.

Отже проведемо розрахунки по добовим результатам роботи УЗЕ:

Цикл 1 (день → вечірній пік):

$$E_{out_1} = E_{use} \cdot (E_{cost_p} - E_{cost_d}) \text{ (грн / доба)}, \quad (3.14)$$

$$E_{out_1} = 1935 \cdot (0,9 \cdot 10,5 - 4,44) = 9694,35 \text{ (грн / доба)}.$$

Цикл 2 (ніч→ранковий пік):

$$E_{out_2} = E_{use} \cdot (E_{cost_p} - E_{cost_n}) \text{ (грн/ доба)}, \quad (3.15)$$

$$E_{out_2} = 1935 \cdot (0,9 \cdot 10,5 - 3,748) = 11033,37 \text{ (грн/ доба)}.$$

Разом за добу: 20 727,72 грн/доба.

Віддана енергія за добу:

$$E_{out,day} = E_{out} \cdot n \text{ (кВт·год)}, \quad (3.16)$$

де n – кількість циклів за добу;

$$E_{out,day} = 1741,5 \cdot 2 = 3483,5 \text{ (кВт·год)},$$

Середня маржа на 1 кВт·год :

$$20\,727,72 / 3\,483 \approx 5,95 \text{ грн/кВт·год}$$

Результати фінансових показників роботи УЗЕ зведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Фінансові показники роботи по місяцям при 2 циклах на добу.

Місяць	днів	Прибуток, грн
Січень	31	642 559,32
Лютий	29	601 103,88
Березень	31	642 559,32
Квітень	30	621 831,60
Травень	31	642 559,32
Червень	30	621 831,60
Липень	31	642 559,32
Серпень	31	642 559,32
Вересень	30	621 831,60
Жовтень	31	642 559,32
Листопад	30	621 831,60
Грудень	31	642 559,32
За рік:	366	7 586 345,52

Таким чином, в результаті проведеного розрахунку, було отримано величину прибутку від реалізації роботи УЗЕ, який складає:

$$Ц_{P_{УЗЕ}} = 7\,586\,354,52(\text{грн}).$$

3.3.3 Термін окупності автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{OK} = \frac{C_{\Sigma} + C_{DM} + C_B}{Ц_{P_{УЗЕ}} + Ц_{P_{сес}} - C_B} \quad (3.17)$$

$$T_{OK} = \frac{55\,185\,267,48 + 7\,174\,084,77 + 5\,518\,526,75}{7\,586\,354,52 + 4\,734\,389 - 2\,807\,252,57} = \frac{67\,877\,879,00}{9\,513\,490,95} = 7,13(\text{роки}).$$

Висновок: Підсумовуючи результати розрахунків, можна зробити висновок, що розроблена автоматизована система з мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ, з урахуванням усіх витрат на її впровадження, монтаж та налаштування, забезпечує повну окупність інвестицій протягом приблизно 7,13 року.

Такий показник досягається завдяки ефективному використанню природного потенціалу сонячної енергії, можливостей системи накопичення електроенергії та впровадженню сучасної автоматизованої системи керування, що оптимізує енергетичні потоки комплексу.

4 РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

4.1 Розробка схеми підключення та автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними станціями з установками зберігання електроенергії

Схема підключення - це графічний документ, який показує зовнішні з'єднання виробу, тобто, як різні компоненти підключаються один до одного та до зовнішнього середовища.[20]

Розробка схеми підключення та автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції (СЕС) з установками зберігання енергії (УЗЕ) до існуючої електричної мережі підприємства є комплексним інженерним процесом, що охоплює як технічні, так і організаційні аспекти. Вона передбачає побудову інтегрованої енергетичної інфраструктури, здатної працювати в умовах змінних навантажень, графіків генерації та вимог енергоринку, забезпечуючи надійність та економічну ефективність роботи об'єкта.

Нижче наведено деталізоване розкриття основних етапів та завдань, які входять до складу цього процесу.

1) Аналіз роботи підприємства для підбору обладнання УЗЕ та СЕС. Проектування починається з оцінки режимів споживання підприємства. На основі добових та річних графіків визначаються пікові навантаження, нічні провали, тривалість піків та можливості оптимізації енергобалансу. Це дозволяє вибрати оптимальну встановлену потужність СЕС, ємність та потужність УЗЕ, а також визначити економічно доцільні режими роботи (заряд у нічні години, розряд у пікові періоди, згладжування генерації тощо).

2) Розробка елементів підключення СЕС (силові та вторинні зв'язки). Створюється однолінійна схема СЕС із визначенням конфігурації стрінгів, інверторів та приєднання їх до РУ-0,4 кВ. Передбачаються апарати захисту, обмежувачі перенапруг (SPD), комутаційні апарати та вимірювальні пристрої. У вторинних схемах визначаються канали зв'язку інвертора зі EMS, SmartMeter та комерційним лічильником.

3) Розробка підключення УЗЕ та її пристроїв керування. Формується схема підключення PCS УЗЕ до електричної мережі підприємства. Визначаються силові ланцюги, підключення батарейних модулів, розміщення BMS, комунікаційних інтерфейсів та захисної апаратури. Передбачається логіка інтеграції з PV-інверторами, лічильниками та контролером EMS для роботи в різних енергетичних режимах.

4) Організація кабельних зв'язків між різними ланками технологічного процесу генерації електроенергії. Планування кабельних маршрутів між різними компонентами системи, забезпечення належного рівня ізоляції та мінімізація енергетичних втрат.

5) Побудова алгоритму єдиної роботи системи передбачає формування узгодженої взаємодії між СЕС, установками зберігання енергії, навантаженням підприємства та мережею, що забезпечує оптимальний енергобаланс у кожний момент часу. Алгоритм визначає режими генерації, зарядження та розрядження УЗЕ, а також умови переходу між ними залежно від рівня навантаження, стану заряду батарей і доступної сонячної потужності. Додаткове обладнання керування (EMS, SmartMeter, контролери PCS/BMS) автоматично формує команди обмеження генерації, перемикання режимів.

6) Інтеграція автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ у діюче виробництво здійснюється за допомогою окремого центрального контролера (EMS/Logger), який координує роботу всіх елементів енергетичної інфраструктури. Центральний контролер збирає дані з інверторів, батарейних

систем, лічильників та навантаження, аналізує їх у реальному часі та формує команди для перемикання режимів, обмеження генерації або оптимізації роботи УЗЕ. Завдяки цьому забезпечується синхронізована робота СЕС, УЗЕ та підприємства в різних сценаріях, а також швидке виявлення несправностей і аналіз ефективності системи.

У межах даної роботи передбачається розроблення технічних рішень для розробки системи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної електростанції (СЕС) із встановленою потужністю фотомодулів 1021,44 кВт·пік та впровадження системи накопичення енергії загальною потужністю 1080 кВт і ємністю 2150 кВт·год. Проектування електротехнічної частини виконується відповідно до вимог технічного завдання та визначених параметрів роботи об'єкта.

Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної електростанції (СЕС) з установками зберігання енергії (УЗЕ) розробляється для забезпечення покриття власних потреб підприємства в електроенергії, підвищення енергетичної автономності у разі втрати зовнішнього живлення та оптимізації загальних енергетичних витрат. Крім того, система керування забезпечує узгоджену інтеграцію роботи СЕС, УЗЕ та дизель-генераторної установки, а також ефективне балансування з навантаженням підприємства.

Розроблено схему генерації та збору електроенергії, що базується на обладнанні СЕС та УЗЕ і передбачає збір технологічних даних через автоматизовану систему керування мережевою архітектурою. Також сформовано схему підключення комплексу до існуючої мережі підприємства.

Створення такої схеми є ключовим етапом у проектуванні підключення автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ. Вона дозволяє чітко визначити взаємозв'язки між елементами, а також способи управління й контролю, необхідні для ефективного енергетичного менеджменту системи.

Електрична схема підключення автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії представлена в додатку Б.

На схемі наведено автоматизовану систему керування мережевою архітектурою сонячної електростанції з установками зберігання енергії, інтегровану в існуючу електричну мережу підприємства. Підключення СЕС та УЗЕ здійснюється до двотрансформаторної підстанції 10/0,4 кВ.

Фотомодулі об'єднуються у стрінги та підключаються до інверторів по DC-лініях, конфігурація яких визначається розрахунками. Інвертори перетворюють постійний струм у змінний і передають його до підстанції через шафи збору потужності, оснащені захистами та засобами обліку генерації.

УЗЕ під'єднується паралельно до мережі за схожим принципом: у контейнері розміщені батарейні модулі (DC), PCS (AC), BMS та внутрішня система керування. Через інтеграцію з EMS контролерами забезпечується як робота за зовнішніми командами, так і автономне керування зарядом і розрядом за розкладом, налаштованим вручну.

Центральний контролер системи виконує ключову роль у зборі, аналізі та передачі інформації між усіма елементами СЕС, УЗЕ та мережею. Він об'єднує дані від SmartLogger, контролера ДГУ, EMS УЗЕ та контролера точки приєднання, забезпечуючи узгоджену роботу всіх підсистем. Саме через центральний контролер реалізуються команди керування, обмеження генерації та оптимізація режимів роботи енергетичного комплексу.

Для роботи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ забезпечується обмін даними між усіма елементами, а саме: інверторами, PCS (BESS), BMS, лічильниками, комутаційним обладнанням та центральним контролером через протоколи CAN BUS та Modbus TCP/RTU. Це дає змогу здійснювати повний моніторинг стану вимикачів, параметрів мережі, генерації та навантаження, а також

оперативно виконувати корекцію потужності згідно з поточними умовами енергоспоживання та алгоритмами енергоменеджменту.

Оскільки електропостачання підприємства організоване від двох вводів ТП 10/0,4 кВ, система постійно контролює рівні напруги та частоти на обох секціях. У разі їхнього відхилення на 15% центральний контролер виявляє втрату зовнішнього живлення та передає команду на перехід УЗЕ у режим основного джерела живлення. У складі УЗЕ використовуються інвертори(PCS), які є двонаправленими та здатні працювати як у режимі зарядження акумуляторних модулів, так і у режимі їх розрядження для покриття навантаження. PCS автоматично перемикається між режимами відповідно до команд центрального контролера, параметрів мережі та поточного рівня заряду, забезпечуючи гнучке та стабільне енергетичне керування системою.

УЗЕ миттєво бере на себе навантаження, після чого здійснюється автоматичне замикання секційного вимикача та синхронізація секцій РУ-0,4 кВ. Якщо генерація СЕС відсутня, а рівень заряду батарей досяг мінімально допустимого значення, може виконуватися запуск генераторної установки для живлення навантаження і, за вимогою, зарядження батарей УЗЕ.

У режимі роботи з мережею та ринком «на добу наперед» система може синхронізуватися з тарифними сигналами завдяки пристроям зчитування цін РДН. Це дозволяє задавати порогові значення для вигідної закупівлі або продажу електроенергії та автоматично перемикати режими відповідно до економічних умов. Такий підхід забезпечує гнучкий енергоменеджмент, підвищує ефективність використання СЕС та УЗЕ, а також створює додаткові можливості для оптимізації витрат і формування прибутку.

4.2 Алгоритм функціонування автоматизованої системи керування енергопотокami

Алгоритм - це впорядкований набір інструкцій, який визначає послідовність дій для виконання певного завдання. Іншими словами, це покрокова інструкція, яку потрібно виконати, щоб отримати конкретний результат. Для візуалізації алгоритмів часто використовують блок-схеми [21].

Алгоритм керування автоматизованої системи мережевої архітектури сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії ґрунтується на взаємодії центрального контролера з контролерами окремих пристроїв (інверторів СЕС, PCS УЗЕ, BMS, лічильників тощо). Основною функцією системи є оптимізація енергоменеджменту СЕС та УЗЕ з можливістю роботи в різних сценаріях і реалізації кількох стратегій: максимізація власного споживання, зниження пікової потужності (peak shaving), arbitrage (заряд в години низьких цін та розряд у години високих), резервування потужності, згладжування графіків генерації СЕС, острівний режим, використання тарифів типу TOU (заряд у періоди мінімальних цін, розряд у періоди максимальних) та уникнення реконструкції мережі. Вибір конкретної стратегії визначається умовами ринку, технічним станом обладнання та налаштуваннями оператора системи.

Алгоритм автоматизованої системи керування мережевої архітектури сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії представлена в додатку Б.

Алгоритм керування автоматизованої системи мережевої архітектури сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії ґрунтується на взаємодії центрального контролера з контролерами окремих пристроїв (інверторів СЕС, PCS УЗЕ, BMS, лічильників тощо). Основною функцією системи є оптимізація енергоменеджменту СЕС та УЗЕ з можливістю роботи в різних сценаріях і реалізації кількох стратегій: максимізація власного споживання, зниження пікової потужності (peak

shaving), arbitrage (заряд в години низьких цін та розряд у години високих), резервування потужності, згладжування графіків генерації СЕС, острівний режим, а також використання тарифів типу TOU (заряд у періоди мінімальних цін, розряд у періоди максимальних) з метою уникнення реконструкції мережі. Вибір конкретної стратегії визначається умовами ринку, технічним станом обладнання та налаштуваннями оператора системи.

Початок роботи алгоритму EMS полягає у безперервному зборі вхідних даних про стан енергосистеми підприємства. Система зчитує виміряну активну та реактивну потужність по двох вводах від зовнішньої мережі (Grid input 1, Grid input 2), потужність генераторів, сонячної електростанції (СЕС) та установок зберігання енергії (УЗЕ). Додатково контролюється стан силових комутаційних апаратів (GCB, MCB1, MCB2, BCB, SCB, несинхронні вимикачі), поточний рівень заряду акумуляторних батарей (SOC) і допустимі режими роботи УЗЕ, а також використовується прогноз/графік навантаження підприємства та погодинні ціни ринку «на добу наперед» (РДН).

На основі цих даних EMS формує погодинний план роботи енергосистеми з горизонтом «доба вперед». Формуються планові значення потужностей, а саме: навантаження підприємства, генерація СЕС, заряд/розряд УЗЕ, обмін потужністю з мережею та режими роботи генераторів. План оптимізується з урахуванням обмежень обладнання, допустимих режимів УЗЕ і погодинних цін РДН. У реальному часі EMS здійснює порівняння планових і фактичних параметрів та коригує керувальні дії відповідно до поточного стану системи.

Подальша робота системи визначається тим, чи доступна зовнішня електрична мережа. У мережевому режимі EMS реалізує стратегію економічної оптимізації, забезпечуючи пріоритетне використання генерації сонячної електростанції для покриття власних потреб підприємства та мінімізації закупівлі електроенергії з мережі. Система здійснює заряд і розряд УЗЕ відповідно до економічних умов ринку, керує двома вводами

мережі, забезпечує автоматичне резервування, здійснює контроль напруги та частоти і за необхідності виконує перебалансування енергетичних потоків. Мережевий режим передбачає постійний моніторинг аварійних станів, і у разі зникнення зовнішньої напруги або виходу параметрів за допустимі межі система автоматично переходить до острівного режиму роботи.

В острівному режимі EMS забезпечує автономне живлення підприємства. Система роз'єднує внутрішню мережу з зовнішньою, формує необхідні параметри напруги та частоти за рахунок УЗЕ або генератора і координує роботу СЕС, яка переходить у режим роботи «по навантаженню» та може бути обмежена у разі надлишку генерації. Ключовим елементом алгоритму в острівному режимі є керування станом заряду акумуляторних батарей. EMS обмежує глибину розряду УЗЕ, резервує частину енергії для критичних навантажень та контролює роботу батарей для забезпечення максимально тривалої автономної роботи.

У разі зниження SOC до критичного рівня, зазвичай 10 %, система ініціює автоматичний запуск дизель-генератора. Після виходу генератора на номінальні параметри навантаження підприємства переводиться на його живлення, а УЗЕ блокується від подальшої розрядки. Якщо потужність генератора дозволяє, EMS може ініціювати заряд акумуляторів, що забезпечує відновлення SOC до робочого рівня та продовжує автономність у разі тривалих відключень мережі. Досягнувши достатнього рівня заряду, система повертається до стандартного алгоритму острівної роботи, а дизель-генератор може бути переведений у резерв.

Після появи напруги у зовнішній мережі EMS переходить до ресинхронізації. Система перевіряє напругу та частоту мережі, вирівнює під них параметри внутрішньої мережі й замикає несинхронний вимикач у момент мінімального зсуву фаз. Після синхронізації навантаження плавно повертається на мережу, енергобаланс стабілізується, і система повертається

до економічного режиму роботи відповідно до цін РДН та оновленого добового плану.

Таким чином, розроблений алгоритм автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячними фотоелектричними з установками зберігання енергії гарантує стабільну, ефективну й адаптивну роботу енергетичного комплексу підприємства. Система забезпечує постійний моніторинг стану обладнання, оперативно реагує на зміну зовнішніх умов та динаміку навантаження й оптимально розподіляє енергопотоки між сонячною генерацією, накопичувачами, зовнішньою мережею та резервними джерелами живлення.

Висновок: У цьому розділі представлено структуру та принципи роботи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС з установками зберігання енергії. Розроблена схема підключення та алгоритм керування дозволяють забезпечити стабільну, ефективну та керовану роботу енергокомплексу. Впровадження такої системи підвищує енергетичну безпеку підприємства, сприяє раціональному використанню енергоресурсів та зменшує залежність від зовнішньої мережі, що безпосередньо покращує надійність і економічність виробничих процесів.

5 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ SMARTDESIGN

5.1 Вихідні дані для моделювання

У моделюванні автоматизованої системи керування було використано програмне середовище Huawei SmartDesign - спеціалізований інструмент для проєктування, аналізу та оптимізації фотоелектричних станцій, який забезпечує розрахунок енергетичних потоків, формування добових та річних профілів генерації, а також моделювання роботи систем із нульовим експортом та інтегрованими установками зберігання енергії.

Програмне забезпечення дозволяє виконати комплексну оцінку ефективності СЕС із урахуванням характеристик обладнання, кліматичних умов і режимів роботи системи, розглянемо інтерфейс програмного забезпечення на рисунку 5.1. [22]

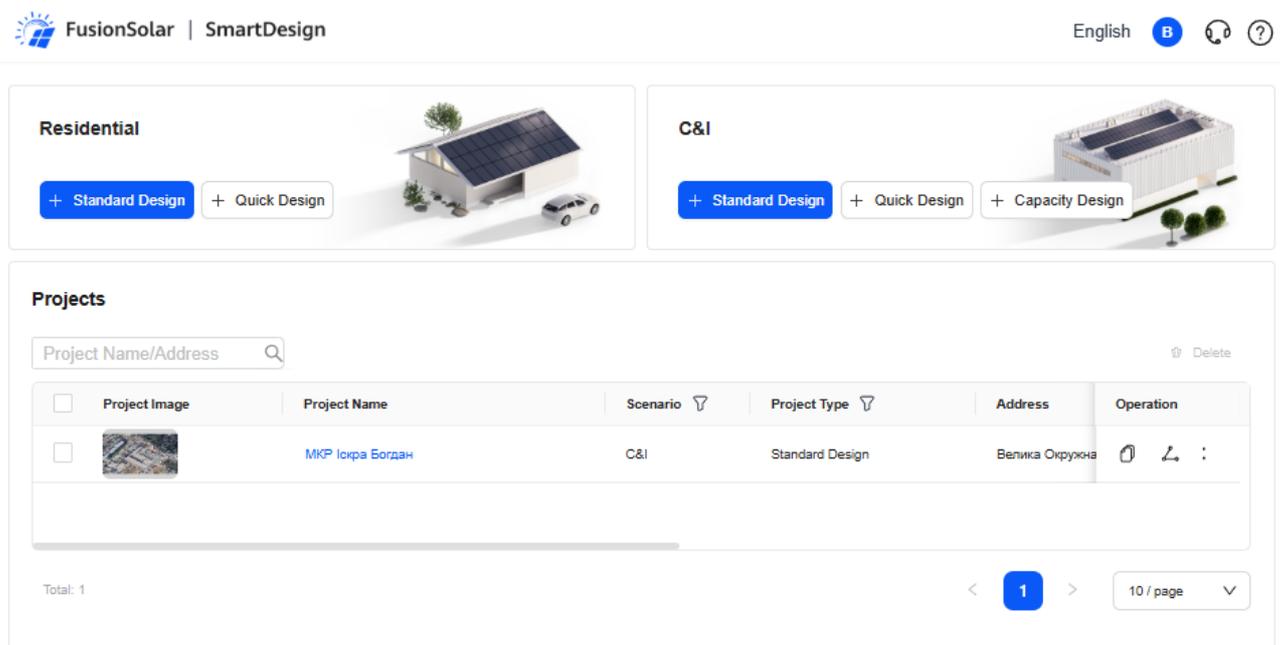


Рисунок 5.1 – Інтерфейс програмного забезпечення SmartDesign 2.0.

Для моделювання було зібрано повний набір технічних характеристик фотоелектричної станції, системи накопичення енергії, навантаження підприємства, параметрів мережевого приєднання, тарифів на електроенергію та вимог до роботи системи. Ці дані вводяться в SmartDesign і формують цифровий прототип енергетичного комплексу, на основі якого виконується подальше моделювання.

У заданій конфігурації є наявна сонячна електростанція потужність 1021,44 кВт DC по сонячному полю, а інверторною потужність 800 кВт AC. Також передбачено використання системи накопичення енергії типу Huawei LUNA2000-215-2S10, яка виконує функцію балансування енергопотоків та підвищення гнучкості роботи комплексу. Загальна потужність УЗЕ становить 1080 кВт, а доступна енергетична ємність 2150 кВт·год.

Для виконання моделювання були використані актуальні тарифні дані ринку «на добу наперед» (РДН) станом на жовтень 2025 року, що дозволяє оцінити економічну ефективність функціонування енергетичного комплексу з урахуванням реальних ринкових умов. [23]

При побудові моделі враховано режими роботи системи, які реалізуються автоматизованою системою керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ. Зокрема, моделювалися такі сценарії:

- максимізація власного споживання;
- оптимізація часу використання електроенергії;
- зрізання пікових навантажень (peak-shaving);
- резервування електроживлення підприємства;
- трейдинг електроенергії у періоди вигідних тарифів ринку РДН, у тому числі за рахунок перерозподілу генерації СЕС та енергії УЗЕ.

Для коректного прогнозування роботи системи необхідно враховувати як помісячні обсяги споживання електроенергії, так і детальний добовий профіль навантаження. Ці дані дозволяють правильно визначити оптимальну конфігурацію енергетичного комплексу та обрати відповідний алгоритм його функціонування. На досліджуваному підприємстві спостерігається типовий комерційний характер споживання: упродовж доби фіксуються виражені пікові навантаження у ранковий та вечірній періоди.

На рисунку 5.2 наведено графічне відображення добового профілю споживання електроенергії підприємства, що демонструє динаміку зміни навантаження протягом дня та підтверджує наявність характерних пікових зон.

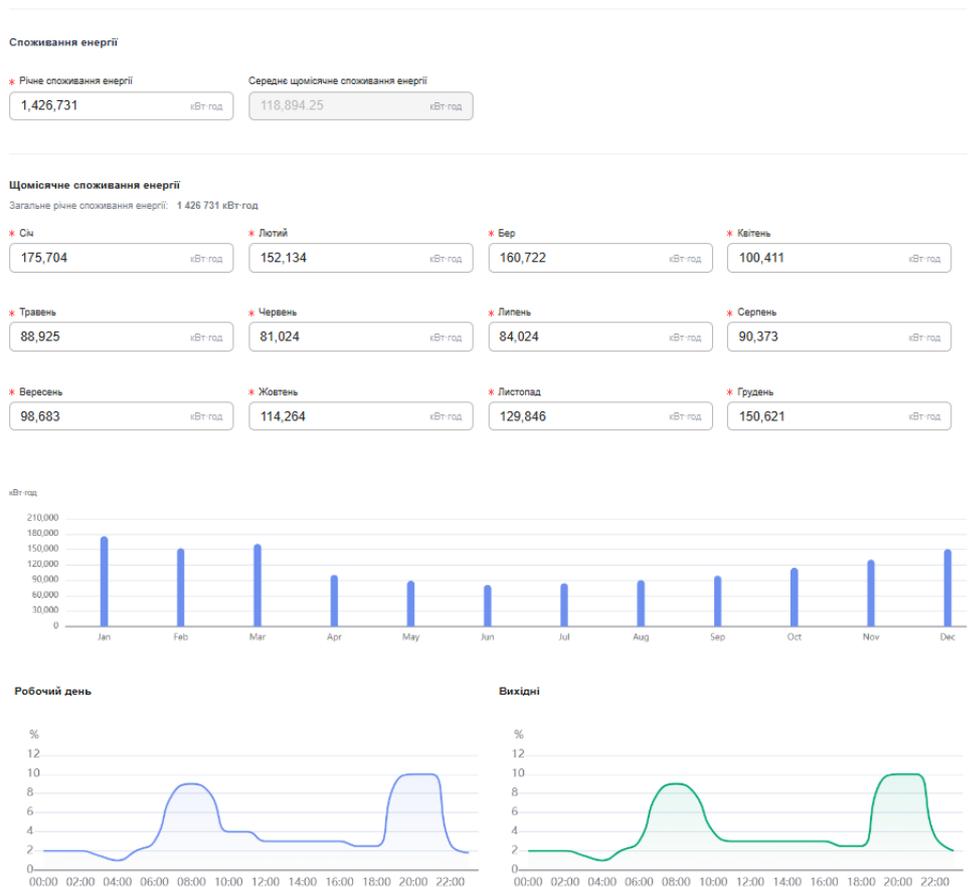


Рисунок 5.2 – Введення даних щодо споживання електроенергії з мережі ОСР.

5.2 Моделювання автоматизованої системи керування мережевої архітектури СЕС та УЗЕ у SmartDesign

Відповідно до визначених вхідних параметрів було виконано моделювання роботи енергетичного комплексу. За допомогою програмного забезпечення здійснюється побудова 3D-моделі розміщення фотоелектричної станції на покрівлі підприємства та конфігурації установки зберігання енергії. Інструменти SmartDesign дозволяють задати необхідні технічні характеристики системи, підібрати відповідні фотомодулі й інвертори та сформуванати повну віртуальну структуру СЕС відповідно до вимог проєкту.

На рисунку 5.3 наведено 3D модель розташування сонячних модулів на покрівлі об'єкта, що ілюструє їх конфігурацію, орієнтацію та загальну структуру майбутньої установки.

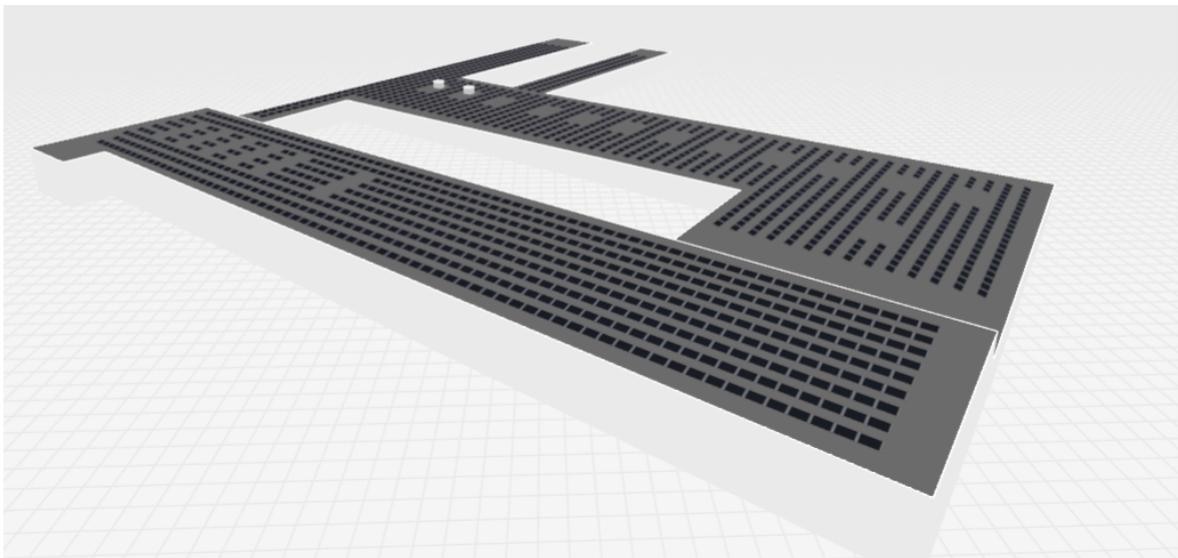


Рисунок 5.3 – Створення 3D-моделі розміщення фотоелектричної станції на покрівлі підприємства у SmartDesign.

За допомогою програмного середовища було виконано моделювання добових та місячних графіків потужності, що відображають роботу енергетичного комплексу протягом року. Для прикладу було розраховано та проаналізовано добове споживання електроенергії за 15 листопада з

урахуванням діючих тарифів, потужності установки зберігання енергії, генерації СЕС та їх взаємодії в межах єдиної системи керування.

На рисунку 5.4 наведено відповідні криві потужності, які ілюструють результат імітації роботи автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ.



Рисунок 5.4 – Графіки взаємодії СЕС, УЗЕ та навантаження підприємства за 15 листопада у SmartDesign.

З графіка видно, що система функціонує таким чином: протягом доби відбуваються два основні цикли розрядження УЗЕ - у період ранкового та вечірнього піків навантаження. Сонячна електростанція частково покриває потреби підприємства та здійснює зарядження УЗЕ в години наявності надлишкової генерації. У період заряджання УЗЕ до заданого максимального рівня, генерація СЕС, що перевищує потреби навантаження та можливості зарядження акумуляторної системи, спрямовується в мережу. Ці надлишки продаються за поточними цінами ринку «на добу наперед» (РДН), які діють у відповідний момент часу.

5.3 Аналіз енергетичних втрат та ефективності системи

Під час оцінювання енергетичної ефективності розробленої мережевої архітектури сонячної електростанції з установками зберігання енергії було проаналізовано дані автоматизованої системи керування за перший рік її функціонування. Дослідження включало детальне вивчення енергетичних потоків між фотоелектричною станцією, зовнішньою мережею, системою накопичення та споживачами, а також визначення рівня втрат та показників корисного використання виробленої енергії. На рисунку 5.5 представлено відповідну графічну модель управління енергією.

Упродовж першого року роботи система керування енергетичними потоками забезпечила комплексну взаємодію між фотоелектричною станцією, установками зберігання енергії та зовнішньою мережею, що дозволило суттєво оптимізувати структуру споживання підприємства. Система накопичення енергії відіграла ключову роль у балансуванні енергопотоків: значна частина енергії, отриманої від мережі та частково від СЕС, була акумуляована для подальшого використання у пікові періоди.

Дані за перший рік

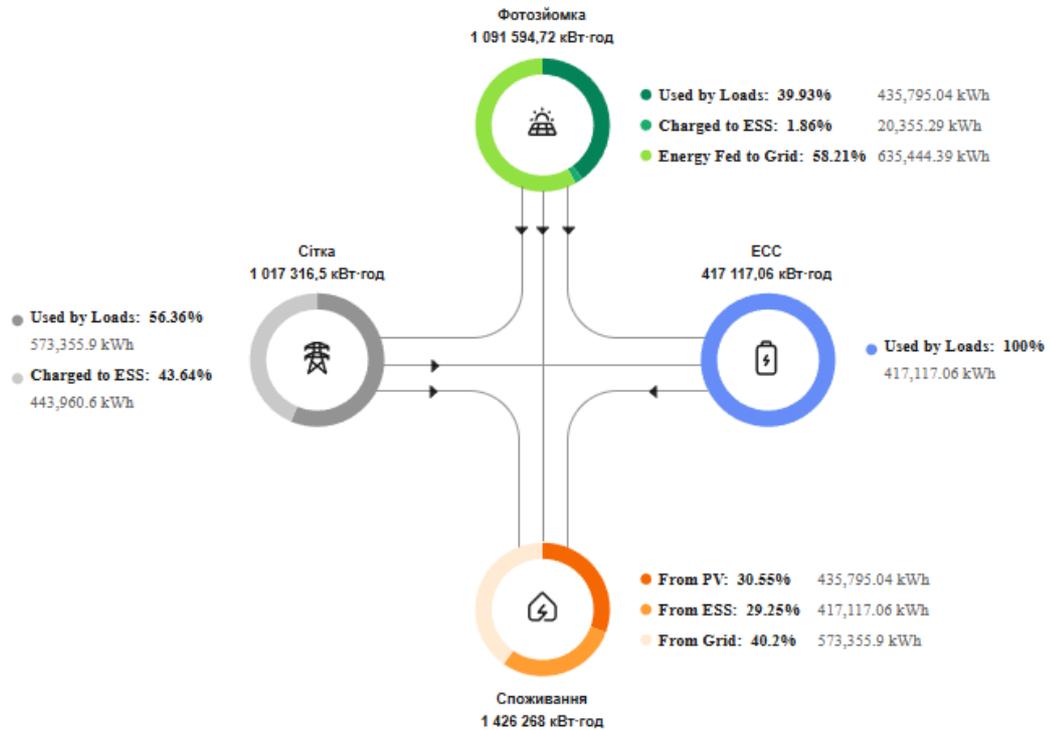


Рисунок 5.5 – Графічну модель управління енергією у SmartDesign.

Узагальнена структура споживання демонструє, що із загального річного навантаження підприємства на рівні 1 426 268 кВт·год 59,8 % було забезпечено власними джерелами – сонячною генерацією та УЗЕ. Зовнішня мережа покрила лише 40,2 % потреб, що суттєво зменшує залежність від коливань цін на електроенергію та підвищує енергетичну автономність підприємства. Місячний графік підтверджує сезонність роботи комплексу: у літні місяці СЕС повністю перекриває денні потреби, тоді як УЗЕ вирівнює нерівномірність графіка споживання в осінньо-зимовий період. Таким чином, система управління енергією забезпечує високий рівень самоспоживання, ефективне використання виробленої енергії та стабільне зниження витрат на електропостачання, що підтверджує доцільність і технологічну ефективність інтеграції СЕС та УЗЕ в мережеву архітектуру підприємства.

Аналізуючи економічну ефективність впровадження автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії, наведений на рисунку 5.6, демонструє суттєві фінансові переваги даного рішення. Початкові капітальні інвестиції становлять 66 631 524,64 грн, що включає витрати на обладнання, монтаж, пусконаладжувальні роботи та інтеграцію системи керування. За результатами моделювання термін окупності проєкту складає 7,38 років, що є економічно обґрунтованим і конкурентним показником для енергетичних проєктів такого масштабу. Це свідчить про високу здатність системи генерувати економічний ефект після завершення первинного інвестиційного циклу.

Економічні вигоди

Накопичений чистий прибуток за 25 років: **1 550 315 980,73** грн.

Огляд рентабельності інвестицій

66 631 524,64 грн.
Початкова інвестиційна вартість

66 631 524,64 грн.
Власні кошти

0 гривень
Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування

1 271 454 663,21 грн.
Чиста поточна вартість (NPV)

23 %
Внутрішня норма
прибутковості (ВНР)

7,38 років
Термін окупності

11,52 грн /кВт·год
LCOE

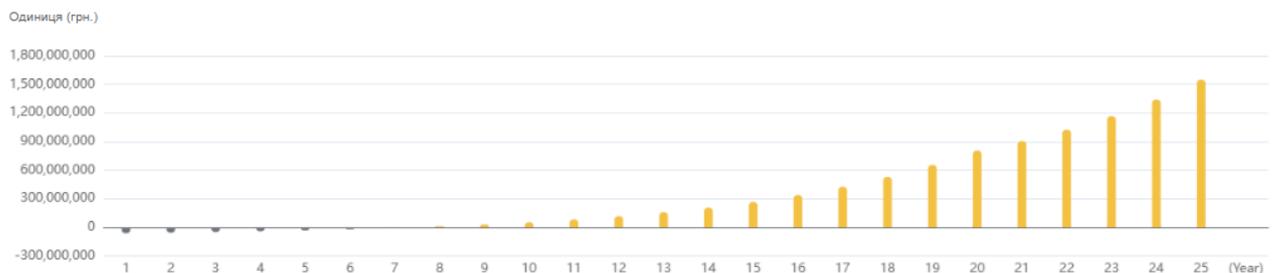


Рисунок 5.6 – Показники рентабельності інвестицій автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії у SmartDesign.

Важливо підкреслити, що модель розрахунків відображає лише прямі фінансові вигоди у вигляді зменшення витрат на електроенергію та

оптимізації структури споживання, тоді як додаткові економічні ефекти у розрахунок не включено. Зокрема, система не враховує потенційні втрати підприємства у разі вимушеної зупинки виробничих процесів під час аварійних або планових відключень зовнішньої електромережі. У реальних умовах наявність УЗЕ дозволяє уникати простоїв, що може забезпечувати підприємству значну додаткову економію та скорочення ризиків.

Таким чином, фактична результативність проєкту здатна бути вищою за змодельовані показники, що робить інвестицію в систему ще більш виправданою з економічного погляду.

Висновок: У результаті проведеного моделювання автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії на основі програмного середовища Huawei SmartDesign отримано комплексну оцінку технічної та економічної ефективності енергетичного комплексу. Побудований цифровий прототип дав змогу дослідити реальні умови функціонування системи, визначити закономірності взаємодії між СЕС, УЗЕ, зовнішньою мережею та навантаженням підприємства, а також дослідити вплив часової структури споживання на результати роботи системи.

Аналіз енергетичних потоків показав, що інтеграція УЗЕ значно підвищує рівень самоспоживання та зменшує пікові навантаження, забезпечуючи 59,8 % річного споживання підприємства за рахунок власної генерації. Система ефективно керує розподілом енергії, оптимізує цикл зарядження й розрядження УЗЕ та дозволяє використовувати вигідні тарифи ринку «на добу наперед».

Економічна оцінка підтвердила високу інвестиційну привабливість проєкту: при вартості 66,63 млн грн термін окупності становить 7,38 років. Оскільки модель враховує лише прямі фінансові вигоди, а не додаткові переваги на кшталт уникнення простоїв під час відключень, реальна ефективність системи може бути ще вищою.

Отже, результати проведеного моделювання підтверджують доцільність інтеграції системи СЕС та УЗЕ у мережеву архітектуру підприємства та демонструють, що запропонована автоматизована система керування забезпечує значне підвищення енергоефективності, економічної вигоди та рівня енергетичної незалежності. Отримані дані є обґрунтуванням практичної цінності застосованих технічних рішень і підтверджують правильність вибору архітектури та алгоритмів керування.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів об'єкта

У цьому розділі магістерської роботи розглянуто комплекс питань з охорони праці, які враховано під час організації оперативного обслуговування обладнання сонячної електростанції та установки зберігання енергії. Проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що впливають на оперативно-ремонтний електротехнічний персонал під час виконання робіт.[26,27]

Об'єктом дослідження є мережева архітектура сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії, інтегроване в енергосистему підприємства та оснащене засобами автоматизованого керування.

Технологічний комплекс включає фотоелектричні модулі, інверторне обладнання, високовольтні DC-ланцюги до 1500 В, акумуляторні батареї значної енергоємності, шафи комутації AC/DC, систему моніторингу SmartLogger/EMS, а також силові кабельні мережі та захисну апаратуру. Усі перелічені елементи формують специфічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що потребують детального аналізу та врахування при експлуатації.

Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98, ДБН В.1.1-7:2021 та ДСТУ EN 62446, на підприємстві можуть діяти такі групи небезпечних факторів [24]:

- 1) Електричні небезпечні фактори. Робота з високовольтними колами, зокрема у DC-ланцюгах напругою до 1500 В та AC-мережах 400–800 В, створює небезпеку ураження електричним струмом при прямому або непрямому контакті. Значну загрозу становлять дугові розряди (Arc Flash), що можуть виникати під час пошкодження DC-стрінгів або комутаційних апаратів та супроводжуються різким виділенням теплової енергії й утворенням опіків. Не менш небезпечними є пробіи ізоляції та перенапруги, спричинені грозовими імпульсами чи аварійними переходними процесами в

інвертори. Крім того, інвертори та комутаційне обладнання генерують електромагнітні поля, що здатні негативно впливати на персонал при тривалому перебуванні у таких зонах.

2) Теплові та пожежонебезпечні фактори. У зоні великої концентрації DC-кабелів можливий їх надмірний нагрів, особливо у періоди пікової генерації. Додатковий ризик пов'язаний із роботою інверторного обладнання та перетворювачів PCS, які під час тривалої роботи виділяють значну кількість тепла, що потребує постійної вентиляції. Особливу небезпеку становлять акумуляторні батареї УЗЕ, оскільки їхня некоректна експлуатація або внутрішні дефекти можуть спричинити явище термічного розгону (thermal runaway), що супроводжується різким підвищенням температури, виділенням газів і потенційним займанням. Короткі замикання у кабельних лініях або погані контакти також можуть стати джерелами пожежі.[25]

3) Механічні небезпечні фактори. Під час монтажу, технічного обслуговування та експлуатації виникають механічні небезпеки. До них належить можливість травмування при переміщенні та встановленні важких модулів обладнання, таких як батарейні шафи, інвертори чи силові щити. Роботи на висоті під час огляду або ремонту дахових фотоелектричних модулів створюють ризик падіння працівників чи інструменту.

4) Хімічні та токсикологічні фактори. Певну загрозу також становлять хімічні та токсикологічні фактори, характерні для частини акумуляторних технологій. При пошкодженні батарей можливе виділення газів або аерозолів, утворення диму, а у випадку руйнування осередків - поява слідів електроліту чи токсичних продуктів розкладу. Ці явища небезпечні для органів дихання та потребують спеціальних заходів локалізації.

5) Психофізіологічні фактори. Не можна ігнорувати й психофізіологічні фактори, адже робота з електроустановками напругою до

1500 В вимагає високої концентрації уваги і не допускає помилок. Під час аварійних ситуацій, раптових відключень або пожеж персонал може зазнавати стресових навантажень, що впливає на швидкість і правильність прийняття рішень. Тривале статичне навантаження, монотонна діагностика стрінгів або кабельних трас також можуть спричинити втому та зниження працездатності.

Аналіз показав, що робота СЕС та УЗЕ пов'язана з дією низки небезпечних і шкідливих факторів: високими напругами DC та AC, ризиком пожежі й перегріву обладнання, механічними та хімічними впливами, а також можливими відмовами автоматизованих систем керування. Це вимагає підвищених заходів безпеки, чіткої організації робочих місць та належної підготовки персоналу. Отримані дані є основою для подальших технічних рішень щодо безпечної експлуатації об'єкта.

6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

6.2.1 Безпечна організація робочих місць під час оперативного обслуговування електроустановок

Безпечна організація робочих місць при обслуговуванні обладнання сонячної фотоелектричної станції та установок зберігання енергії є одним із ключових елементів забезпечення надійної експлуатації об'єкта. Умови роботи персоналу визначаються наявністю високих напруг постійного і змінного струму, можливістю виникнення дугових розрядів, перегріву або пошкодження інверторних модулів, а також впливом кліматичних та технологічних чинників. Тому організація робочих місць має бути спрямована на мінімізацію контакту працівників із джерелами підвищеної небезпеки.

Оперативне обслуговування електроустановок може виконуватися як місцевим оперативним або оперативно-ремонтним персоналом, закріпленим за конкретною установкою, так і виїзними працівниками, які обслуговують

групу електроустановок. Порядок організації такого обслуговування, кількість чергового персоналу та його розподіл по змінах визначаються відповідальним за електрогосподарство та погоджуються з керівництвом підприємства і закріплюються у місцевих інструкціях. До оперативної роботи допускаються працівники, які добре знають оперативні схеми, експлуатаційну документацію, вимоги охорони праці, особливості обладнання, а також пройшли навчання, дублювання та перевірку знань ПБЕ ЕЕС і ПТЕ ЕЕС.

Працівники, що виконують оперативні дії одноосібно або є старшими зміни, повинні мати групу IV з електробезпеки для установок понад 1000 В та групу III - для установок до 1000 В. Робота оперативного персоналу здійснюється за графіком, затвердженим відповідальною за електрогосподарство особою.

Під час виконання оперативних перемикань або технічного обслуговування у щитах АС/DC повинна бути забезпечена чітка видимість робочих зон, наявність нормованого освітлення та безперешкодний доступ до апаратури. Робочі місця необхідно обладнувати діелектричними килимками, ізольованими підставками та відповідними попереджувальними знаками, що вказують на наявність високої напруги. Дверцята розподільних шаф мають бути оснащені блокуваннями від відкриття під напругою, а органи керування – захистом від випадкового натискання.

Організація робочих місць передбачає також наявність оперативної документації: журналів перемикань, інструкцій, схем електроз'єднань та програм керування. Чітка послідовність дій працівників мінімізує ризик помилок та забезпечує узгодженість їхніх дій у небезпечних умовах. Особливо важливою є координація роботи між персоналом, який обслуговує інвертори, PCS та систему керування Logger/EMS, оскільки некоректні перемикання можуть призвести до аварійних режимів роботи системи.

Отже, правильно організовані робочі місця в зоні експлуатації електроустановок СЕС та УЗЕ забезпечують чітку і безпечну роботу персоналу, мінімізують ймовірність травмування та сприяють надійній і безперервній роботі енергетичної системи підприємства.

6.2.2 Електробезпека

Електробезпека у системі сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії є одним із найважливіших аспектів експлуатації, оскільки об'єкт характеризується підвищеним рівнем електричної небезпеки. У конструкції СЕС наявні високовольтні кола постійного струму, які зберігають напругу навіть після відключення інвертора, що створює небезпеку ураження струмом при порушенні ізоляції або дотику до оголених частин. УЗЕ, у свою чергу, містять батарейні модулі з великою енергоємністю, здатні у разі пошкодження до створення коротких замикань із виділенням значної кількості тепла.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам під час виконання робіт:

1) Для запобігання електротравм від контакту зі струмопровідними елементами електроустаткування потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні – написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати в закритих конструкціях підлоги.

2) Ключовим елементом електробезпеки є захист від прямого та непрямого дотику. Для цього використовуються захисні кожухи, бар'єри та конструктивні обмеження доступу до токоведучих частин. Персонал повинен виконувати роботи лише після перевірки відсутності напруги на обладнанні, встановлення заземлень та блокувань, що унеможливають випадкове увімкнення.

3) Важливою складовою є також система моніторингу, що здійснюється SmartLogger та контролерами EMS. Постійний контроль напруги, струмів, температури та ізоляції дозволяє своєчасно виявляти несправності, запобігати небезпечним режимам роботи та знижувати навантаження на персонал. У разі відхилення параметрів система автоматично переводить обладнання в безпечний режим або вимикає його.

Забезпечення електробезпеки в системах СЕС та УЗЕ є ключовою умовою їх надійної та безпечної експлуатації. Використання захисної апаратури, систем автоматичного відключення, правильне заземлення, постійний моніторинг параметрів та дотримання вимог ПУЕ 2017 й НПАОП значно знижують ризик ураження електричним струмом і виникнення аварійних режимів. Поєднання технічних заходів із належною підготовкою персоналу формує комплексний захист, що забезпечує безпечні умови роботи та стабільність функціонування енергетичного обладнання.[28]

6.2.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека об'єкта, що включає сонячну електростанцію та установки зберігання енергії, є критично важливою, оскільки частина обладнання працює з високими енергетичними навантаженнями, здатними спричинити займання у разі несправності або перегріву. Основними джерелами потенційної пожежної небезпеки виступають інверторні модулі, високовольтні кабельні лінії, з'єднувальні коробки стрінгів та, особливо, акумуляторні батареї УЗЕ.

Щоб мінімізувати ймовірність займання, обладнання має бути встановлене згідно з вимогами ДБН В.1.1-7, ДСТУ EN 62446 та ПУЕ. Приміщення, у яких розміщуються батарейні модулі, повинні бути обладнані вентиляційними системами, датчиками диму, температури та газових викидів.[28] Наявність постійного моніторингу стану УЗЕ дозволяє

своєчасно виявляти перегрів або початкові ознаки термічного розгону, що є основними причинами пожеж у системах накопичення енергії.

Важливо, щоб у разі виникнення пожежі система могла автоматично знеструмити уражену ділянку. Для цього використовуються аварійні кнопки відключення та алгоритми аварійного вимкнення інверторів і PCS. Знеструмлення дозволяє уникнути подальшого поширення полум'я та полегшує роботу аварійних служб.

Дотримання протипожежних вимог неможливе без чіткої організації дій персоналу. Працівники повинні проходити регулярні інструктажі з пожежної безпеки, знати порядок евакуації, місця розташування засобів пожежогасіння та правила використання вогнегасників. Правильно організована система пожежної безпеки не лише знижує ризик виникнення пожежі, але й забезпечує можливість швидкого реагування у разі її виникнення.

6.3 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях на об'єктах, що включають сонячну електростанцію та установки зберігання енергії, ґрунтується на своєчасному виявленні аварійних станів, правильній організації дій персоналу та застосуванні технічних засобів, що дозволяють локалізувати небезпечні процеси та мінімізувати їх наслідки. Надзвичайні ситуації в таких енергетичних комплексах можуть бути пов'язані з пожежами, термічним розгоном акумуляторних батарей, короткими замиканнями у високовольтних DC-ланцюгах, відмовами інверторного або комутаційного обладнання, а також з аварійними станами мережі зовнішнього електропостачання.

Особливої уваги потребують дії персоналу у ситуаціях, пов'язаних із термічним розгоном акумуляторних батарей. Ознаками такого стану є підвищення температури, характерний запах, дим або виділення газів. У разі

виявлення подібних явищ обладнання має бути негайно відключене, а персонал - виведений із небезпечної зони. Забороняється відкривати батарейні модулі або намагатися гасити їх без спеціальних засобів, оскільки це може погіршити ситуацію. Датчики диму і температури, а також системи моніторингу EMS дозволяють своєчасно виявляти передаварійні режими та запобігати розвитку небезпечних процесів.

У випадку ураження людини електричним струмом працівники повинні негайно знеструмити електроустановку, не торкаючись потерпілого до усунення напруги, а після цього - надати першу долікарську допомогу та викликати швидку медичну допомогу. Дотримання чіткої послідовності дій дозволяє зберегти життя та запобігти вторинним травмам.

Дії персоналу при аваріях інверторів, втраті зв'язку зі SmartLogger або некоректній роботі EMS повинні бути спрямовані на переведення системи в безпечний режим, визначений алгоритмами керування. У разі неконтрольованих перетоків енергії чи збоїв у роботі обладнання необхідно негайно припинити генерацію, вивести інвертори з мережі та провести діагностику причин відмови. При аваріях зовнішньої мережі (обриви, перенапруги, частотні відхилення) система повинна автоматично відключатись від мережі відповідно до вимог ПУЕ та стандартів енергетичної безпеки.

Узагальнюючи викладене, система безпеки в надзвичайних ситуаціях базується на поєднанні технічних засобів захисту, алгоритмів автоматизованого керування та чітких дій підготовленого персоналу. Вона забезпечує своєчасне виявлення аварійних процесів, ефективну локалізацію наслідків та збереження життя і здоров'я працівників під час експлуатації СЕС та УЗЕ.

Висновки: Проведено огляд та планування заходів щодо безпечної експлуатації об'єкта дослідження з урахуванням особливостей його роботи в різних режимах. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі

фактори, проаналізовано специфіку їх впливу на персонал, а також сформовано комплекс технічних, організаційних і протиаварійних рішень, спрямованих на мінімізацію ризиків під час експлуатації СЕС та УЗЕ. У роботі розглянуто вимоги електробезпеки, пожежної безпеки та безпечної організації робочих місць, а також заходи реагування на надзвичайні ситуації, що забезпечують належний рівень захисту персоналу, обладнання та стабільність функціонування енергетичного комплексу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи за темою «автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії» були розроблені та обґрунтовані технічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності роботи системи керування та оптимізацію взаємодії між СЕС і УЗЕ. У результаті проведених досліджень встановлено, що актуальність тематики зумовлена глибокими трансформаціями сучасної енергосистеми, яка переходить до моделей децентралізованого та цифровізованого енергопостачання з активним залученням відновлюваних джерел енергії. За умов зростання частки сонячної генерації особливого значення набувають питання забезпечення стійкості електричних мереж, раціонального розподілу енергопотоків та підвищення загальної енергоефективності роботи енергетичних комплексів.

У ході дослідження було отримано такі результати досліджень:

1. Проаналізовано особливості функціонування мережевих сонячних фотоелектричних станцій, сучасні тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії та концепції інтеграції систем накопичення електроенергії. Визначено ключові вимоги до автоматизованих систем керування СЕС з УЗЕ, що працюють у мережевому режимі, включаючи підтримку нульового експорту, балансування енергопотоків та забезпечення стабільності енергосистеми.
2. Обґрунтовано необхідність і принципи формування структури автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ. Визначено функціональні цілі, вимоги до системи, технічні та інформаційні потоки, а також параметри основних елементів СЕС і системи накопичення енергії, необхідні для забезпечення стабільної роботи мережевого комплексу.

3. Виконано вибір та розрахунок складових мережевої архітектури СЕС та УЗЕ. Обрано оптимальні параметри фотоелектричних модулів, мережевих інверторів, модулів накопичення енергії, комунікаційних пристроїв та контролерів керування енергопотоками для забезпечення узгодженої роботи системи.
4. Розроблено структурну схему автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС з УЗЕ. Розроблено алгоритм керування енергопотоками, що визначає логіку взаємодії СЕС, УЗЕ, зовнішньої мережі та EMS-контролерами. Запропоновано оптимізаційні алгоритми зарядження/розрядження УЗЕ та обмеження експорту електроенергії.
5. Виконано моделювання роботи автоматизованої системи керування в середовищі SmartDesign. Побудовано цифрову модель системи в програмному середовищі SmartDesign, що включає моделі фотоелектричних модулів, інверторів, системи накопичення та навантаження підприємства. Досліджено режими енергоспоживання, ефективність роботи УЗЕ, сезонні коливання генерації та особливості розподілу енергії в різних режимах.
6. Проведено техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ. Розраховано капітальні та експлуатаційні витрати, визначено економію від впровадження оптимізованого керування та алгоритмів балансування енергії. Підтверджено економічну доцільність інтеграції СЕС та УЗЕ: повна окупність системи становить близько 7,13 року.
7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації автоматизованої системи керування мережевою архітектурою СЕС та УЗЕ. Встановлено небезпечні та шкідливі фактори, що впливають на персонал та обладнання. Сформовано комплекс технічних, організаційних і протиаварійних заходів, включаючи вимоги

електробезпеки, пожежної безпеки, безпечної організації робочих місць та дій у надзвичайних ситуаціях.

Враховуючи всі аспекти, можна зробити висновок, що впровадження автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії є технічно обґрунтованим, економічно доцільним і актуальним у контексті сучасних вимог до енергоефективності та надійності електропостачання. Розроблена система забезпечує оптимізацію енергопотоків, стабільність роботи СЕС у умовах зростаючої частки відновлюваної генерації, підвищує рівень автономності підприємства, сприяє зменшенню витрат на електроенергію та підтримує режим нульового експорту. Використання інтелектуальних алгоритмів керування та моделей УЗЕ дозволяє покращити гнучкість, керованість і ефективність енергетичного комплексу, що підтверджується результатами моделювання та техніко-економічного аналізу. Таким чином, запропоноване рішення відповідає сучасним тенденціям цифровізації енергетики та створює передумови для подальшого розвитку децентралізованих систем електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Вартість електроенергії в Україні [Електронний ресурс].URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/zrostannia-taryfiv-na-elektroenerhiu-boliuche-ta-nemynuche>.

2 Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/3323872>

3 Мережева сонячна електростанція [Електронний ресурс].URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%B2%D0%B0_%D1%81%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F

4 GSL Energy, “What is BESS? A comprehensive overview of Battery Energy Storage Systems,” [Електронний ресурс].URL: <https://www.gsl-energy.com/what-is-bess-a-comprehensive-overview-of-battery-energy-storage-systems.html>

5 Відновлювані джерела енергії / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. –392с.

6 Deye AI-W5.1-B (EU, NA, AU) LFP Lithium-Ion Battery Modular Energy Storage [Електронний ресурс].URL: <https://deye.com/product/ai-w5-1-b/>

7 ENcombi ECpvX microgrid controller On and off-grid energy management of microgrids [Електронний ресурс]. URL: <https://www.encombi.com/howitworks/microgrid/>

8 EnOS™ Power Plant Controller (PPC) [Електронний ресурс]. URL: <https://univers.com/products/enos-ppc/>

9 SCADA система [Електронний ресурс]. URL: <https://svitovyr.ua/SCADA/>

10 Перспективи побудови та розвитку децентралізованої енергетичної системи України на основі мікромереж [Електронний ресурс]. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/0112a9c8-5a16-4f7a-9dec-88cfb8ac7a53/content>

11 Розробка системи управління енергетичними ресурсами (EMS) [Електронний ресурс]. URL: <https://pandateam.net.ua/energy-management-system/>

12 Що таке енергетична безпека і чому це надважливо для України? [Електронний ресурс]. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/partner/energobezpeka/>

13 The European Green Deal [Електронний ресурс]. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

14 Мікромережі та віртуальні електростанції: трансформація управління енергією [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.acebattery.com/blogs/microgrids-and-virtual-power-plants-transforming-energy-management>

15 Інноваційний термінал «Нової пошти» [Електронний ресурс]. URL: <https://agroimport.in.ua/KyivInnovationTerminal>

16 «Нова пошта» запустила першу СЕС і будує амбітні плани. [Електронний ресурс]. URL: <https://forbes.ua/company/tsina-energonezalezhnosti-11-mln-nova-poshta-zapustila-pershu-ses-i-budue-ambitni-plani-yaki-proekti-zaplanuvav-naybilshiy-poshtoviy-operator-kraini-14012025-26266>

17 Вимоги до генеруючих установок та УЗЕ [Електронний ресурс]. URL: <https://voe.com.ua/vymohy-do-heneruyuchykh-ustanovok-ta-uze-0>

18 Система управління енергоресурсами для підприємств [Електронний ресурс]. URL: <https://energystorage.com.ua/resheniya/sistema-upravleniya-energopotrebleniem-ems/>

19 LUNA2000-215-2S10 Microgrid Energy Storage Solution [Електронний ресурс]. URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/fusionsolar/luna2000b-pid-255740921?category=operation-maintenance>

20 Електрична схема [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0

21 Алгоритм: що це таке і для чого він потрібен [Електронний ресурс]. URL: <https://mathema.me/blog/algorithm-shho-cze-take/>

22 Huawei SmartDesign. – Huawei Digital Power. [Електронний ресурс]. URL: <https://solar.huawei.com/eu/smartdesign>

23 Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії (РДН) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/pricetr>

24 ДБН В.1.2-7:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека [Електронний ресурс]. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3642336366991247348?doc_type=2

25 What Is Thermal Runaway? [Електронний ресурс]. URL: <https://ul.org/research-updates/what-is-thermal-runaway/>

26 ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

27 ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2009 Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги [Електронний ресурс]. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074220455066862610

28 ПУЕ 2017 [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758

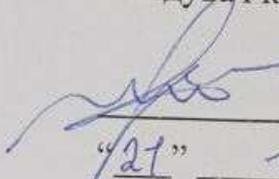
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.


Микола МОШНОРІЗ

«21» 10 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

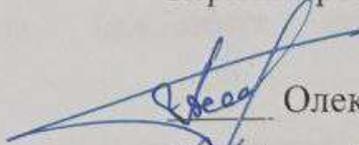
на магістерську кваліфікаційну роботу

**«АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ
АРХІТЕКТУРНОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З
УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ»**

08-24.МКР.003.00.000 ТЗ

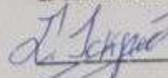
Керівник роботи

к.т.н., доц.


Олександр ПАЯНОК

«21» 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-24м


Богдан ІСКРА

«21» 10 2025 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії».

Скорочене найменування розробки – «Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем кваліфікаційного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Розроблена автоматизована система керування призначена для оптимального управління мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії. Система забезпечує баланс енергопотоків, дотримання режиму нульового експорту, підвищення енергоефективності та надійності електропостачання підприємства.

Галузь використання охоплює промислові, комунальні та комерційні енергетичні об'єкти, де необхідна інтеграція СЕС, УЗЕ та мережевої інфраструктури в рамках концепцій Smart Grid та Microgrid.

4 Вимоги до розробки

Основними вимогами до проєкту є забезпечення наступних вимог:

Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії призначена для забезпечення стабільної та безперебійної роботи енергетичного комплексу. Вона повинна бути здатною адаптуватися до змінних умов експлуатації, інтегруватися з різними типами обладнання та систем керування, а також гарантувати високий рівень надійності. Крім того, система має забезпечувати захист від несанкціонованого доступу та відповідати вимогам інформаційної та технічної безпеки.

5 Комплектація розробки

Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання енергії містить фотоелектричні модулі типу Risen RSM132-8-665M, мережевий інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M2, реєстратор даних Smart Logger 3000a без PLC, УЗЕ LUNA2000-215KWH-2S10 пристрій керування ComAp, mains controller та лічильники електроенергії ACE6000.

6 Джерела розробки

1. Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/3323872>
2. LUNA2000-215-2S10 Microgrid Energy Storage Solution [Електронний ресурс]. URL: https://support.huawei.com/enterprise/en/fusionsolar/luna2000b-pid_255740921?category=operation-maintenance
3. Відрновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.

7 Технічні характеристики

Таблиця 7.1 – Паспортні дані контролера

Параметри	Значення
Функціональне призначення	Контролер для управління гібридними мікромережами (он-/офф-грид) з ВДЕ та системами зберігання енергії
Живлення: діапазон	8–36 V DC
Споживання потужності	~16 Вт.
Робоча температура	від –40 °С до +70 °С.
Номінальна напруга, U_n	115 V фаз-нейтраль (ph-N) / 200 V фаз-фаза (ph-ph), також допустимі 231 V ph-N / 400 V ph-ph.
Номінальна частота, f_n	40-70 Hz
Максимальний безперервний струм	2 А / 10 А.
Діапазон вимірювання струму	1 А / 5 А
Розміри НхВхD	290х230х80
Вага	0,750 кг
Ступінь захисту	IP 20
Комутаційні порти	32x Modbus RTU/TCP 64x CAN FD

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячною фотоелектричною станцією з установками зберігання електроенергії, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т. ін. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

10 Конструктивне виконання

Пристрій керування виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

11 Показники технологічності

Система має модульну та уніфіковану структуру, що забезпечує простоту монтажу, інтеграції та подальшого розширення. Вбудовані засоби діагностики та стандартні інтерфейси підвищують зручність обслуговування та сумісність з обладнанням різних виробників.

12 Технічне обслуговування та ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на місяць. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками фахівцями з електромеханічних систем і комплексів.

13 Живлення автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії

Живлення системи керування повинно бути виконано напругою 380 В від силової мережі підприємства.

14 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

**«АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЮ
АРХІТЕКТУРНОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З
УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ»**

Об'єкт, предмет, мета, задачі дослідження, актуальність теми

Актуальність теми. Розробка системи керування сонячною електричною станцією (СЕС) з точкою нульового експорту електроенергії є надзвичайно актуальною у світлі переходу до відновлюваних джерел енергії. Зростання глобального попиту на енергію та необхідність зменшення викидів шкідливих речовин робить сонячну енергію привабливим варіантом. В Україні, де є великий потенціал для розвитку сонячної енергетики, особливо актуальною ця тема стала під час енергетичної війни, яка завдала значних збитків енергетичній інфраструктурі. Ці системи дозволять автоматизувати процеси регулювання виробництвом електроенергії відповідно до поточних умов, підвищуючи ефективність та конкурентоспроможність підприємств.

Об'єктом дослідження виступає система керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.

Предметом дослідження є розробка та впровадження системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.

Мета дослідження. Метою роботи полягає в розробці та впровадженні системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії для забезпечення стабільності електропостачання підприємств, ефективності та оптимізації використання максимального ресурсу сонячної генерації.

Завдання дослідження. Поставлена мета обумовлена необхідністю вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз теоретичних основ розробки системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії;
- Здійснити аналіз існуючих систем керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії;
- Проведення техніко-економічних обґрунтування впровадженню таких систем керування;
- Здійснити вибір обладнання для впровадження таких систем;
- Розробка схеми та впровадження сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.

Теоретичні основи розробки системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії

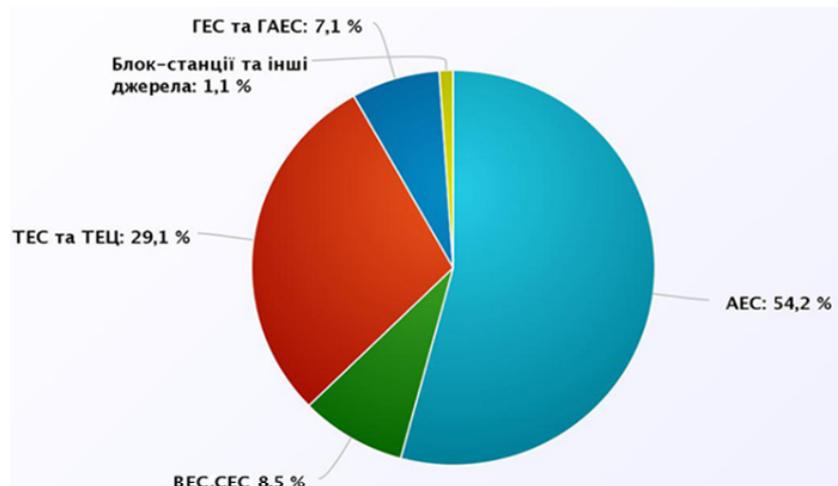


Рисунок 1 – Структура виробництва електроенергії в Україні

Розвиток сонячної енергетики в Україні є одним із ключовим напрямком у виробництві електроенергії. Враховуючи географічне положення та кліматичні умови Україна має перспективу динамічному зростанні в цій галузі, що і відбувається протягом останніх років та демонструється високий темп розвитку.

Розвиток сонячної енергетики в Україні має низку переваг:

- Екологічність.
- Відновлюваність.
- Розвиток робочих місць та розвиток технологій.
- Енергетична безпека.

Основними викликами для розвитку цієї галузі в Україні є:

- Висока первісна вартість будівництва СЕС.
- Нерегулярність процесу виробництва електроенергії.
- Необхідність розвитку технічних засобів керування СЕС

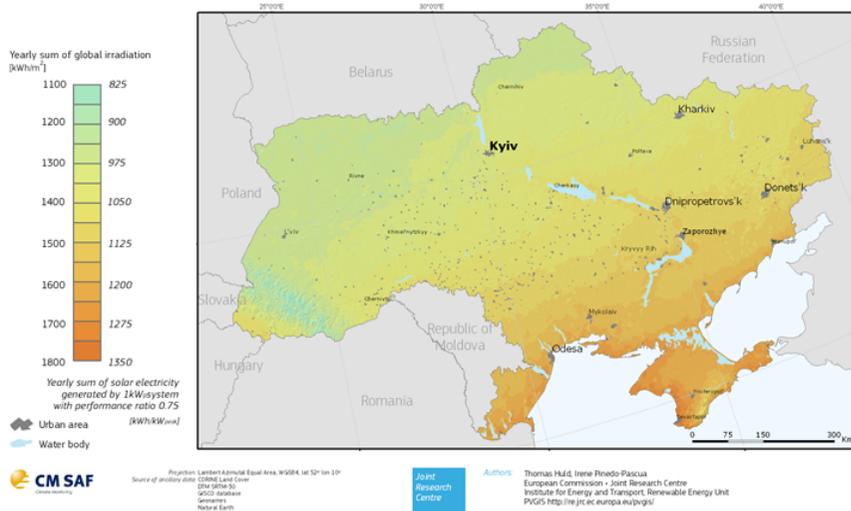


Рисунок 2 – Карта сонячної активності України

Види сонячних електростанцій

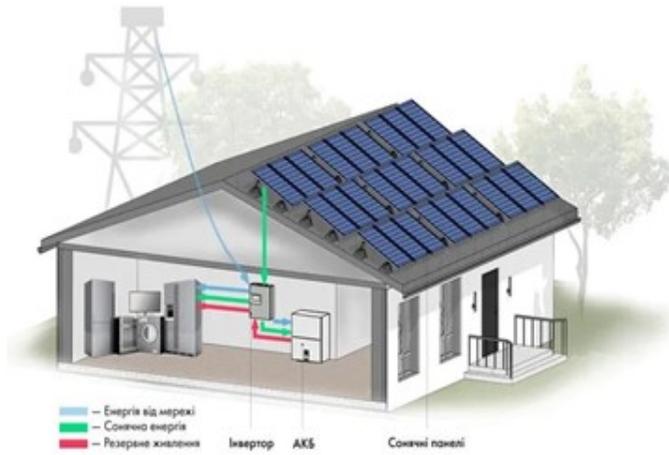


Рисунок 3 - Автономна сонячна електростанція

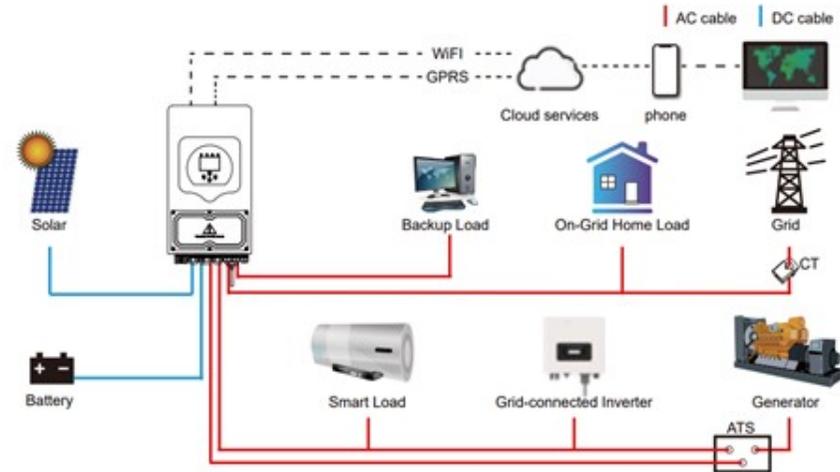


Рисунок 4 - Гібридна сонячна електростанція

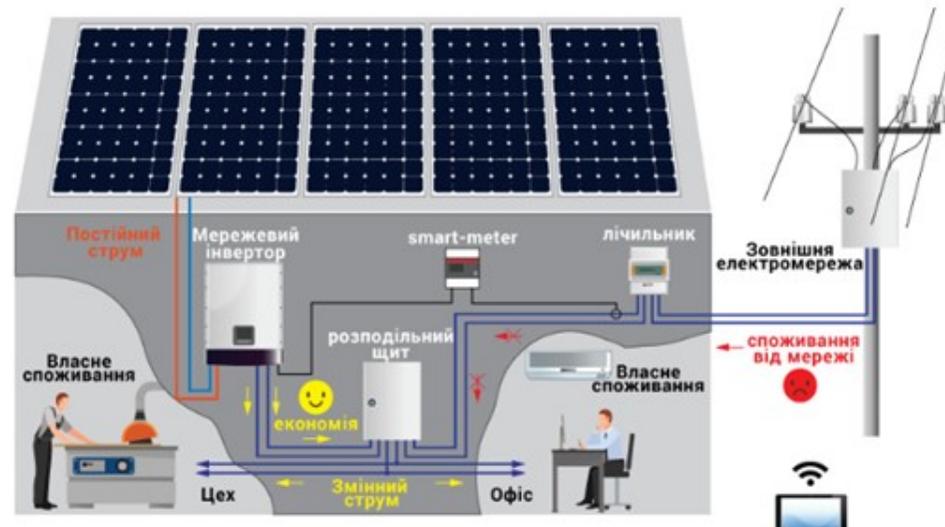


Рисунок 5 - Мережева сонячна електростанція

Аналіз існуючих системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії

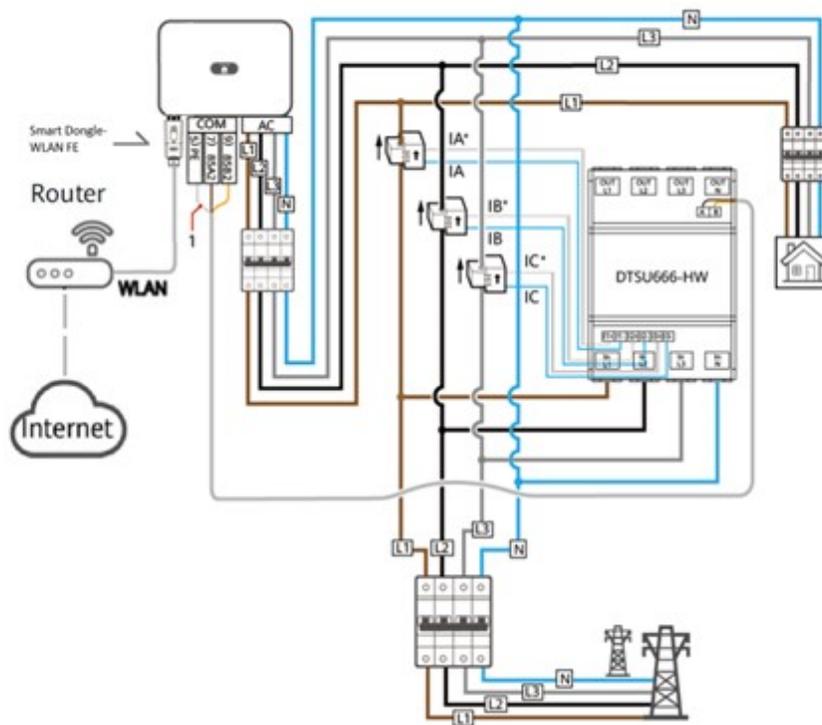
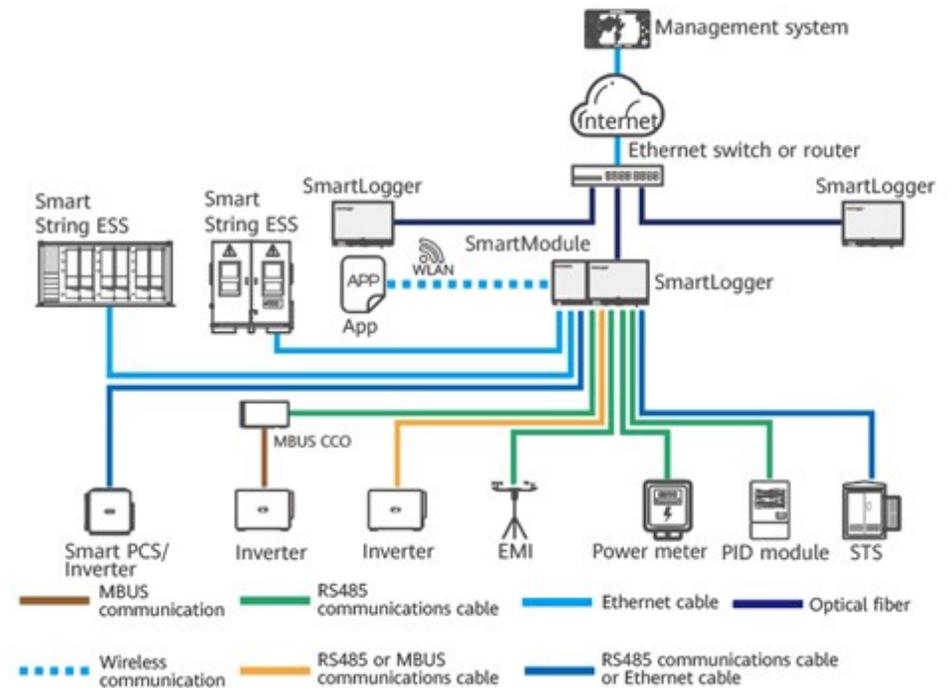


Рисунок 6- Існуюча схема підключення інвертора та системи керування сонячною електричною станцією для домогосподарств.



IL04N10008

Рисунок 7 - Існуюча схема підключення інверторів та системи керування сонячною електричною станцією для промислових об'єктів.

Аналіз існуючих систем керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії

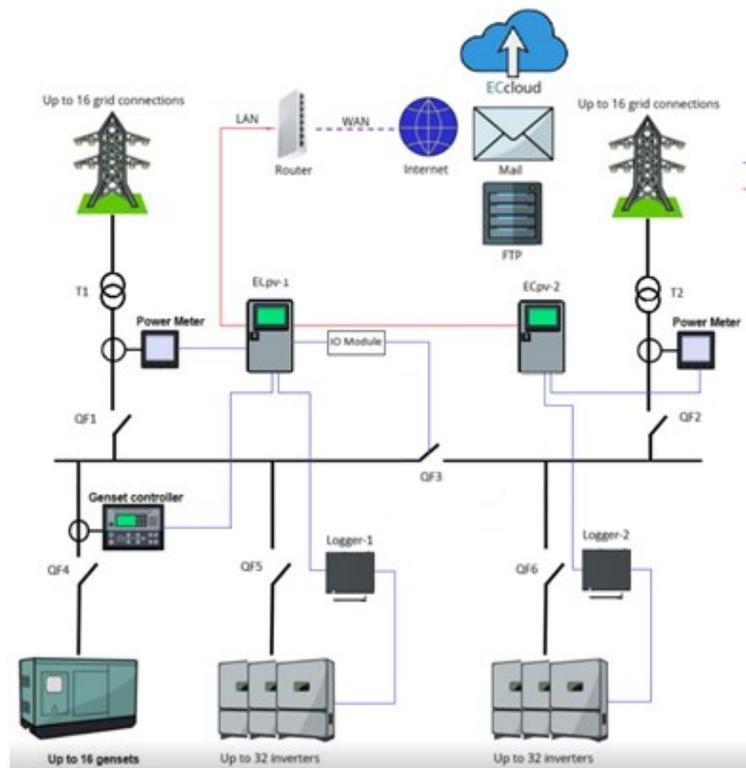


Рисунок 8 - Існуюча схема підключення інверторів та системи керування сонячною електричною станцією для промислових об'єктів у поєднанні роботи з іншими генеруючими установками.

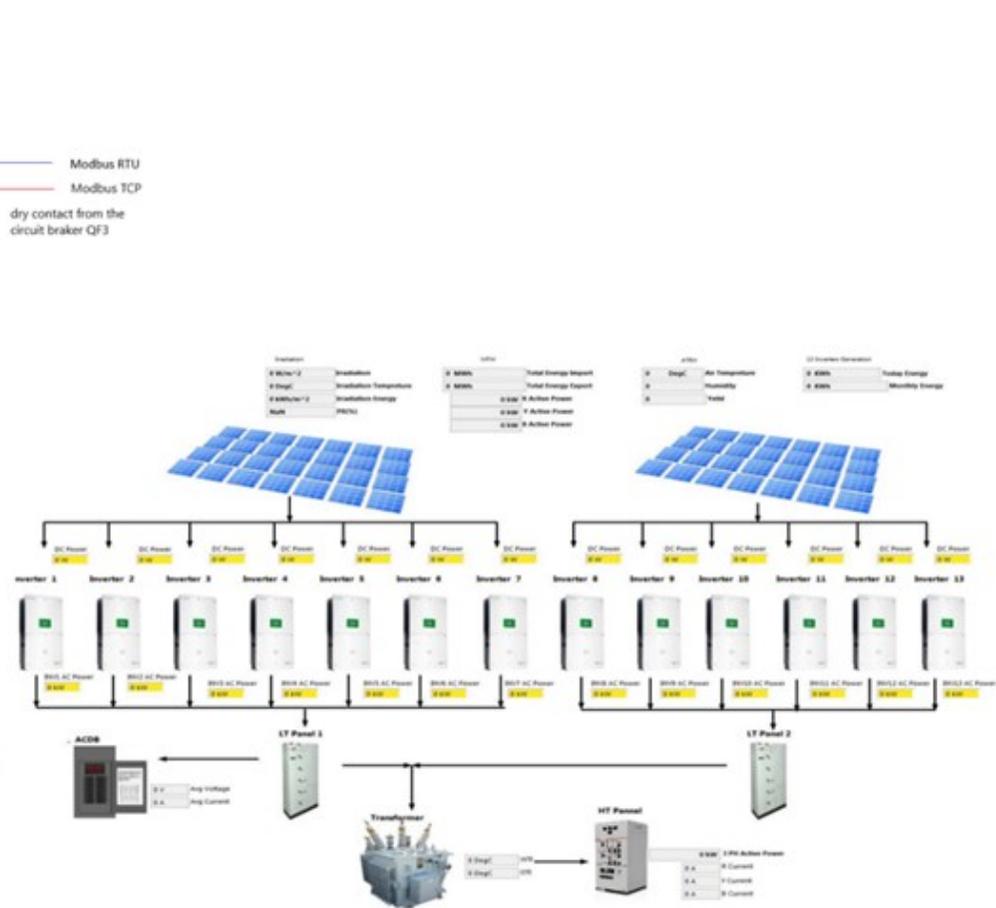


Рисунок 9 - Існуюча схема підключення інверторів та системи керування сонячною електричною станцією для промислових об'єктів за допомогою роботи SCADA-системи

Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи керування сонячною електричною станцією

Таблиця 3.2 з порівнянням переваг та недоліків "зеленого" тарифу та Net-Billing (Механізм самовиробництва):

Механізм	Переваги	Недоліки
"Зелений" тариф	<ol style="list-style-type: none"> 1) Високий тариф на енергію, вироблену з відновлюваних джерел енергії, що робить інвестиції привабливими. 2) Підтримка держави стимулює розвиток нових проектів у сфері відновлюваної енергетики. 3) Підтримка виробництва екологічно чистої енергії, зменшення викидів парникових газів. 4) Забезпечує стабільний дохід незалежно від коливань ринкових цін на електроенергію. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Дія "зеленого" тарифу обмежена до 2030 року. 2) Обмеження встановлення потужності генерації для домогосподарств. 3) Залежність від державних субсидій та політичних рішень щодо "зеленого" тарифу. 4) Бюрократичні труднощі та складний процес отримання дозволів для встановлення та експлуатації об'єктів відновлюваної енергетики.
Механізм самовиробництва	<ol style="list-style-type: none"> 1) Накопичення грошей за згенеровану електроенергію, що можуть бути використані для оплати власного споживання. 2) Стабільний механізм для власного споживання, зменшення витрат на електроенергію. 3) Зменшення витрат на купівлю електроенергії з мережі. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Ціна за 1 кВт-год залежить від ринкових цін 2) Складність прогнозування вигод через змінні ринкові ціни 3) Виробництво та споживання електроенергії повинні бути в балансі

Основними засобами сприяння розвитку галузі відновлювальних джерел енергії в Україні є:

- 1) Державна програма та законодавство
- 2) Фінансова підтримка
- 3) Підтримка наукових досліджень та інновацій:



Рисунок 10 - Приклад інтеграції СЕС разом з установкою системи накопичування енергії.

**Порівняння вартості та функцій пристроїв системи керування
сонячною електричною станцією
з точкою нульового експорту електроенергії.**

Параметри	Smart Dongle- WLAN-FE	Smart Logger 3000A	Encombi ECPV2	SCADA SolarPV
Функціональність	Базовий бездротовий моніторинг	Розширений моніторинг та керування	Моніторинг та керування, персоналізація	Комплексна система керування
Підтримка протоколів зв'язку	WLAN	RS485, Ethernet, 4G	RS485, Modbus, Ethernet	Modbus, OPC, DNP3
Підтримка інверторів	До 10	До 80	До 100	Понад 100
Зберігання даних	Обмежене	Розширене	Розширене	Розширене
Віддалений доступ	Так	Так	Так	Так
Інтерфейс користувача	Базовий	Покращений	Деталізований	Персоналізований
Ціна (USD)	50-100	600-800	2500	Від 10000
Переваги	1)Низька вартість. 2)Простота установки. 3)Зручний бездротовий зв'язок.	1)Висока надійність. 2)Розширені аналітичні можливості. 3)Підтримка великої кількості пристроїв. 4) Розширені функції моніторингу	1)Висока гнучкість. 2)Підтримка різних конфігурацій. 3)Можливість персоналізації 4) Сумісність з різними виробниками інверторів та систем.	1)Висока гнучкість у проектуванні. 2)Широка сумісність з різноманітним обладнанням і протоколами. 3)Повний контроль системи керування.
Недоліки	1)Обмежений набір функцій 2)Обмежене керування через віддалений доступ	1) Вища ціна порівняно з smart dongle. 2)Складніше налаштування	1) Висока ціна. 2)Потреба в додатковому налаштуванні.	1)Найвища вартість. 2)Може бути недоступною для проектів з обмеженим бюджетом. 3) Складне налаштування та обслуговування

Аналіз споживання підприємства



Рисунок 11 - Місцезнаходження підприємства.

Підприємства стають все більш зацікавленими у використанні відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна енергія, для забезпечення своїх потреб у електроенергії, що створює необхідність у проведенні аналізу споживання та визначення оптимальних рішень щодо впровадження ФЕС.

Для даного проекту розглядається сучасний комплекс з виробництва яєць і яєчних продуктів. Він розташований у Кам'янець-Подільському районі Хмельницькій області, яка знаходиться в західній частині України.

Підприємство складається з різних виробничих одиниць, які потребують значних обсягів електроенергії для свого функціонування та виробничих процесів. Включає складське приміщення для зберігання сировини та готової продукції, цехи забою курей, лінії сортування та упаковки яєць, комбікормовий завод та допоміжні приміщення та обладнання. Всі ці виробничі одиниці потребують значних обсягів електроенергії для свого функціонування та автоматизованих процесів, таких як освітлення, вентиляція, системи управління та інші, що вимагають електричної енергії.

Аналіз споживання підприємства

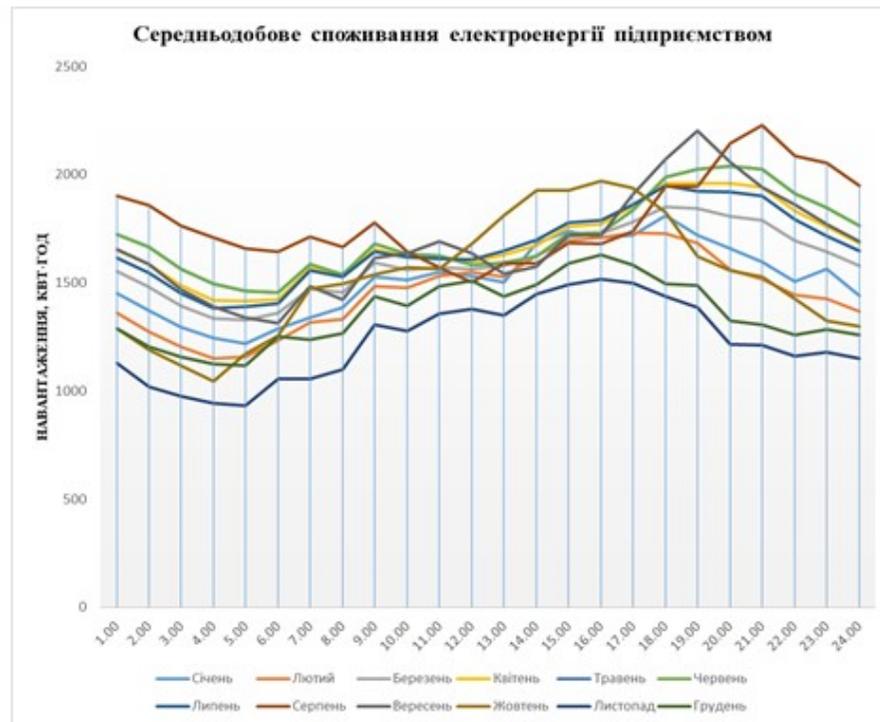


Рисунок 12 - Навантажувальна діаграма середньодобового споживання електроенергії підприємством.

Години	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
Січень	1452	1372	1296	1244	1218	1287	1340	1385
Лютий	1362	1275	1203	1149	1156	1233	1319	1333
Березень	1553	1480	1394	1333	1327	1362	1473	1453
Квітень	1651	1585	1488	1419	1414	1422	1566	1531
Травень	1724	1664	1562	1494	1462	1455	1585	1538
Червень	1724	1664	1562	1494	1462	1455	1585	1538
Липень	1615	1545	1451	1382	1389	1405	1557	1527
Серпень	1903	1859	1765	1709	1657	1644	1713	1666
Вересень	1653	1587	1471	1391	1340	1315	1484	1421
Жовтень	1289	1190	1118	1045	1171	1256	1474	1494
Листопад	1127	1019	975	943	932	1055	1057	1100
Грудень	1289	1205	1156	1124	1118	1251	1238	1265
Години	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00
Січень	1526	1514	1550	1532	1502	1682	1739	1709
Лютий	1485	1478	1530	1548	1528	1625	1693	1709
Березень	1592	1559	1571	1564	1577	1627	1711	1727
Квітень	1656	1623	1614	1598	1629	1672	1760	1771
Травень	1679	1634	1624	1581	1593	1621	1727	1730
Червень	1679	1634	1624	1581	1593	1621	1727	1730
Липень	1644	1618	1609	1606	1647	1698	1777	1791
Серпень	1777	1645	1572	1501	1591	1591	1682	1679
Вересень	1615	1638	1691	1636	1541	1574	1721	1721
Жовтень	1540	1570	1565	1681	1809	1928	1927	1972
Листопад	1305	1276	1358	1380	1349	1449	1490	1516
Грудень	1438	1393	1485	1509	1437	1490	1589	1629
Години	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00
Січень	1720	1809	1721	1658	1596	1505	1562	1439
Лютий	1729	1728	1684	1562	1517	1443	1425	1368
Березень	1783	1851	1842	1806	1789	1694	1643	1578
Квітень	1853	1961	1958	1959	1941	1832	1760	1685
Травень	1836	1988	2025	2040	2024	1913	1847	1762
Червень	1836	1988	2025	2040	2024	1913	1847	1762
Липень	1861	1947	1924	1919	1900	1791	1716	1647
Серпень	1739	1946	1946	2145	2228	2086	2054	1950
Вересень	1908	2072	2204	2056	1943	1861	1771	1690
Жовтень	1937	1824	1623	1555	1528	1427	1324	1300
Листопад	1497	1438	1386	1215	1210	1162	1180	1151
Грудень	1583	1495	1488	1324	1307	1260	1286	1258

Таблиця 4.1 – Середньодобове споживання електроенергії підприємством.

Розрахунок очікуваної генерації електричної енергії сонячною електричною станцією за допомогою програми PVsyst.

The screenshot displays the 'Grid system definition, Variant VCS: "# 1MBr"' window in PVsyst. The main configuration area is divided into several sections:

- Sub-array name and Orientation:** Name is 'PV Array', Orientation is 'Fixed Tilted Plane', Tilt is 12°, and Azimuth is 45°.
- Pre-sizing Help:** Options for 'No sizing', 'Enter planned power' (0.0 kWp), and '... or available area(modules)' (0 m²).
- Select the PV module:** Filter is 'All PV modules'. Selected module: Jinkosolar, 570 Wp 35V, Si-mono, JK0570N-72HL4-V, Manufacturer 2022. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 37.3 V, Voc (-10°C) 54.9 V.
- Select the inverter:** Output voltage 400 V Tri 50Hz. Selected inverter: Huawei Technologies, 100 kW, 200 - 1000 V TL, 50/60Hz, SUN2000-100KTL-M2-400Vac, Since 2022. Nb. of inverters: 10. Operating voltage: 200-1000 V. Global Inverter's power: 1000 kWac. Input maximum voltage: 1100 V. Inverter with 10 MPPT. Power sharing within this inverter.
- Design the array:**
 - Number of modules and strings: Mod. in series 18, Nb. strings 120. Overload loss 0.0%, Pnom ratio 1.23. Show sizing button.
 - Operating conditions: Vmpp (60°C) 672 V, Vmpp (20°C) 763 V, Voc (-10°C) 988 V.
 - Plane irradiance: 1000 W/m². Max. operating power (at 988 W/m² and 50°C): 1128 kW. Array nom. Power (STC): 1231 kWp.
 - Other parameters: Impp (STC) 1626 A, Isc (STC) 1717 A, Isc (at STC) 1717 A.
- List of subarrays:**

Name	#Mod #Inv.	#String #MPPT
PV Array		
Jinkosolar - JK0570N-72HL4-V	18	120
Huawei Technologies - SUN200...	10	1
- Global system summary:**

Nb. of modules	2160
Module area	5580 m²
Nb. of inverters	10
Nominal PV Power	1231 kWp
Nominal AC Power	1000 kWac
Pnom ratio	1.231

At the bottom, there are buttons for 'System overview', 'Single-line diagram', 'Cancel', and 'OK'.

Рисунок 13 - Вибір конфігурації параметрів СЕС та обладнання

PVsyst - це програмний інструмент, для моделювання та аналізу фотоелектричних (сонячних) систем (ФЕС). Вона дозволяє розраховувати потенційну генерацію електричної енергії сонячними панелями в залежності від різних параметрів, таких як географічне положення, кліматичні умови, характеристики модулів та інверторів тощо.

Розрахунок очікуваної генерації електричної енергії сонячною електричною станцією за допомогою програми PVsyst.

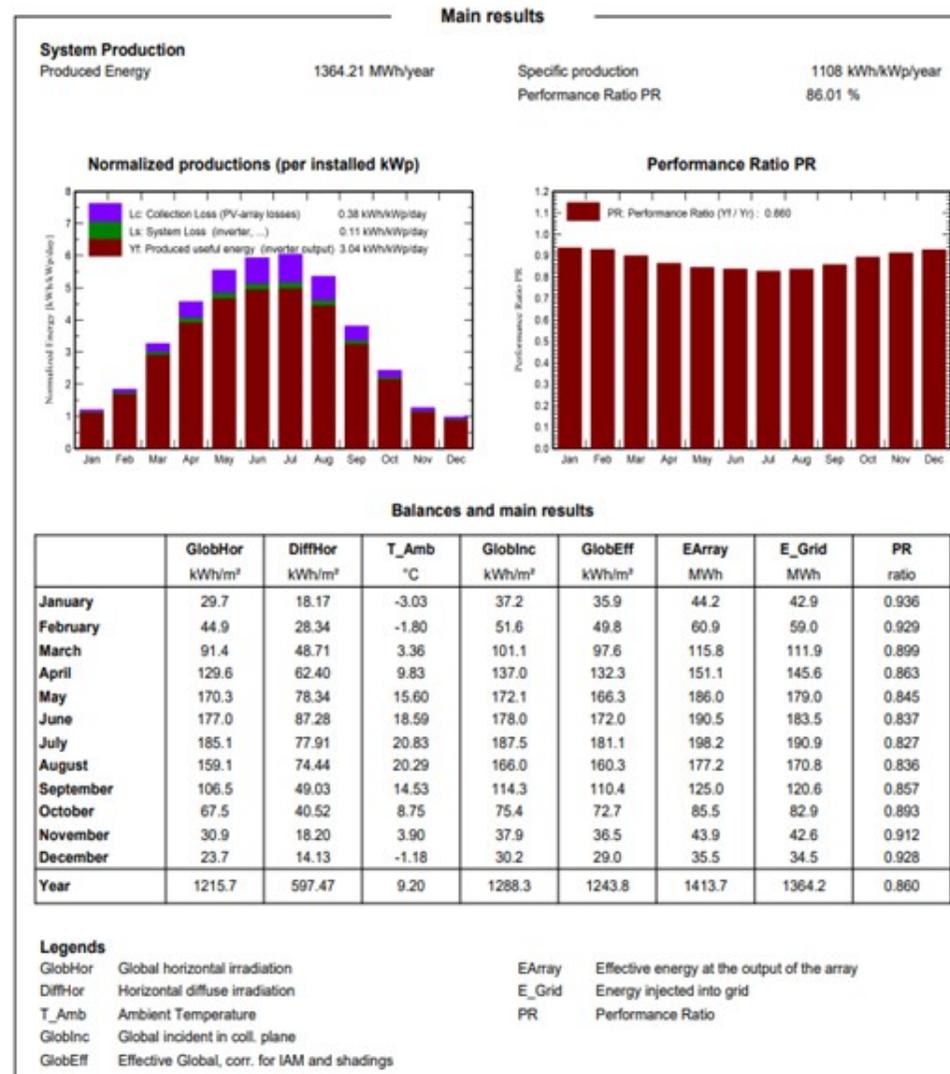


Рисунок 14 – Графіки щомісячної генерації та коефіцієнт продуктивності.

Вибір обладнання сонячної електричної станції з точкою нульового експорту електроенергії



Рисунок 15 –
Мережевий інвертор
Huawei SUN2000-100KTL-M2.

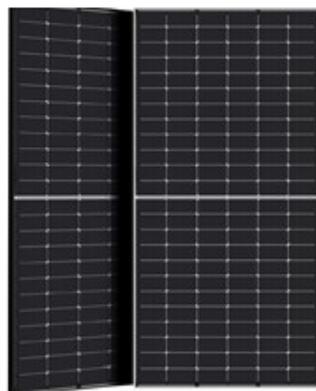


Рисунок 16 –
Фотоелектричні модулі
Jinko Solar JKM570N-
72HL4.



Рисунок 17 –
Реєстратор даних
Smart Logger 3000a без PLC



Рисунок 18 –
Лічильник ACE6000



Рисунок 19 – Пристрій
керування
EnCombi Controller ECcube2

Pilot



Рисунок 20 – Аналізатор
параметрів Smart meter
Pilot SPM33

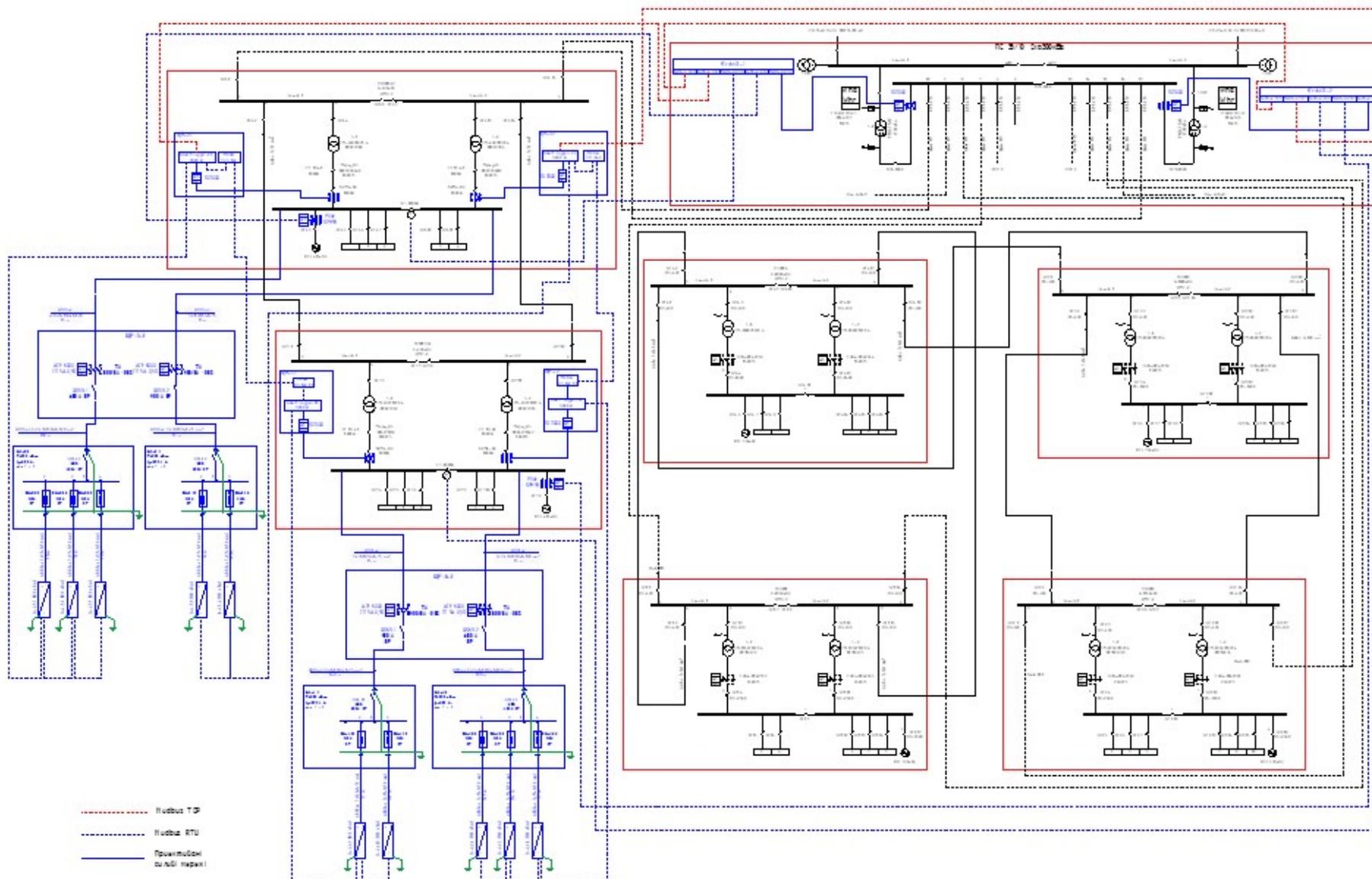


Рисунок 21 – Конвертор
RS-232/422/485 в оптику
MOXA TCF-142

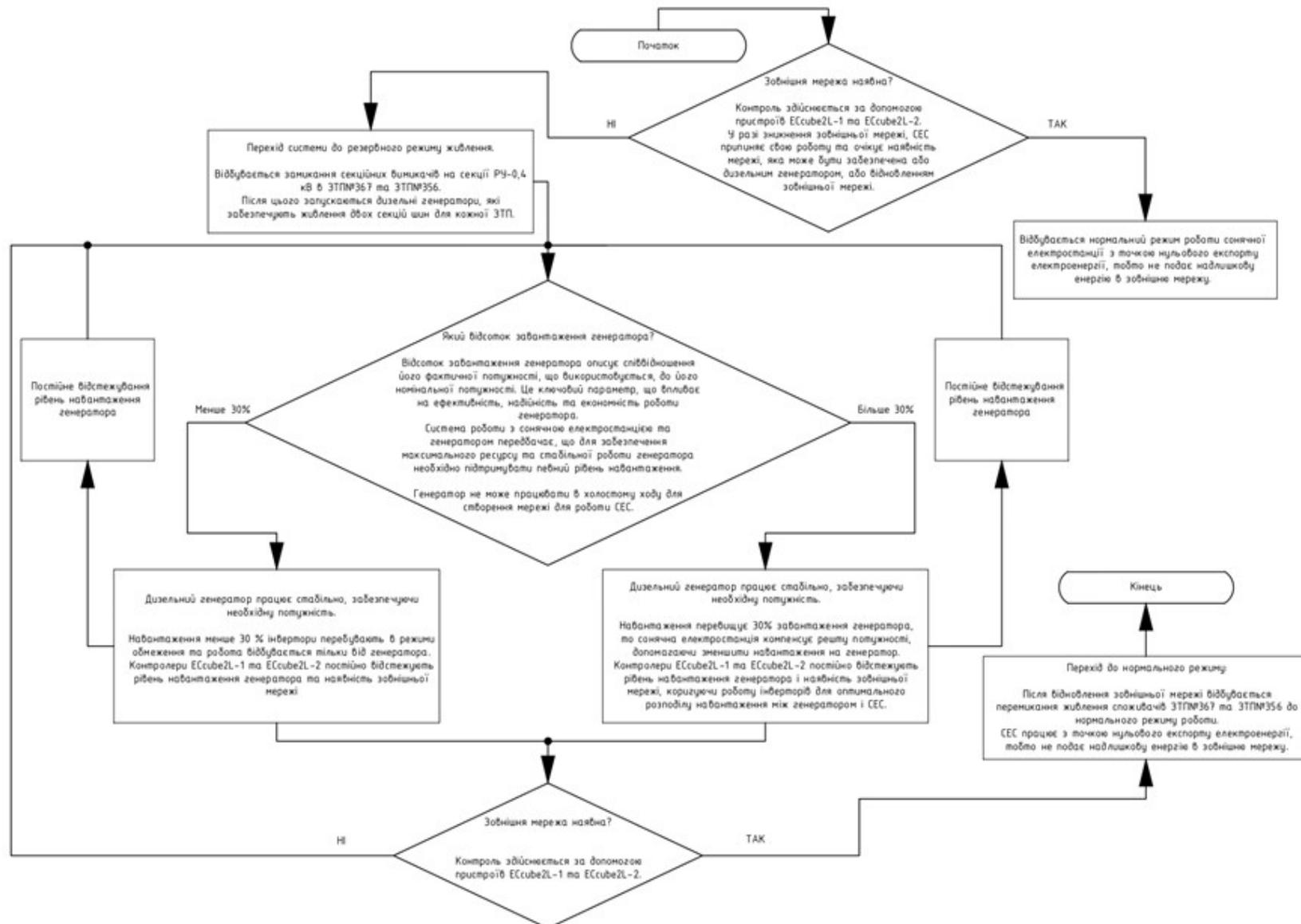


Рисунок 22 –
Трансформатор струму

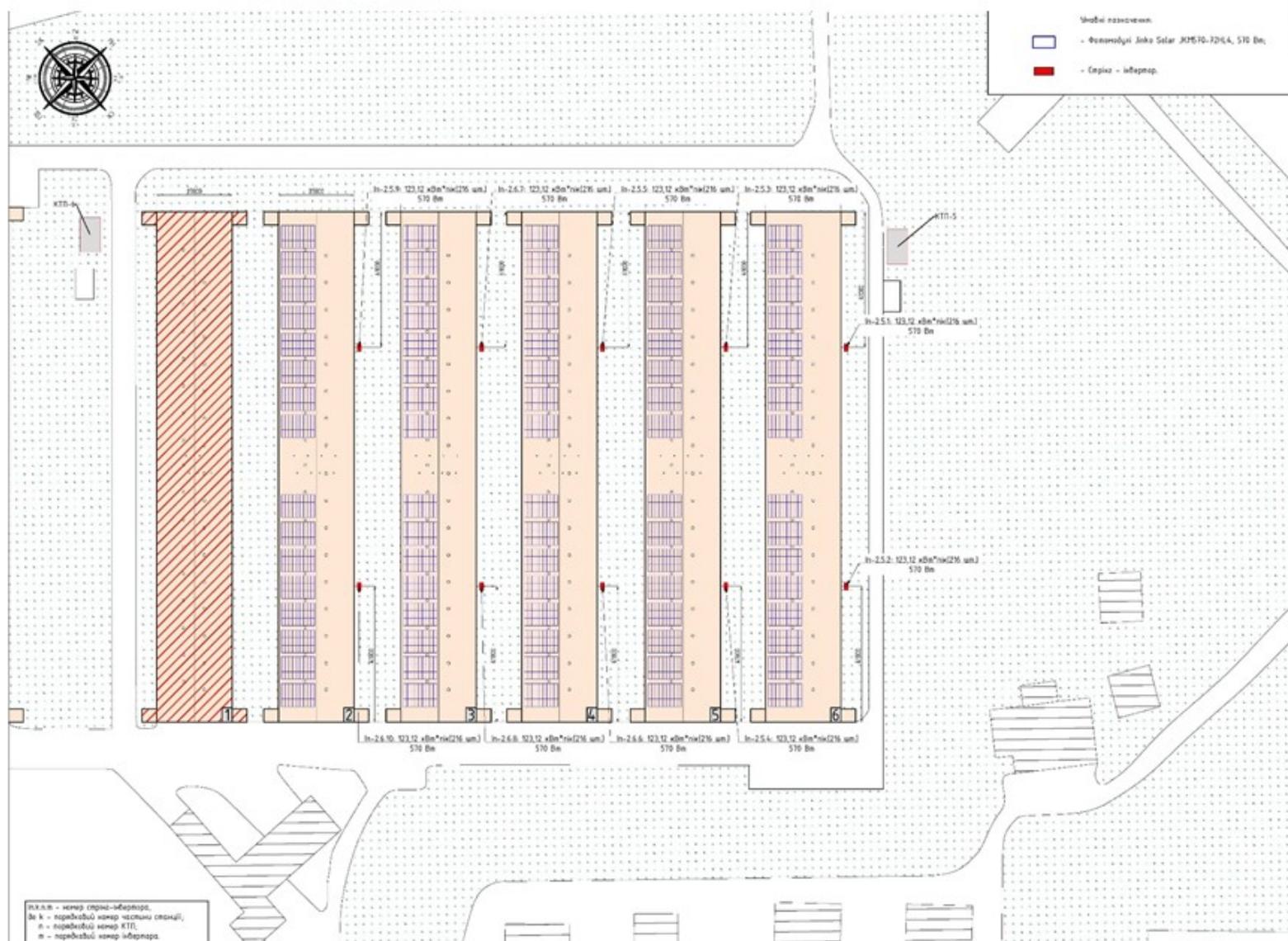
Розробка схеми системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії



Алгоритм керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії



Генеральний план розташування сонячної електричної станції



ВИСНОВКИ

1. В ході дослідження теоретичних основ розробки системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту були проаналізовані основні аспекти розвитку сонячної енергетики в Україні, визначені види сонячних електростанцій, розглянуті тарифи на електроенергію для промислових споживачів та розроблені функції системи керування.

2. Проведено аналіз існуючих систем керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту, включаючи принцип їх роботи, дослідження характеристик, огляд існуючих рішень та аналіз критеріїв вибору.

3. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту, включаючи засоби сприяння виробництву електроенергії з відновлюваних джерел, аналіз капітальних витрат та порівняння вартості обладнання.

4. В ході розділу вибору обладнання системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії було проведено аналіз споживання електроенергії підприємства, виконаний розрахунок очікуваної генерації електричної енергії сонячною електричною станцією за допомогою програми PVsyst. Також було здійснено вибір фотоелектричних модулів, інвертора та пристроїв керування для оптимального функціонування системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.

5. У розділі розробка схеми системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії було розроблено схему підключення та систему керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії. Також був розроблений алгоритм керування, що забезпечує ефективне функціонування сонячної електричної станції з точкою нульового

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)».

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

Розробка системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії / Б.І. Іскра, О.А. Паянок, В.В. Грабко – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024. [Електронний ресурс]. URL:.. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 3 с.

О.А. Паянок¹
В.В. Грабко¹
Б.І. Іскра¹

Розробка системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена розробці системи керування сонячною електричною станцією (СЕС) з точкою нульового експорту електроенергії. Запропонована система дозволяє забезпечити оптимальне використання сонячної енергії та запобігти експорту електроенергії в мережу. Завдяки цій системі керування дозволяє ефективно управляти як сонячною електростанцією, так і іншими генеруючими установками у разі зникнення зовнішньої мережі, що є важливим для енергетичної безпеки. Це також підвищує надійність і гнучкість електропостачання, забезпечуючи постійний моніторинг і коректну роботу для безперебійного забезпечення електроенергією.

Ключові слова: система керування, сонячна електростанція, прогнозування навантаження, економія електроенергії, енергетична безпека.

Abstract

This work focuses on the development of a control system for a solar power plant with a zero export point. The proposed system ensures optimal utilization of solar energy and prevents the export of electricity to the grid. Thanks to this control system, it is possible to effectively manage both the solar power plant and other generating facilities in the event of an external grid failure, which is important for energy security. It also increases the reliability and flexibility of the power supply, ensuring constant monitoring and correct operation for uninterrupted power supply.

Keywords: control system, solar power plant, load forecasting, energy saving, energy security.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,79 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

доцент кафедри КЕМСК Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

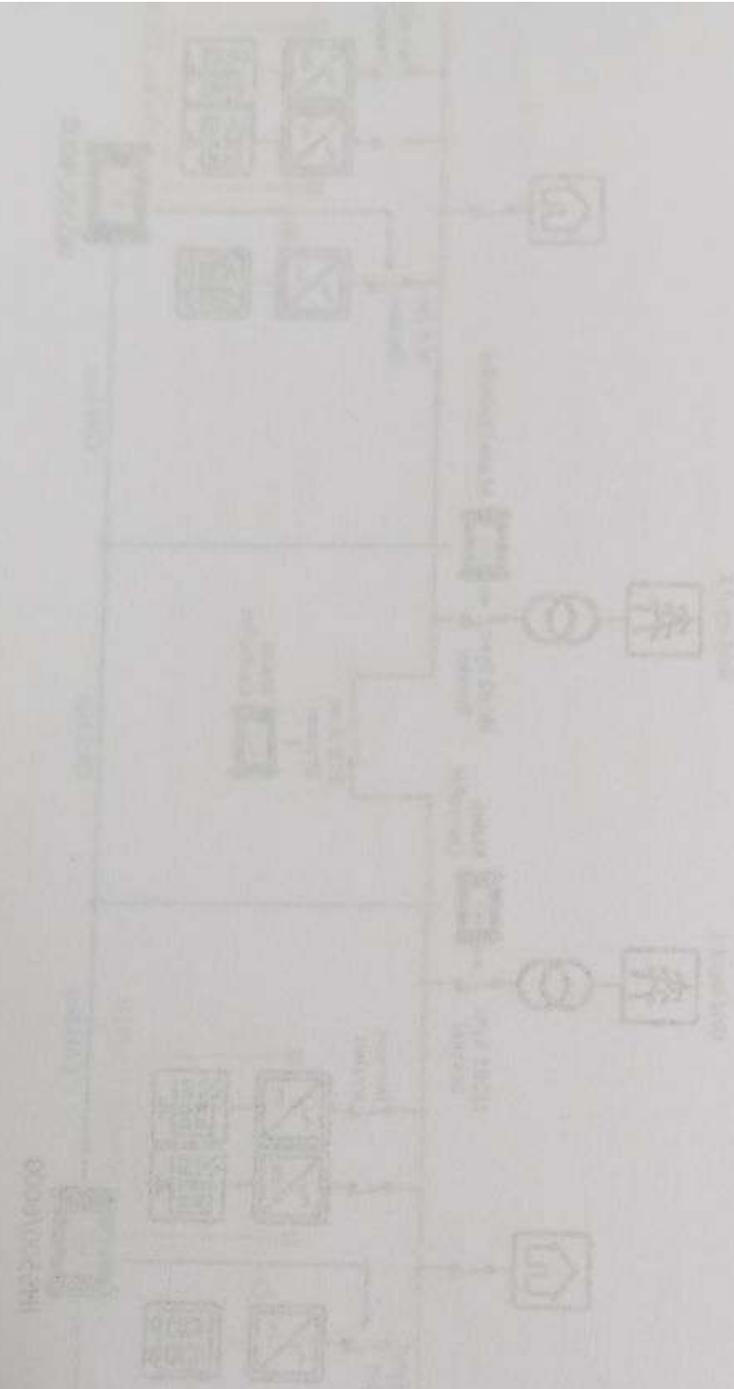
Здобувач

(підпис)

Іскра Б.І.

(прізвище, ініціали)

Исполнено в соответствии с СЭС-2.2.12



Исполнено в соответствии с СЭС-2.2.12

					08-24.МКР.003.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Іскра Б.І.	<i>[Signature]</i>	21.11				
Перевірив		Паянок О.А.	<i>[Signature]</i>	21.11				
Т. контр.								
Оформив		Бабенко О.В.	<i>[Signature]</i>	19.12		Аркуш		Аркушів
Норм. кон.		Паянок О.А.	<i>[Signature]</i>	24.11	ВНТУ, гр. ЕПА-24м			
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	25.11.20				