

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Новосельський Владислав Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.316
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу
параметрів сонячної електростанції підприємства для участі в ринку
електричної енергії

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики
(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів
і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ В.М. Новосельський
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Ващишак Ірина Романівна, к.т.н., доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ В. С. Цих
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Новосельський Владислав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячної електростанції підприємства для участі в ринку електричної енергії
2. Керівник роботи доцент Ващишак Ірина Романівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ІФНТУНГ від “05” травня 2026 року №204/7
3. Строк подання студентом роботи “08” червня 2026 року
4. Вихідні дані до роботи _____
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 1. Аналіз енергетичного сектору України, нормативних вимог та умов інтеграції сонячної генерації в ринок електроенергії.
 2. Проектування та обґрунтування архітектури інформаційно-вимірювальної системи моніторингу СЕС.
 3. Практична реалізація інформаційно-вимірювальних технологій на прикладі діяльності ТОВ НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД»
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

6. Дата видачі завдання “29” квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2026 р.	Виконано
2	Розроблення 1 розділу: «АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ, НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА УМОВ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В РИНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ».	30.04.2026 – 08.05.2026 р.	Виконано
3	Розроблення 2 розділу: «ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СЕС».	09.05.2026 – 20.05.2026 р.	Виконано
4	Розроблення 3 розділу: «ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРИКЛАДІ ДІЯЛЬНОСТІ ТОВ НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД»».	21.05.2026 – 29.05.2026 р.	Виконано
5	Оформлення роботи.	30.05.2026 – 06.06.2026 р.	Виконано

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить 80 сторінок, 10 рисунків, 5 таблиць, 22 джерел «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячної електростанції підприємства для участі в ринку електричної енергії»

Мета дослідження полягає у розробленні структурної та функціональної організації інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячної електростанції підприємства, яка забезпечить надійний збір, обробку і передачу даних для комерційного обліку, управління режимами генерації та повноцінної участі об'єкта в ринку електричної енергії України.

У межах бакалаврської роботи обґрунтовано, розроблено та експериментально верифіковано трирівневу інформаційно-вимірювальну систему моніторингу параметрів СЕС, яка за рахунок апаратного розмежування завадостійкого технологічного та захищеного комерційного контурів забезпечує високу живучість інфраструктури активного споживача на лібералізованому ринку електричної енергії. Застосування створеного гібридного математичного модуля прогнозування генерації, який базується на поєднанні фізичної моделі з алгоритмами машинного навчання та оригінальній метриці нормованої похибки, дозволило знизити відхилення планових графіків від фактичних до 4,2–11,8%, що повністю усуває фінансові ризики нарахування штрафів за небаланси в ОЕС України. Практичне імітаційне моделювання системи під управлінням адаптивних шлюзів API для об'єкта ТОВ НВФ «Зонд» довело підвищення коефіцієнта безпосереднього власного споживання сонячної енергії підприємством з 45% до 82%, гарантуючи максимальну фінансову ефективність акумулювання та реалізації надлишків потужності за механізмом Net Billing у літні місяці для повної компенсації витрат на закупівлю електроенергії з мережі взимку.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ,
СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, РИНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 80 pages, 10 figures, 5 tables, 22 sources.

"Development of an information-measuring system for monitoring the parameters of an enterprise's solar power plant for participation in the electricity market"

The purpose of the study is to develop the structural and functional organization of an information-measuring system for monitoring the parameters of an enterprise's solar power plant, which will ensure reliable collection, processing, and transmission of data for commercial accounting, management of generation modes, and full participation of the facility in the electricity market of Ukraine. Within the scope of the bachelor's thesis, a three-level information-measuring system for monitoring SPP parameters has been substantiated, developed, and experimentally verified, which, due to the hardware separation of the noise-immune technological and secure commercial circuits, ensures high viability of the active consumer's infrastructure in the liberalized electricity market. The application of the created hybrid mathematical module for generation forecasting, which is based on a combination of a physical model with machine learning algorithms and an original normalized error metric, allowed reducing the deviation of planned schedules from actual ones to 4.2–11.8%, which completely eliminates the financial risks of accusing penalties for imbalances in the IPS of Ukraine. Practical simulation modeling of the system under the control of adaptive API gateways for the facility of LLC RPE "Zond" proved an increase in the enterprise's direct self-consumption coefficient of solar energy from 45% to 82%, guaranteeing maximum financial efficiency of accumulation and realization of surplus power under the Net Billing mechanism in the summer months for full compensation of the costs for purchasing electricity from the grid in winter.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM, MONITORING, SOLAR POWER PLANT, ELECTRICITY MARKET.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ, НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА УМОВ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В РИНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	11
1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку енергетичного сектору України .	13
1.2 Принципи функціонування ринків електричної енергії.....	13
1.2.1 Структура ринку електричної енергії України	15
1.2.2 Договори для забезпечення функціонування ринків електричної енергії	17
1.3 Особливості сонячних електростанцій як об'єктів розподіленої генерації	21
1.3.1 Класифікація та специфіка використання сонячних електростанцій (СЕС) у комерційному секторі	23
1.3.2 Нормативно-технічні вимоги до систем моніторингу сонячних електростанцій.....	27
1.4 Нормативно-правові та технічні засади функціонування підприємств у статусі «активного споживача» на ринку електроенергії	29
1.5 Вибір і обґрунтування напряму дослідження.....	31
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СЕС ..	34
2.1 Обґрунтування архітектури ІВС моніторингу СЕС	36
2.1.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня (вимірювальних каналів).....	39
2.1.2 Обґрунтування та вибір мікроконтролерного обладнання середнього рівня.....	41
2.1.3 Організація комунікаційної інфраструктури та промислових інтерфейсів зв'язку	42
2.2 Концепція інтелектуальної ІВС для системної інтеграції СЕС у	

ринкове середовище	43
2.2.1 Математичне та алгоритмічне забезпечення модуля прогнозування генерації СЕС.....	43
2.2.2 Метрологічна оцінка та критерії якості прогнозування.....	47
2.2.3 Алгоритм інтеграції ІВС з ціновими індикаторами енергетичного ринку	48
2.2.4 Розроблення узагальненої структурної схеми ІВС.....	52
Висновки до розділу.....	53
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРИКЛАДІ ДІЯЛЬНОСТІ ТОВ НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД».....	
3.1 Комплексний аналіз профілю енергоспоживання підприємства.....	55
3.2 Розрахунок енергетичного балансу та обґрунтування конфігурації СЕС	59
3.3 Технічне та апаратне забезпечення ІВС моніторингу об'єкта	64
3.3.1 Специфікація та обґрунтування вибору засобів вимірювальної техніки.....	65
3.3.2 Середній рівень: контролерне обладнання та обробка даних	67
3.3.3 Канали зв'язку та розмежування інформаційних потоків	67
3.4 Тестування алгоритмів управління та оцінка ефективності впровадження системи.....	70
3.4.1 Оцінка точності роботи модуля прогнозування.....	70
3.4.2 Верифікація сценаріїв динамічного реагування на цінові індикатори ринку.....	71
3.4.3 Оцінка техніко-економічної ефективності впровадження ІВС...	73
Висновки до розділу.....	74
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

Актуальність роботи В умовах глибокої трансформації глобального енергетичного ландшафту та переходу до безвуглецевої економіки, розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) набуває статусу стратегічного пріоритету. Для України цей процес має не лише екологічний та економічний, але й екзистенційний вимір. Внаслідок систематичних і руйнівних атак на об'єкти критичної інфраструктури, традиційна централізована енергетична система (зокрема об'єкти теплової та гідрогенерації) зазнала безпрецедентних втрат. У цих складних реаліях сонячні електростанції (СЕС), які вже становлять близько 75% від усіх об'єктів відновлюваної енергетики в державі, стали фундаментальним інструментом забезпечення енергетичної безпеки та виживання економіки.

Сонячна енергетика сьогодні – це найбільш динамічний і швидкозростаючий сегмент генерації. Критичною перевагою СЕС в умовах воєнного стану є їхній децентралізований характер. Розгалужена мережа розосереджених генеруючих потужностей різного масштабу формує високу стійкість Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, адже таку інфраструктуру, на відміну від великих ТЕС чи ГЕС, неможливо критично пошкодити точковими ударами. Крім того, швидкість зведення промислових сонячних парків, які можна побудувати та підключити до мережі за лічені місяці, робить їх найефективнішим засобом оперативного заміщення втрачених генеруючих потужностей.

Вагому роль відіграє здатність сонячної генерації покривати денні пікові навантаження в мережі. Оскільки графік максимального виробітку СЕС збігається з денними піками споживання (особливо у літні місяці під час масового використання систем кондиціонування), це критично знижує

навантаження на базову генерацію (атомні електростанції) та дозволяє балансувати енергосистему, мінімізуючи дефіцит.

Масштаб інтеграції СЕС охоплює всі рівні економіки. На макрорівні Україна має потужні промислові об'єкти, зосереджені переважно у центральних та південних регіонах завдяки високому рівню інсоляції. Паралельно відбувається стрімкий розвиток розподіленої генерації на рівні приватних домогосподарств та комерційного сектору. Водночас вітчизняний бізнес, прагнучи захиститися від непрогнозованих блекаутів та забезпечити безперервність виробничих процесів, масово інвестує у власні СЕС. Завдяки цьому на підприємствах, об'єктах критичної інфраструктури (лікарні, водоканали, котельні) масово впроваджуються автономні (орієнтовані виключно на власне споживання з накопиченням енергії в АКБ) та гібридні станції (що поєднують роботу з мережею та акумуляування для гарантування безперебійного живлення).

Трансформація енергетичного балансу на користь ВДЕ та створення мережі розподіленої генерації вимагають принципово нових підходів до диспетчеризації та контролю. Оскільки генерація сонячної енергії залежить від метеорологічних умов і є нестабільною, ефективне управління такими активами (особливо для участі підприємств у конкурентному ринку електроенергії) неможливе без впровадження сучасних систем моніторингу. З огляду на це, розроблення спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи, здатної в режимі реального часу збирати, аналізувати та передавати дані про роботу СЕС, є надзвичайно актуальним науковим і практичним завданням.

Мета дослідження полягає у розробленні структурної та функціональної організації інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячної електростанції підприємства, яка забезпечить надійний збір, обробку і передачу даних для комерційного обліку, управління режимами генерації та повноцінної участі об'єкта в ринку електричної енергії України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- проаналізувати поточний стан енергетичного сектору України, нормативно-технічні вимоги до систем моніторингу та особливості інтеграції розподіленої сонячної генерації в умови конкурентного ринку;

- дослідити відомі методи та апаратні засоби вимірювання технічних і метеорологічних параметрів СЕС (інверторів, панелей, систем накопичення енергії);

- обґрунтувати вибір елементної бази ІВС: первинних перетворювачів, дата-логерів та архітектури каналів зв'язку та розробити структурну і функціональну схеми системи моніторингу для підприємства;

- запропонувати алгоритми обробки даних та механізми їх інтеграції з автоматизованими системами комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ).

Об'єкт дослідження – процес моніторингу та оперативного контролю режимів генерації сонячної електростанції промислового підприємства.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби, канали зв'язку та структура інформаційно-вимірювальної системи, необхідної для інтеграції СЕС підприємства в енергетичний ринок.

Методи дослідження. При виконанні роботи використано методи системного аналізу (для формування оптимальної архітектури системи), теорії інформації та вимірювань (для оцінки метеорологічних характеристик та вибору датчиків), а також теорії автоматичного керування (для розробки алгоритмів взаємодії компонентів станції).

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячної електростанції, яка може бути впроваджена на промислових підприємствах для забезпечення ефективного контролю режимів генерації, підвищення точності комерційного обліку електроенергії, оптимізації енергоспоживання та підвищення рівня енергетичної незалежності об'єкта. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані при модернізації існуючих СЕС та інтеграції їх у сучасні автоматизовані системи керування та енергетичні ринки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ, НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА УМОВ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В РИНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку енергетичного сектору України

Енергетичний сектор України переживає безпрецедентну трансформацію. Через масовані удари по об'єктах генерації та інтеграцію з ENTSO-E, фокус змістився на децентралізацію та розвиток ВДЕ (сонячна генерація становить до 75% «зеленої» енергії). Інтеграція сонячної генерації стимулюється на рівні держави.

Енергетичний сектор України є однією з ключових складових національної економіки, що забезпечує функціонування промисловості, транспорту, комунальної сфери та інших галузей. Його стан визначає рівень енергетичної безпеки держави та стабільність функціонування всієї економічної системи.

Сучасна структура виробництва електричної енергії в Україні характеризується значною диверсифікацією джерел генерації. Основну частку виробництва традиційно забезпечують атомні електростанції, які формують базове навантаження енергосистеми. Теплові електростанції використовуються для покриття пікових навантажень і регулювання режимів роботи, а гідроелектростанції виконують функції балансування потужності.

Водночас, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) залишається відносно невисокою, проте демонструє стабільну тенденцію до зростання. Зокрема, частка ВДЕ у виробництві електроенергії в Україні зросла з приблизно 8-9% у 2016-2018 роках до понад 13% у 2020 році [1]. При цьому сонячна енергетика є одним із найбільш динамічних сегментів, що розвивається найшвидшими темпами серед усіх видів генерації.

Активний розвиток відновлюваної енергетики пов'язаний із впровадженням державних механізмів стимулювання, зокрема «зеленого тарифу», а також зі зниженням вартості обладнання для сонячних електростанцій. Крім того, розвиток розподіленої генерації, включаючи приватні та промислові СЕС, сприяє підвищенню енергетичної незалежності та зменшенню навантаження на централізовану енергосистему.

В умовах воєнного часу енергетичний сектор України зазнав значних пошкоджень, що призвело до необхідності відновлення та модернізації інфраструктури. Зокрема, міжнародні партнери активно підтримують енергетичну галузь: лише у 2026 році було залучено близько 50 млн євро на відновлення енергетичної інфраструктури [2]. Загальний обсяг міжнародної допомоги енергетичному сектору перевищує 1,9 млрд євро, що свідчить про стратегічну важливість цієї галузі.

Крім того, спостерігається активізація зовнішньоекономічних операцій з електроенергією. Наприклад, у 2026 році Україна суттєво збільшила експорт електроенергії, який зріс у 2,8 рази порівняно з попередніми періодами, тоді як імпорт зменшився на 29% [3]. Це свідчить про поступову інтеграцію українського енергоринку до європейського енергетичного простору.

Незважаючи на позитивні тенденції розвитку, зростання частки ВДЕ створює нові виклики для енергосистеми. Основною проблемою є нестабільність генерації, особливо для сонячних електростанцій, які залежать від погодних умов та часу доби. Це ускладнює процес балансування енергосистеми та підвищує вимоги до прогнозування виробітку електроенергії.

Недостатня точність прогнозів може призводити до виникнення небалансів, що тягне за собою фінансові втрати для виробників та негативно впливає на функціонування ринку електричної енергії. У зв'язку з цим зростає роль сучасних інформаційно-вимірювальних систем, які забезпечують збір, обробку та передачу достовірних даних у режимі реального часу.

Таким чином, енергетичний сектор України перебуває на етапі трансформації, що характеризується зростанням частки ВДЕ, інтеграцією до європейського енергетичного ринку та підвищенням вимог до точності обліку та моніторингу електроенергії. Це визначає необхідність розроблення сучасних інформаційно-вимірювальних систем для забезпечення ефективної роботи сонячних електростанцій в умовах конкурентного ринку.

1.2 Принципи функціонування ринків електричної енергії

Вітчизняний ринок електроенергії здебільшого побудований на конкурентних засадах, де учасники вільно взаємодіють між собою та ведуть бізнес, спираючись на принципи справедливого суперництва. Разом з тим, сфери діяльності, що класифікуються як природні монополії, функціонують під дією специфічних законодавчих обмежень та регламентів, закріплених у профільному Законі України «Про ринок електричної енергії» [4].

Дієздатність, надійність та результативність електроенергетичного ринку гарантується низкою фундаментальних правил. Серед ключових принципів його роботи варто виділити наступні:

- гарантування енергетичної незалежності та безпеки країни, а також формування передумов для безперебійного живлення;
- захист законних прав і свобод споживачів паралельно з наданням їм безпечного та стабільного електропостачання;
- створення належного середовища для безвідмовної та ефективної роботи всіх інфраструктурних об'єктів вітчизняної енергосистеми;
- збереження єдності Об'єднаної енергетичної системи України, підтримання її стабільної роботи разом із централізованим диспетчерським та технологічним управлінням;
- безперервне балансування обсягів генерації та споживання (попиту і пропозиції) на ринку для запобігання нестачі або ж перевиробництву енергії;

- вдосконалення та розбудова транскордонних електромереж, а також поглиблення співробітництва з енергетичними системами країн-сусідів;
- стимулювання високої енергоефективності в галузі поряд із максимальним зменшенням екологічної шкоди;
- всебічна підтримка та заохочення до використання відновлюваних і «зелених» джерел енергії;
- збереження відкритого та чесного конкурентного середовища для кожного гравця на ринку електроенергії;
- надання однакових можливостей та прав усім учасникам під час здійснення операцій з купівлі-продажу струму;
- гарантування покупцям права безперешкодно обирати компанію-постачальника, спираючись на особисті потреби;
- забезпечення вільного, зрозумілого та недискримінаційного доступу всіх зацікавлених сторін до магістральних і розподільчих мереж;
- недопущення дискримінації та забезпечення рівності під час діяльності суб'єктів на енергоринку;
- впровадження об'єктивного та незалежного державного нагляду задля підтримки високої ефективності й стабільності ринкових процесів;
- ціноутворення та формування тарифів за справедливими механізмами, які базуються на реальних, економічно обґрунтованих витратах компаній;
- суворя відповідальність гравців за недотримання загальних ринкових правил, норм роботи ринків «на добу наперед» та внутрішньодобових торгів, кодексів мереж передачі та розподілу, стандартів комерційного обліку, правил роздрібного ринку, а також інших законодавчих актів і контрактних зобов'язань;
- розширення міжнародних зв'язків та планомірне об'єднання української енергосистеми з європейським і регіональним енергетичним простором.

Аби стати повноправним учасником електроенергетичного ринку, підприємство (суб'єкт господарювання) обов'язково має підписати договір про врегулювання небалансів з оператором системи передачі. Це правило є універсальним для всіх суб'єктів, окрім тих споживачів, що купують енергію виключно за стандартним договором постачання кінцевому споживачу.

Наявність такої угоди відіграє критичну роль у підтримці безперебійної роботи енергосистеми. Вона дозволяє контролювати рівновагу між згенерованою та спожитою електрикою, а також коректно компенсувати та збалансовувати розбіжності між заздалегідь запланованими та реальними обсягами використаного ресурсу.

1.2.1 Структура ринку електричної енергії України

Ринок електричної енергії України функціонує на основі конкурентної моделі, впровадженої в рамках реформування енергетичного сектору та гармонізації із європейським законодавством. Основною метою створення нової моделі ринку є забезпечення ефективного функціонування енергосистеми, підвищення рівня конкуренції, прозорості ціноутворення та інтеграції до європейського енергетичного простору.

Сучасна модель ринку електроенергії України передбачає поділ на декілька взаємопов'язаних сегментів, кожен із яких виконує окрему функцію в процесі купівлі-продажу електроенергії (рис. 1.1) [5].

Основними сегментами ринку є:

- ринок двосторонніх договорів, на якому учасники укладають довгострокові контракти на постачання електроенергії;
- ринок «на добу наперед» (РДН), де здійснюється купівля-продаж електроенергії на наступну добу на основі прогнозних даних;
- внутрішньодобовий ринок (ВДР), який дозволяє коригувати позиції учасників протягом поточної доби;

- балансуючий ринок, що забезпечує врівноваження фактичного виробництва та споживання електроенергії;
- ринок допоміжних послуг, спрямований на підтримання надійності та стабільності роботи енергосистеми.



Рисунок 1.1– Спрощена модель ринків електроенергії [5]

Учасниками ринку електричної енергії є виробники електроенергії, постачальники, оператор системи передачі, оператори систем розподілу та споживачі. Особливу роль відіграє оператор системи передачі, який відповідає за балансування енергосистеми та функціонування балансуючого ринку.

Функціонування ринку базується на принципах вільного ціноутворення, конкуренції між учасниками та відповідальності за дотримання договірних зобов'язань. Одним із ключових аспектів є необхідність точного прогнозування обсягів виробництва та споживання електроенергії. Особливо це актуально для виробників з відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій, генерація яких має стохастичний характер.

Для участі у ринку «на добу наперед» виробники електроенергії повинні подавати погодинні графіки генерації на наступну добу. У разі відхилення

фактичного виробництва від запланованого виникають небаланси, які врегульовуються на балансуєчому ринку. Вартість небалансів може суттєво впливати на економічну ефективність роботи електростанції.

У цьому контексті особливого значення набуває точність вимірювання та обліку електроенергії, а також оперативність отримання інформації про параметри роботи генеруючих установок. Недостовірні або несвоєчасні дані можуть призводити до помилок у прогнозуванні, що, у свою чергу, збільшує обсяги небалансів і фінансові витрати учасників ринку.

Крім того, сучасний ринок електричної енергії передбачає високий рівень цифровізації процесів, включаючи автоматизований облік, обмін даними між учасниками та використання інформаційних систем для управління енергетичними ресурсами. Це висуває підвищені вимоги до інформаційно-вимірювальних систем, які повинні забезпечувати безперервний моніторинг, високу точність вимірювань та надійну передачу даних.

Таким чином, ринок електричної енергії України є складною багаторівневою системою, ефективне функціонування якої залежить від узгодженої роботи всіх учасників та точності інформаційного забезпечення. Для сонячних електростанцій участь у такому ринку потребує впровадження сучасних систем моніторингу, які дозволяють забезпечити достовірність даних, зменшити небаланси та підвищити економічну ефективність генерації.

1.2.2 Договори для забезпечення функціонування ринків електричної енергії

Функціонування ринку електричної енергії України базується на договірних засадах. Усі учасники ринку здійснюють свою діяльність виключно на підставі укладених договорів, що забезпечує правову визначеність їх взаємодії, прозорість операцій та розмежування прав, обов'язків і відповідальності сторін.

Підписання таких договорів виступає обов'язковою передумовою для злагодженої, відкритої та результативної роботи ринку, а також слугує головним інструментом для розмежування прав, зобов'язань та міри відповідальності кожної зі сторін.

Для повноцінної роботи ринкових механізмів передбачено укладання цілої низки угод, серед яких варто виділити наступні [6]:

- Двостороння угода про купівлю-продаж електроенергії — підписується між гравцями ринку для проведення торговельних операцій на індивідуально погоджених умовах;
- Договір щодо участі на ринку «на добу наперед» та/або на внутрішньодобовому майданчику — регламентує правила доступу суб'єктів господарювання до відповідних торговельних зон;
- Угода про купівлю-продаж ресурсу на ринку «на добу наперед» — контролює торгові транзакції в межах цього конкретного сегмента;
- Договір купівлі-продажу на внутрішньодобовому ринку — застосовується для реалізації операцій з електроенергією безпосередньо в межах поточної доби;
- Угода про участь у балансуєчому ринку — встановлює алгоритм співпраці гравців із цим сегментом задля збереження рівноваги між згенерованим та спожитим струмом;
- Договір про врегулювання небалансів — фіксує механізм відшкодування різниці між запланованими (прогнозними) та реальними обсягами виробленої або використаної енергії;
- Угода про надання послуг з розподілу електроенергії — визначає правила переміщення ресурсу локальними (місцевими) мережами безпосередньо до користувачів;
- Договір на послуги з передачі електроенергії — обумовлює нюанси транспортування струму високовольтними магістральними та міждержавними лініями;

- Угода про надання допоміжних послуг — необхідна для підтримки стабільної, безпечної та безперебійної роботи Об'єднаної енергетичної системи України;
- Договір про доступ до пропускної здатності міждержавних перетинів — нормує порядок експлуатації транскордонних мереж під час експортно-імпортних операцій;
- Угода про постачання електрики споживачеві — закріплює базові умови продажу струму безпосередньо кінцевому клієнту;
- Договір про постачання від постачальника універсальних послуг — гарантує стабільне забезпечення електроенергією окремих, законодавчо визначених груп населення чи установ;
- Угода з постачальником «останньої надії» — укладається для уникнення знеструмлення клієнта у разі раптового припинення роботи його попереднього постачальника;
- Договір про надання послуг комерційного обліку — регламентує правила організації та ведення підрахунку обсягів генерації, транспортування, розподілу та кінцевого використання ресурсу;
- Угода купівлі-продажу за «зеленим» тарифом — спрямована на фінансове заохочення та стимулювання генерації струму з відновлюваних і альтернативних джерел;
- Інші типи угод, підписання яких вимагається чинним законодавством та галузевими нормативними актами, що формують правила гри на вітчизняному ринку електроенергії.

Отже, розгалужена договірна система є фундаментальною базою для правового впорядкування відносин між усіма гравцями. Саме вона виступає гарантом стійкості, прозорості та високої ефективності функціонування всієї вітчизняної електроенергетичної галузі.

Процес отримання статусу учасника ринку електроенергії складається з шести послідовних етапів [7] як це показано на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Процес отримання статусу учасника ринку електроенергії

Особливої уваги в умовах сучасного розвитку енергетики потребують договірні відносини при інтеграції сонячних електростанцій у ринок електричної енергії. На відміну від традиційних генеруючих об'єктів, СЕС характеризуються

стохастичністю виробітку, що обумовлює підвищені вимоги до точності прогнозування генерації та, відповідно, до виконання договірних зобов'язань.

Для власників та операторів СЕС ключового значення набувають договори про участь у балансуєчому ринку та договори про врегулювання небалансів, оскільки відхилення між прогнозованими та фактичними обсягами генерації можуть призводити до фінансових втрат. У цьому контексті важливою є також інтеграція з системами комерційного обліку електроенергії, що забезпечують достовірність даних для розрахунків між учасниками ринку.

Крім того, при експлуатації СЕС на промислових підприємствах суттєву роль відіграють договори на передачу та розподіл електричної енергії, а також договори постачання, які визначають режими взаємодії об'єкта генерації з енергосистемою та кінцевими споживачами. У випадку використання механізмів підтримки відновлюваної енергетики (зокрема «зеленого» тарифу або ринкових премій) виникає необхідність укладання спеціалізованих договорів, що регламентують порядок продажу електроенергії та фінансових розрахунків.

Таким чином, ефективна інтеграція сонячних електростанцій у ринок електричної енергії безпосередньо залежить від належної організації договірних відносин та забезпечення високої точності вимірювання і моніторингу параметрів генерації. Це, у свою чергу, обумовлює необхідність розроблення сучасних інформаційно-вимірювальних систем, здатних забезпечити достовірність даних, оперативність їх обробки та відповідність вимогам ринку електричної енергії.

1.3 Особливості сонячних електростанцій як об'єктів розподіленої генерації

Сонячні електростанції (СЕС) є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики та важливою складовою розподіленої генерації. Їх широке впровадження зумовлене екологічністю,

відотною простотою реалізації та можливістю масштабування залежно від потреб споживача або підприємства.

Принцип роботи СЕС базується на перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричну за допомогою фотоелектричних модулів. Основними елементами СЕС є сонячні панелі, інвертори, системи кріплення, кабельна інфраструктура та засоби обліку і контролю. Фотоелектричні модулі генерують постійний струм, який за допомогою інверторів перетворюється в змінний струм, придатний для передачі в електромережу або використання споживачами.

Однією з ключових особливостей СЕС є їх належність до об'єктів розподіленої генерації. Це означає, що такі станції можуть розміщуватися безпосередньо поблизу споживачів електроенергії або інтегруватися в локальні енергетичні системи підприємств. Такий підхід дозволяє зменшити втрати при передачі електроенергії та підвищити енергетичну незалежність.

Разом із тим, функціонування СЕС має низку специфічних особливостей. Основною з них є залежність обсягу генерації від природних факторів, зокрема інтенсивності сонячного випромінювання, погодних умов, температури навколишнього середовища та часу доби. Генерація електроенергії має виражений добовий характер і є максимальною у світлий період доби, а вночі повністю відсутня. Також спостерігаються сезонні коливання виробітку, що пов'язані зі зміною тривалості світлового дня та кліматичних умов.

Ще однією важливою особливістю є вплив технічного стану обладнання на ефективність роботи СЕС. Забруднення поверхні фотоелектричних модулів, деградація елементів, несправності інверторів або кабельних мереж можуть призводити до суттєвого зниження виробітку електроенергії. У зв'язку з цим виникає необхідність постійного контролю параметрів роботи станції.

Умови функціонування сучасного ринку електричної енергії висувають додаткові вимоги до роботи сонячних електростанцій. Зокрема, виробники електроенергії повинні забезпечувати точний облік виробленої електроенергії,

своєчасну передачу даних та формування прогнозів генерації. Відхилення фактичних показників від прогнозних значень призводить до виникнення небалансів, що тягне за собою фінансову відповідальність.

У зв'язку з цим особливого значення набувають інформаційно-вимірювальні системи моніторингу, які дозволяють у режимі реального часу отримувати дані про ключові параметри роботи СЕС. До таких параметрів належать потужність генерації, напруга, струм, температура обладнання, рівень сонячної інсоляції та інші показники. Використання таких систем дає можливість оперативно виявляти відхилення у роботі обладнання, підвищувати ефективність генерації та забезпечувати відповідність вимогам ринку електроенергії.

Таким чином, сонячні електростанції як об'єкти розподіленої генерації характеризуються високою залежністю від зовнішніх факторів, нерівномірністю виробітку електроенергії та підвищеними вимогами до контролю параметрів їх роботи. Це обумовлює необхідність застосування сучасних інформаційно-вимірювальних систем моніторингу, які забезпечують ефективну інтеграцію СЕС у енергетичний ринок та підвищують надійність їх функціонування.

1.3.1 Класифікація та специфіка використання сонячних електростанцій (СЕС) у комерційному секторі

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у бізнес-процеси стала не просто екологічним трендом, а стратегічним кроком для оптимізації витрат та підвищення конкурентоспроможності. Залежно від технічних завдань та потреб підприємства, сонячні електростанції поділяються на три базові категорії (рис. 1.3) [8]: мережеві, гібридні та автономні.

На сьогодні абсолютною більшістю серед реалізованих комерційних проєктів є саме мережеві СЕС. Їхня головна особливість полягає в роботі без використання акумуляторних батарей (АКБ) — станція функціонує в режимі

постійної синхронізації із зовнішньою електромережею, генеруючи струм виключно для поточного споживання підприємства. Це дозволяє компаніям кардинально знизити фінансове навантаження від рахунків за електроенергію в денний час.

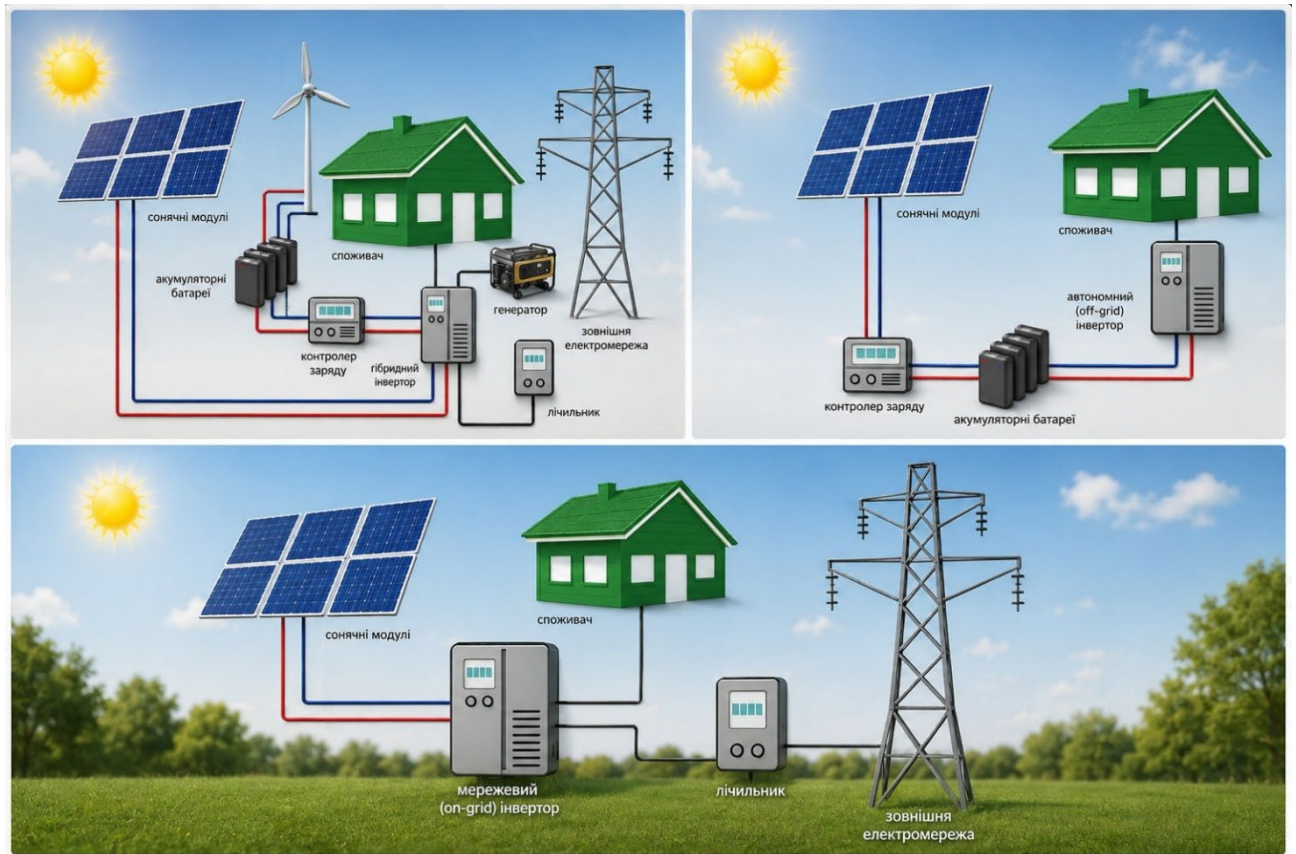


Рисунок 1.3 – Основні типи СЕС: мережева, автономна та гібридна

Нижче наведено розширений аналіз кожного типу сонячних систем та їхньої ролі в сучасному бізнесі.

Мережеві СЕС (Grid-tie)

Принцип роботи: Система генерує електроенергію лише за умови наявності сонячного випромінювання та активної зовнішньої мережі. Згенерований струм миттєво спрямовується на покриття поточних потреб підприємства (робота верстатів, освітлення, офісної техніки, систем кондиціонування). У випадку, коли генерація СЕС перевищує рівень споживання об'єкта, цей надлишок не втрачається — він експортується в загальну мережу. За

це підприємство може отримувати фінансову компенсацію за механізмом «Зеленого тарифу» або ж накопичувати віртуальні кіловати за сучасною системою чистого вимірювання (Net Billing) для використання їх у періоди нестачі сонця.

Головні переваги: Мережеві станції характеризуються найнижчими капітальними витратами (CAPEX) на етапі будівництва через відсутність дорогих акумуляторів. Завдяки цьому вони демонструють найвищу рентабельність та рекордні терміни окупності — від 3 до 5 років. Крім того, такі системи практично не потребують специфічного технічного обслуговування.

Гібридні CEC (Hybrid)

Принцип роботи: Цей тип є технологічним компромісом, який акумулює в собі сильні сторони як мережевих, так і автономних систем. Гібридні інвертори працюють паралельно з центральною електромережею, але додатково укомплектовані потужними масивами акумуляторних батарей.

Головні переваги: Основна функція гібридної CEC — забезпечення енергетичної безпеки. Вона дозволяє накопичувати згенеровану або дешеву нічну енергію, а у разі аварійних чи планових відключень центральної мережі — миттєво переводить підприємство на живлення від батарей, працюючи як гігантське джерело безперебійного живлення (ДБЖ). Це критично важливо для виробництв, де раптова зупинка процесів призводить до колосальних збитків.

Автономні CEC (Off-grid)

Принцип роботи: Автономні системи функціонують у повній ізоляції від центральних ліній електропередач. Уся вироблена вдень енергія або відразу споживається, або накопичується в батареях великої ємності для забезпечення живлення вночі чи в похмуру погоду.

Головні переваги: Забезпечення стовідсоткової енергонезалежності.

Обмеження для бізнесу: У промисловому та великому комерційному секторі цей тип CEC застосовується вкрай рідко. Покриття великих виробничих потужностей вимагає величезних масивів АКБ, що робить проєкт фінансово

нерентабельним. Зазвичай автономні станції монтують на віддалених об'єктах (агрокомплекси в полях, телекомунікаційні вишки, туристичні бази в горах), куди фізично неможливо або занадто дорого провести лінію електропередач.

Вибір підприємців на користь мережевих станцій зумовлений трьома фундаментальними факторами, що гарантують максимальну ефективність інвестицій:

Ідеальна синхронізація з графіком енергоспоживання: На відміну від приватних домогосподарств, де пік споживання припадає на вечір, переважна більшість комерційних підприємств, офісних центрів та заводів працюють саме у світлу пору доби (орієнтовно з 8:00 до 18:00). Графік їхньої роботи практично ідеально накладається на криву максимальної сонячної активності. Завдяки цьому бізнес здатен напряду перебивати від 50% до 80% своїх щоденних потреб безпосередньо енергією сонця, не потребує її дорогого акумулювання.

Фінансова доцільність та хеджування ризиків: Для юридичних осіб тарифи на електроенергію традиційно є вищими, ніж для населення, і мають стійку тенденцію до постійного зростання. Встановлення власної мережевої генерації діє як потужний фінансовий щит – підприємство фактично «заморожує» вартість кіловата на роки вперед, кардинально знижуючи собівартість своєї продукції чи послуг. Саме ця різниця в тарифах і забезпечує стрімке повернення вкладених коштів.

Екологічна відповідальність та іміджеві переваги (ESG): Сучасний бізнес тісно пов'язаний зі світовими стандартами. Перехід на чисті, відновлювані джерела енергії суттєво підвищує екологічний рейтинг компанії у розрізі критеріїв ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance).

Для компаній, які експортують свою продукцію, власна СЕС — це ще й механізм збереження конкурентоспроможності на європейських ринках. Зокрема, це дозволяє значно мінімізувати вуглецевий слід продукції і, як наслідок, уникнути або зменшити сплату нового європейського вуглецевого мита (CBAM — Carbon Border Adjustment Mechanism).

1.3.2 Нормативно-технічні вимоги до систем моніторингу сонячних електростанцій

Ефективне функціонування сонячних електростанцій у сучасних умовах ринку електричної енергії неможливе без дотримання нормативно-технічних вимог до систем моніторингу та обліку електроенергії. Такі вимоги визначаються законодавством України, галузевими стандартами, а також правилами роботи ринку електричної енергії.

Однією з ключових вимог є забезпечення комерційного обліку електроенергії відповідно до встановлених стандартів точності та надійності. Для цього застосовуються автоматизовані системи комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ), які забезпечують безперервний збір, обробку та передачу даних про обсяги виробництва та споживання електроенергії. Такі системи повинні відповідати вимогам щодо метрологічної точності, захисту інформації та синхронізації часу.

Важливою складовою є також дотримання вимог до оперативно-диспетчерського управління, які передбачають передачу даних у режимі, наближеному до реального часу. Це дозволяє оператору системи передачі здійснювати балансування енергосистеми та підтримувати її стабільність. У зв'язку з цим системи моніторингу повинні забезпечувати високу швидкість передачі даних, їх достовірність та безперервність.

Окрім обліку електроенергії, системи моніторингу повинні здійснювати контроль технічних параметрів роботи сонячної електростанції. До таких параметрів належать напруга, струм, потужність, частота, температура обладнання, а також параметри роботи інверторів і фотоелектричних модулів. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі обладнання та запобігати аварійним ситуаціям.

Особливе значення має відповідність систем моніторингу вимогам кібербезпеки та захисту інформації. Оскільки сучасні електростанції

інтегруються в єдині інформаційні мережі, важливо забезпечити захист даних від несанкціонованого доступу, втручання та спотворення. Це досягається шляхом використання засобів шифрування, автентифікації та резервного копіювання даних.

Також нормативно-технічні вимоги передбачають забезпечення сумісності систем моніторингу з іншими інформаційними системами ринку електроенергії. Це включає інтеграцію з платформами оператора ринку, системами диспетчерського управління та внутрішніми системами управління підприємства.

Важливою вимогою є наявність архівування даних та можливість їх подальшого аналізу. Збереження історичних даних дозволяє оцінювати ефективність роботи електростанції, формувати прогнози генерації та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Таким чином, нормативно-технічні вимоги до систем моніторингу сонячних електростанцій охоплюють широкий спектр аспектів — від точності обліку та швидкості передачі даних до кібербезпеки та інтеграції з ринковою інфраструктурою. Їх дотримання є необхідною умовою ефективної роботи електростанції, зменшення небалансів та забезпечення стабільного функціонування енергосистеми.

Нормативно-правовим фундаментом, який визначає архітектуру та метрологічні характеристики вимірювальних засобів на об'єкті, є Кодекс комерційного обліку електричної енергії [9]. Відповідно до його вимог, для забезпечення автоматизованого збору комерційних даних ІВС повинна інтегруватися з локальним устаткуванням збору та обробки даних (ЛУЗОД) або повнофункціональною АСКОЕ. При цьому особлива увага приділяється метрологічним характеристикам первинних перетворювачів: для комерційного обліку на рівні промислових СЕС вимагається використання трансформаторів струму та напруги з класом точності не гірше ніж 0,5S (а в окремих вузлах – 0,2S)

з обов'язковою державною повіркою та захистом від несанкціонованого доступу (пломбуванням).

Крім того, умови паралельної роботи СЕС із загальною мережею та вимоги до передачі телеметричної інформації жорстко регламентуються Кодексом систем розподілу [10] (або Кодексом системи передачі [11], залежно від точки приєднання об'єкта).

Системи моніторингу параметрів СЕС мають не лише фіксувати обсяги активної енергії, а й контролювати показники якості електричної енергії відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) [12]. До таких параметрів відносяться відхилення напруги, частоти, коефіцієнт гармонічних складових та коливання напруги, що виникають внаслідок різкої зміни хмарності й, як наслідок, стохастичного скидання або накидання потужності інверторами.

З інформаційного погляду, сумісність системи моніторингу з верхніми рівнями ієрархії (диспетчерськими центрами ОСР/ОСП та платформами Оператора ринку) потребує підтримки стандартизованих протоколів обміну даними. Для передачі комерційних масивів даних (профілів навантаження за 30-хвилинні або погодинні інтервали) зазвичай застосовуються макети даних типу XML (наприклад, макет 30817), а для оперативної телеметрії в режимі реального часу — промислові протоколи Modbus TCP, MQTT або стандарти сімейства MEK 60870-5 (101/104), що забезпечує надійне шифрування та стійкість каналів зв'язку.

1.4 Нормативно-правові та технічні засади функціонування підприємств у статусі «активного споживача» на ринку електроенергії

Важливим вектором трансформації роздрібного сегмента ринку електричної енергії України є законодавче впровадження та практична реалізація

концепції «активного споживача» (просьюмера). Відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [4] (зі змінами та доповненнями), активний споживач – це учасник ринку, який на основі спрощеної процедури, без ліцензування та зміни свого основного виду діяльності, має право виробляти електроенергію для покриття власних потреб, накопичувати її в установках зберігання енергії та продавати надлишки в загальну мережу.

Правовим та економічним базисом для комерційного сектору замість класичного «зеленого тарифу» став механізм самовиробництва на основі системи Net Billing (нет-білінг) [13]. На відміну від заліку кіловат-годин (Net Metering), Net Billing базується на грошовому взаємозаліку в реальному часі.

Принцип функціонування підприємства в такому статусі включає наступні аспекти:

1. *Пріоритет самоспоживання*: Згенерована сонячною станцією енергія першочергово спрямовується на поточні технологічні процеси підприємства, безпосередньо знижуючи обсяги купівлі дорогого ресурсу з мережі.
2. *Продаж надлишків за ринковими цінами*: У години, коли потужність генерації СЕС перевищує рівень внутрішнього навантаження об'єкта, надлишковий струм автоматично відпускається в мережу. Оплата цього обсягу здійснюється електропостачальником за вільними цінами (що прив'язані до погодинних індексів ринку «на добу наперед» — РДН).
3. *Віртуальний рахунок (кредитування)*: Кошти за згенеровані надлишки зараховуються на особовий рахунок просьюмера у вигляді гривневого еквіваленту. Ці кошти використовуються для оплати електроенергії, спожитої з мережі в періоди дефіциту сонячної активності (ввечері, вночі або взимку).

Перехід комерційних підприємств до статусу активного споживача висуває суворі технічні та метрологічні вимоги до організації систем обліку та моніторингу:

- *Впровадження погодинного АСКОЕ:* Наявність двонаправленого багатотарифного лічильника з модулем дистанційної передачі даних (GSM/GPRS) є безальтернативною умовою для отримання статусу прозумента. Система комерційного обліку повинна чітко розмежовувати обсяги споживання та генерації по кожному розрахунковому періоду (півгодини/година).
- *Проблема сезонного парадоксу цін:* Як показує аналіз ринкових тенденцій, у літні місяці максимального виробітку СЕС погодинна ціна на РДН через профіцит енергії падає до мінімальних значень, тоді як взимку, за мінімальної інсоляції, тарифи є найвищими. Це зумовлює необхідність наявності систем інтелектуального моніторингу та прогнозування.
- *Необхідність систем динамічного керування потужністю (Smart Feed-in Limitation):* Інформаційно-вимірювальна система СЕС просьюмера повинна не лише пасивно фіксувати параметри, а й взаємодіяти з інверторами для автоматичного обмеження перетоку в мережу у випадку, якщо потужність генерації перевищує дозовану за договором приєднання, або коли ринкова ціна стає економічно не вигідною.

Таким чином, функціонування підприємств у статусі активного споживача створює жорстку залежність фінансової ефективності СЕС від точності вимірювальних систем. Розробка ІВС, яка здатна інтегрувати дані комерційного обліку, внутрішньої телеметрії інверторів та метеорологічних параметрів, є критично необхідним технічним кроком для реалізації потенціалу систем Net Billing в Україні.

1.5 Вибір і обґрунтування напряму дослідження

Аналіз сучасного стану енергетичного сектору України, проведений у першому розділі, підтверджує стрімку трансформацію галузі у напрямку децентралізації та збільшення частки відновлюваних джерел енергії, зокрема

сонячних електростанцій (СЕС). Впровадження нової конкурентної моделі ринку електричної енергії кардинально змінило умови функціонування об'єктів розподіленої генерації. На сьогодні комерційні СЕС змушені працювати в жорстких правових та економічних рамках, де фінансова спроможність підприємства безпосередньо залежить від його здатності мінімізувати небаланси, забезпечувати високу точність прогнозування та контролювати якість відпущеної в мережу електроенергії відповідно до актуальних вимог ДСТУ EN 50160:2023.

Головною проблемою, що стримує підвищення економічної та технологічної ефективності інтеграції СЕС у ринкове середовище, є стохастичний характер сонячної генерації, зумовлений метеорологічними чинниками, а також технічні ризики, пов'язані з прихованою деградацією фотоелектричних модулів, забрудненням панелей та нестабільністю роботи інверторного обладнання. Традиційні засоби комерційного обліку (АСКОЕ/ЛУЗОД) фіксують лише інтегральні показники енергії на межі балансової належності, проте не дозволяють здійснювати оперативний поглиблений аудит внутрішніх параметрів станції та навколишнього середовища в режимі реального часу.

З огляду на це, виникає гостра науково-технічна потреба у створенні спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для моніторингу параметрів СЕС, яка інтегруватиме первинний метрологічний контроль електричних та метеорологічних величин, оперативну діагностику обладнання та цифрові канали передачі даних для взаємодії з верхніми рівнями енергоринку.

Для досягнення поставленої мети в межах випускної кваліфікаційної роботи необхідно вирішити такі задачі:

1. Обґрунтувати архітектуру та розробити структурну схему багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів СЕС, визначивши оптимальні інформаційні зв'язки між її компонентами.

2. Виконати аналітичний вибір та обґрунтування апаратного забезпечення системи, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі (датчики струму, напруги, температури та інсоляції), мікроконтролерні модулі обробки даних та елементи комунікаційної інфраструктури, виходячи з критеріїв точності, швидкодії та економічної доцільності.
3. Провести метрологічний аналіз розробленої системи, виконати розрахунок інструментальних похибок вимірювальних каналів та оцінити відповідність створеної ІВС чинним нормативним вимогам і стандартам комерційного обліку України.
4. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження розробленої системи моніторингу для комерційного об'єкта розподіленої генерації в умовах сучасного ринку електроенергії.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СЕС

Цифровізація є головним рушієм розвитку сучасної енергетики, що зумовлено екологічними вимогами, подорожчанням ресурсів та необхідністю підвищення надійності мереж.

Еволюцію систем контролю та управління енергоспоживанням можна розділити на два ключові етапи:

1. Базовий етап (Впровадження АСКОЕ): забезпечує фундамент для промислових та комунальних об'єктів шляхом автоматизації збору даних, прозорості розрахунків, зниження фінансових втрат та первинної оптимізації навантаження.

2. Інтелектуальний етап (перехід до Smart Grid): якісний стрибок у технологіях, який трансформує пасивний облік у динамічну систему. Завдяки двосторонньому обміну даними та інтеграції в інформаційні мережі стає можливим оперативне управління процесами в реальному часі та залучення споживача до енергоменеджменту.

Синергія цих технологій закладає основу для переходу від лінійних систем до Smart Grid – інтелектуальних енергетичних мереж нового покоління.

Моніторинг енергоспоживання СЕС [14] – це не просто цікава опція, а необхідний інструмент для тих, хто прагне отримати максимальну віддачу від інвестицій у сонячну енергетику. Розумні системи дозволяють не лише відстежувати показники в режимі реального часу, але й аналізувати дані, прогнозувати виробництво та оптимізувати споживання. І найголовніше – робити все це автоматично, без вашого постійного втручання.

Інтелектуальна система керування СЕС являє собою інтегрований програмно-апаратний комплекс, призначений для моніторингу, аналітичної обробки та оперативного регулювання параметрів генерації та споживання потужності. На відміну від класичних засобів комерційного обліку, дані системи

виконують не лише фіксацію кількісних показників відпуску електроенергії, а й здійснюють безпосередній активний вплив на режими роботи генеруючого обладнання.

До базової архітектури розумного комплексу належать первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори та датчики), інтегровані в інверторне устаткування та вузли обліку; мікропроцесорні контролери, які відповідають за логіко-математичний аналіз вхідних масивів даних; а також спеціалізоване прикладне програмне забезпечення, що забезпечує візуалізацію процесів та реалізацію алгоритмів оптимізації. У сучасних розробках підвищення енергоефективності та розширення функціональних можливостей досягається за рахунок синергії технологій Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (хмарних нейромереж) та хмарних обчислювальних платформ.

Функціональний алгоритм інтелектуальної системи базується на ієрархічному зборі та обробці інформації: первинні сенсори безперервно реєструють фізичні параметри навколишнього середовища (інтенсивність інсоляції, температуру фотоелектричних модулів), а також поточні електричні характеристики (потужність, струм, напругу виробітку та навантаження). Зняті метрики транслиуються до центрального обчислювального модуля (контролера), який на основі закладених алгоритмів формує керуючі сигнали. Ці команди регламентують перерозподіл потоків енергії на системи акумулювання (BESS), комутацію локальних споживачів або ж видачу надлишків потужності в зовнішню енергомережу за оптимальними тарифними планами.

Інформаційні процеси та моніторинг енергетичного балансу СЕС реалізуються в режимі реального часу (real-time mode). Дистанційний доступ оператора або власника об'єкта до верифікованих даних та інструментів керування забезпечується через веб-інтерфейси або кросплатформові мобільні додатки, що гарантує безперервний контроль параметрів станції незалежно від географічного розташування користувача.

2.1 Обґрунтування архітектури ІВС моніторингу СЕС

Згідно з наведеною схемою (рис. 2.1) [15], класична конфігурація автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) побудована за ієрархічним багаторівневим принципом. Таке компонування орієнтоване на виконання комплексних завдань з моніторингу, акумулювання, верифікації та аналітичної обробки інформації щодо енергоспоживання. Завдяки цій структурі досягається максимальна валідність вимірювань, відкритість інформаційних потоків та формування інформаційного підґрунтя для ухвалення оперативно-тактичних рішень.



Рисунок 2.1 – Типова архітектура АСКОЕ

У вертикальній структурі зазначеної архітектури виокремлюються чотири взаємопов'язані площини.

Первинну ланку формує вимірювальний рівень, представлений цифровими приладами обліку, а також сенсорами й датчиками параметрів мережі (струму, напруги, навантаження).

Зняті метрики передаються на рівень збору даних, де за допомогою локальних контролерів та концентраторів здійснюється їхнє попереднє структурування, фільтрація та тимчасове депонування у буферній пам'яті. Н

Наступний, серверний рівень, об'єднує системи керування базами даних, спеціалізовані аналітичні утиліти та SCADA-платформи, які забезпечують консолідацію та централізований диспетчерський нагляд.

Верхню ланку архітектури становить рівень загального менеджменту, де через інтеграцію з корпоративними системами класу ERP та EMS енергетичні показники трансформуються у бізнес-метрики підприємства.

Серед ключових переваг такої багаторівневої декомпозиції доцільно виділити її високу масштабованість, яка дозволяє інтегрувати додаткові вимірювальні прилади або розширювати аналітичний інструментарій верхніх ешелонів без кардинальних структурних змін. Окрім цього, модульний принцип побудови гарантує автономне оновлення чи заміну окремих компонентів, що значно спрощує процеси експлуатації та модернізації. Розподіл функціонального навантаження між ієрархічними рівнями суттєво підвищує загальну відмовостійкість системи: наприклад, тимчасове переривання зв'язку із сервером не спричиняє втрати інформації завдяки її депонуванню у локальних буферах пам'яті. Важливим аспектом є й оптимізація інформаційних потоків, оскільки первинна сепарація та обробка даних на нижчих ланках зменшує трафік і знижує обчислювальне навантаження на центральні сервери.

Застосування стандартизованих інтерфейсів та мережних протоколів забезпечує високу гнучкість інтеграції АСКОЕ з суміжними бізнес-платформами компанії. Водночас ієрархічна структура дозволяє реалізувати комплексний багаторівневий захист, що охоплює апаратне блокування на рівні лічильників, шифрування каналів зв'язку на проміжних етапах та захист програмних комплексів на серверній базі.

Специфіка архітектури Smart Metering (рис. 2.2) [14] полягає у формуванні інтерактивного енергетичного простору, де кінцевий споживач трансформується

в активного учасника ринку – просюмера (prosumer), здатного самостійно генерувати ресурси. Це закладає міцну основу для масштабного впровадження відновлюваної енергетики, функціонування локальних мікромереж (Microgrids), а також інтеграції децентралізованих технологій розподіленого реєстру (блокчейну) для верифікації комерційних розрахунків.

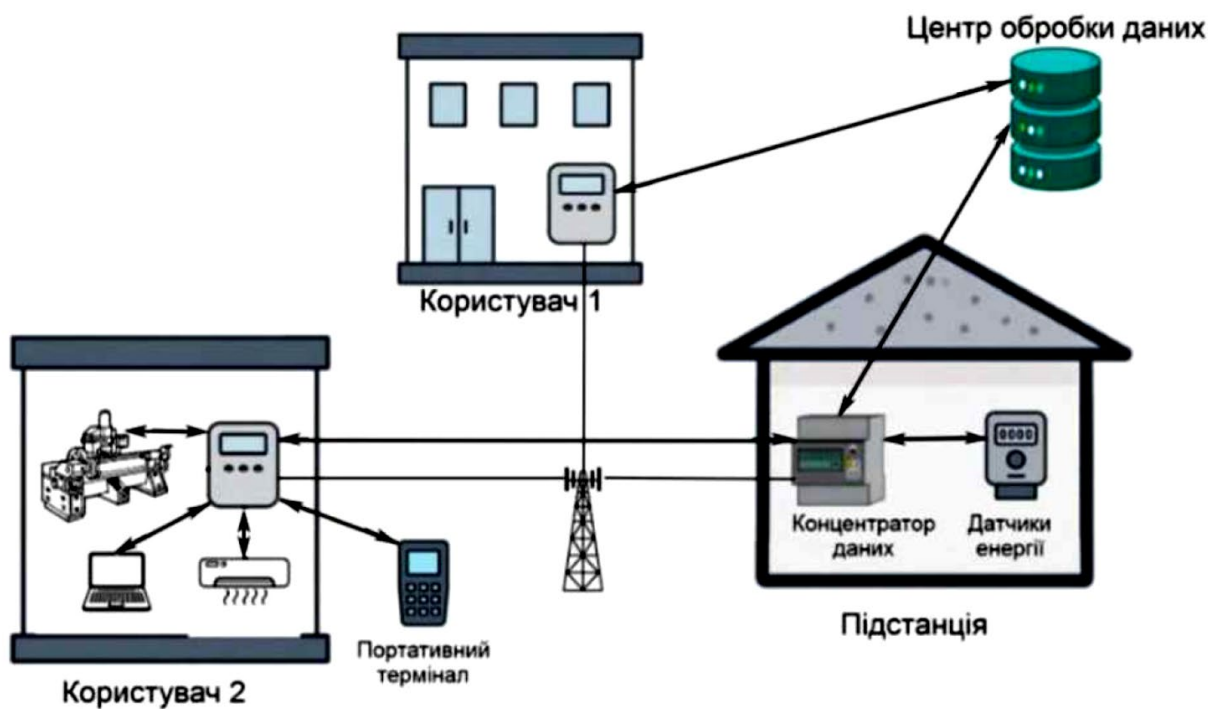


Рисунок 2.2 – Система Smart Metering та її компоненти

Для забезпечення високої надійності, метрологічної точності та швидкодії системи, в роботі запропоновано та обґрунтовано класичну багаторівневу ієрархічну архітектуру IBC, адаптовану під специфіку мережевих СЕС:

1. Нижній (вимірювальний) рівень

Складається з масиву первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків), інтегрованих безпосередньо у технологічне обладнання СЕС. До нього належать: датчики струму і напруги DC-контур (до інвертора) та AC-контур (після інвертора), сенсори температури поверхні фотоелектричних модулів, а також локальна цифрова метеостанція (датчики сонячної інсоляції/піранометри, швидкості вітру та температури повітря). Також на цьому

рівні функціонують вбудовані вимірювальні плати мережних інверторів та двонаправлений лічильник комерційного обліку АСКОВ на межі балансової належності підприємства.

2. Середній (контрольний) рівень

Базується на інтелектуальних локальних пристроях збору та обробки даних (дата-логерах, промислових мікроконтролерах або ПЛК). Основним завданням цього рівня є опитування датчиків польового рівня через аналогові та цифрові інтерфейси, первинна фільтрація високочастотних шумів і завад від інверторного обладнання, математичне усереднення виміряних величин (приведення до 1-, 5- або 15-хвилинних інтервалів), тимчасове буферизування даних у незалежній пам'яті (для запобігання втраті інформації під час блекаутів чи збоїв зв'язку) та трансляція даних на верхній рівень.

3. Верхній (диспетчерський / інформаційно-аналітичний) рівень

Являє собою хмарну IoT-платформу, локальний сервер підприємства (з базою даних часових рядів, наприклад, InfluxDB/PostgreSQL) та автоматизоване робоче місце (АРМ) енергетика підприємства. На цьому рівні здійснюється глобальна візуалізація (SCADA/Dashboard), довгострокове архівування телеметричної інформації, інтеграція з кабінетом Оператора ринку для подачі погодинних графіків генерації та звірення балансів Net Billing, а також розрахунок ККД (Performance Ratio) станції для виявлення прихованої деградації або забруднення панелей.

2.1.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня (вимірювальних каналів)

Виходячи з промислових умов експлуатації (високі струми, напруги та значний рівень електромагнітних завад від ШІМ-інверторів), здійснено аналітичний вибір елементної бази для формування вимірювальних каналів (ВК).

Вимірювальний канал електричних параметрів (струму та напруги)

Для вимірювання струму в DC та AC контурах відхилено класичні шунти через їх значне тепловиділення та відсутність гальванічної розв'язки.

- *Вибір датчиків струму:* Обґрунтовано використання прецизійних датчиків струму на основі ефекту Холла із замкнутим контуром (наприклад, серії LEM або інтегральних перетворювачів типу ACS758). Вони забезпечують гальванічну ізоляцію до 3 кВ, лінійність вимірювання в широкому діапазоні та високу швидкодію (час відгуку < 5 мкс), що критично для захисту від коротких замикань.

- *Вибір датчиків напруги:* Для високовольтного DC-контур (до 1000 В) обрано ізолюючі диференційні підсилювачі або спеціалізовані вимірювальні трансформатори напруги (для AC) з класом точності не нижче 0.5.

Вимірювальний канал метеорологічних параметрів

Ефективність роботи СЕС (Performance Ratio) напряму залежить від кліматичних умов, тому точність метеорологічного каналу є визначальною для прогнозування небалансів.

- *Датчик інсоляції:* Обрано еталонний термоелектричний піранометр (наприклад, класу Kipp & Zonen або промисловий аналог із виходом RS-485 Modbus). Він вимірює сумарну сонячну радіацію у Вт/м² з похибкою не більше $\pm 2\%$.

- *Датчики температури ФЕМ:* Оскільки при нагріванні кремнієвих пластин на кожен 1 °C понад норму (25 °C) потужність ФЕМ падає на $\sim 0.4\%$, обґрунтовано застосування цифрових високоточних датчиків температури типу DS18B20 в герметичному гільзовому виконанні або платинових термоопорів Pt100, що закріплюються безпосередньо на тильну сторону сонячних панелей за допомогою теплопровідного клею.

2.1.2 Обґрунтування та вибір мікроконтролерного обладнання середнього рівня

Для побудови ядра середнього рівня (дата-логера / локального обчислювача) проведено порівняльний аналіз трьох поширених платформ (табл. 2.1) [16. 17].

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз мікропроцесорних платформ для середнього рівня ІВС

Критерій порівняння	Платформа AVR (Arduino)	Платформа ESP32	Платформа STM32 (ARM Cortex-M4)
Розрядність АЦП	10-біт (низька точність)	12-біт (нелінійний АЦП)	12 / 16-біт (висока точність і лінійність)
Тактова частота	16 МГц	240 МГц	72 - 168 МГц
Вбудовані інтерфейси	UART, SPI, I2C	Wi-Fi, Bluetooth, UART	Multiple UART, SPI, I2C, CAN, Ethernet
Об'єм пам'яті (Flash/RAM)	32 КБ / 2 КБ	4 МБ / 520 КБ	512 КБ / 192 КБ
Апаратне обчислення (FPU)	Відсутнє	Наявне	Наявне (критично для DSP фільтрації)
Промисловий захист	Низький	Середній	Високий (стандарт для промислових ПЛК)

Для промислової ІВС моніторингу СЕС обрано мікроконтролер сімейства STM32 (наприклад, STM32F407). Його вибір зумовлений наявністю кількох незалежних високошвидкісних 12-бітних АЦП із можливістю апаратного

усереднення (Oversampling), модуля плаваючої коми (FPU) для швидкої математичної обробки та фільтрації сигналів в реальному часі, а також великої кількості апаратних інтерфейсів UART/USART, що дозволяє одночасно опитувати десятки інверторів по шині RS-485 та здійснювати зв'язок із верхнім рівнем.

2.1.3 Організація комунікаційної інфраструктури та промислових інтерфейсів зв'язку

Передача даних всередині промислового майданчика підприємства ускладнена великими відстанями (масиви панелей можуть бути віддалені на сотні метрів від диспетчерської) та потужними імпульсними завадами силових кабелів.

1. Організація внутрішнього контуру зв'язку (Нижній —> Середній рівень):

Обрано промисловий стандарт RS-485 із диференційним сигналом, що забезпечує високу завадостійкість на відстанях до 1200 метрів. Як прикладний протокол обрано Modbus RTU. Кожен інвертор СЕС та блок метеостанції виступає як Modbus Slave, а контролер середнього рівня (STM32) — як Modbus Master, який циклічно (з періодом 1 секунда) опитує регістри даних.

2. Організація зовнішнього контуру зв'язку (Середній —> Верхній хмарний рівень):

Для передачі інформації на локальний сервер або хмарну платформу обґрунтовано використання стеку протоколів TCP/IP. Контролер середнього рівня транслює дані через фізичний інтерфейс Ethernet (або промисловий Wi-Fi міст) за допомогою легковагого IoT-протоколу MQTT або Modbus TCP.

Перевага MQTT полягає в архітектурі «публікація/підписка», що мінімізує трафік, дозволяє працювати в умовах нестабільного зв'язку (завдяки механізму Quality of Service - QoS 1/2) та забезпечує миттєву доставку аварійних

повідомлень (наприклад, у випадку раптового відключення інвертора чи виходу параметрів мережі за межі ДСТУ).

2.2 Концепція інтелектуальної ІВС для системної інтеграції СЕС у ринкове середовище

Для забезпечення конкурентоспроможності промислової СЕС на лібералізованому ринку, традиційна архітектура АСКОВ має бути модернізована до рівня інтелектуальної системи комерційного обліку та прогнозування (Advanced Metering and Forecasting Infrastructure – AMFI) [18, 20].

Головна інженерна задача розроблюваної ІВС – мінімізація фінансових втрат від небалансів. Оскільки ринок вимагає погодинного (а в перспективі – 15-хвилинного) планування графіків відпуску енергії, система повинна вирішувати триєдину задачу:

1. Прецизійний моніторинг поточних параметрів генерації та якості електроенергії (згідно з ДСТУ EN 50160:2023).
2. Прогнозування генерації на основі метеорологічних даних та ретроспективного аналізу.
3. Економічний аналіз споживання (інтеграція з ціновими індикаторами ринку для оптимізації власного споживання підприємства).

2.2.1 Математичне та алгоритмічне забезпечення модуля прогнозування генерації СЕС

В умовах сучасного лібералізованого ринку електричної енергії точність планування відпуску потужності СЕС є критичним фактором, що безпосередньо впливає на фінансово-економічні показники підприємства-просюмера. Стохастичний характер сонячної інсоляції зумовлює необхідність розроблення та інтеграції в структуру ІВС спеціалізованого модуля короткострокового прогнозування (Day-Ahead Forecasting Module).

Для забезпечення мінімальної середньої абсолютної відсоткової похибки (MAPE) в межах вимог ринку (менше 10–12%) у роботі запропоновано гібридний підхід. Він поєднує детерміновану фізичну модель фотоелектричного перетворення із адаптивними статистичними методами на основі машинного навчання (Machine Learning).

Базовий контур модуля прогнозування спирається на фізичні закономірності функціонування кремнієвих фотоелектричних модулів (ФЕМ). Миттєва електрична потужність $P_{pv}(t)$, що генерується масивом сонячних панелей, є функцією від інтенсивності сонячного випромінювання та температури напівпровідникових переходів:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \cdot \frac{G_A(t)}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{cell}(t) - T_{STC})] \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{loss} , \quad (2.1)$$

де P_{STC} – сумарна встановлена потужність масиву ФЕМ за стандартних умов випробувань (STC:інсоляція 1000 Вт/м², температура 25°C, спектральний склад AM1.5), кВт;

$G_A(t)$ –прогнозована інтенсивність сонячної радіації, що потрапляє на похилу поверхню панелей у момент часу t , Вт/м²;

G_{STC} –еталонна інсоляція (1000 Вт/м²);

γ –температурний коефіцієнт зміни потужності ФЕМ (для кремнієвих панелей становить від –0.35 до – 0.45%/°C);

$T_{cell}(t)$ –розрахункова температура кремнієвого переходу (селла), °C;

T_{STC} –еталонна температура (25°C);

η_{inv} –коефіцієнт корисної дії (ККД) інверного обладнання;

η_{loss} –загальний коефіцієнт технологічних втрат (забруднення поверхонь, старіння ФЕМ, падіння напруги в кабельних лініях постійного та змінного струму).

Оскільки комерційні метеорологічні сервіси надають прогноз глобальної горизонтальної інсоляції (G_{GHI}), для визначення реального потоку енергії на фіксовану похилу площину $G_A(t)$ застосовується геометрична модель перерахунку із врахуванням кута нахилу панелей (β) та азимуту (α):

$$G_A(t) = G_b(t) \cdot R_b + G_d(t) \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + G_{GHI}(t) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right), \quad (2.2)$$

де G_b та G_d – пряма та дифузна складові радіації відповідно; R_b – геометричний коефіцієнт нахилу для прямої радіації; ρ – коефіцієнт альбедо (відбивної здатності) навколишньої поверхні.

Температура фотоелектричного елемента $T_{cell}(t)$ не є тотожною температурі навколишнього повітря $T_{amb}(t)$ і розраховується з урахуванням теплового балансу за формулою через номінальну робочу температуру комірки (NOCT):

$$T_{cell}(t) = T_{amb}(t) + G_A(t) \cdot \left(\frac{NOCT-20}{800}\right) \quad (2.3)$$

Детермінована фізична модель має обмежену точність через нелінійний вплив хмарності, затінення та динамічної зміни ККД інверторів під різним навантаженням. Для нівелювання цих похибок у серверне програмне забезпечення IBC інтегрується статистичний модуль оптимізації на базі алгоритму штучної нейронної мережі прямого поширення (Feedforward Neural Network).

На вхід алгоритму машинного навчання подається вектор ознак (Features) $X(t)$, який формується на основі даних телеметрії нижнього рівня IBC та зовнішніх джерел:

$$X(t) = \left[G_{prog}(t), T_{amb_{prog}}(t), Cloud(t), P_{hist}(t-1), P_{hist}(t-24), K_{clear}(t) \right], \quad (2.4)$$

Де $G_{prog}(t)$, $T_{amb_{prog}}(t)$ – прогнозні метеодані, отримані через API сервісу (наприклад. OpenWeatherMap або Meteoblue);

$Cloud(t)$ – відсоток та тип загальної хмарності;

$P_{hist}(t-1)$, $P_{hist}(t-24)$ – ретроспективні значення фактичної генерації СЕС за попередню годину та попередню добу відповідно (зчитуються з бази даних часових рядів IBC);

$K_{clear}(t)$ – розрахований індекс чистого неба (Clearness Index), що відображає ступінь прозорості атмосфери.

Цільовою функцією навчання алгоритму є мінімізація середньоквадратичної помилки (MSE) між прогнозованим значенням $P_{PV}(t)$ та фактичним виробітком $P_{fact}(t)$, зафіксованим комерційними лічильниками системи:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{fact}(i) - \hat{P}_{PV}(i, \theta))^2 + \Omega(\theta), \quad (2.5)$$

де $\Omega(\theta)$ – регуляризаційний член, що запобігає перенавчанню моделі (overfitting).

Логіка роботи математичного забезпечення реалізується циклічно на серверному рівні IBC. Узагальнену послідовність дій відображено на алгоритмічному рівні:

1. Етап ініціалізації (щодня о 12:00 за київським часом): Модуль «Market Connector» ініціює запит до веб-серверів Оператора ринку для отримання попередніх цінових сигналів, а модуль «Forecast Engine» надсилає API-запит до метеорологічного центру для отримання погодинного прогнозу погоди на наступну добу ($t+24 \dots t+48$).

2. Попередня обробка даних (Data Preprocessing): З бази даних часових рядів (InfluxDB) вивантажуються вектори фактичної генерації СЕС за останні 7 діб. Здійснюється фільтрація аномальних значень (викидів), зумовлених можливими збоями зв'язку.

3. Фізико-статистичний розрахунок: Вхідні масиви метеоданих обробляються геометричною моделлю для розрахунку кутової інсоляції. Отримані результати передаються у навчену модель машинного навчання.

4. Генерація вихідного макету: Результатом роботи алгоритму є погодинний макет прогнозного графіка навантаження (Generation Schedule) у форматі XML або JSON, що містить 24 значення цільової потужності для кожної години наступної доби.

5. Перевірка надійності та верифікація: Якщо математична модель фіксує аномально високе стандартне відхилення прогнозу (наприклад, при різко змінному фронті хмарності), система автоматично маркує ці години як «зони підвищеного фінансового ризику» для внутрішнього використання службою головного енергетика підприємства.

2.2.2 Метрологічна оцінка та критерії якості прогнозування

Для оцінювання адекватності та точності розробленого математичного забезпечення в ІВС інтегровано підсистему автоматичного розрахунку метрологічних похибок після завершення кожної розрахункової доби. Основними критеріями оцінки є:

Середня абсолютна похибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |P_{fact}(t) - \hat{P}_{PV}(t)|. \quad (2.6)$$

Середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE), приведена до встановленої потужності СЕС (P_{STC}):

$$MAPE_{norm} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|P_{fact}(t) - \hat{P}_{PV}(t)|}{P_{STC}} \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Використання нормованого показника $MARE_{norm}$ замість класичного $MARE$ є інженерно обґрунтованим для СЕС, оскільки в нічні, ранкові та вечірні години при фактичній генерації, близькій до нуля, класичний відсотковий аналіз дає математично некоректні надвисокі похибки, які не несуть реального економічного змісту для ринку.

2.2.3 Алгоритм інтеграції ІВС з ціновими індикаторами енергетичного ринку

У межах лібералізованого ринку електричної енергії України функціонування промислового підприємства, що володіє сонячною електростанцією (СЕС) і діє як активний споживач або просюмер (Prosumer), вимагає не просто технічного моніторингу генерації, а її гнучкої економічної адаптації. Інтеграція інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) з ціновими індикаторами енергоринку дає змогу автоматизувати процеси прийняття рішень щодо управління потоками потужності з метою максимізації фінансового ефекту.

Головним завданням цього алгоритмічного модуля є динамічний перерозподіл обсягів виробленої сонячної енергії між трьома основними напрямками: забезпечення власних технологічних потреб підприємства, депонування у системах накопичення енергії (BESS) та прямий продаж в ОЕС України через сегменти ринку «на добу наперед» (РДН) і внутрішньодобового ринку (ВДР).

Цільова функція математичного забезпечення інтеграційного модуля спрямована на мінімізацію добових витрат підприємства на закупівлю електроенергії з мережі (C_{buy}) або на максимізацію чистого прибутку від її реалізації (C_{sell}) за розрахунковий період (добу, що ділиться на $ST = 24$ розрахункові години):

$$\max \sum_{t=1}^{24} [P_{sell}(t) \cdot C_{mkt}(t) - P_{buy}(t) \cdot (C_{mkt}(t) + Tar_{dist} + Tar_{trans})] \cdot \Delta t. \quad (2.8)$$

За дотримання умов миттєвого балансу потужності в кожній точці t :

$$P_{PV}(t) + P_{BESS_dis}(t) + P_{buy}(t) = P_{load}(t) + P_{BESS_ch}(t) + P_{sell}(t), \quad (2.9)$$

Де $P_{PV}(t)$ –прогнозована або фактична потужність генерації СЕС, кВт;

$P_{load}(t)$ –поточна потужність споживання промислового підприємства, кВт;

$P_{buy}(t), P_{sell}(t)$ –потужність, що купується з мережі або продається в неї відповідно, кВт;

$P_{BESS_ch}(t), P_{BESS_dis}(t)$ –потужність заряду та розряду акумуляторної системи накопичення, кВт;

$C_{mkt}(t)$ –погодний ціновий індикатор ринку (ціна акцентованої електроенергії на РДН чи ВДР), грн/кВт·год;

Tar_{dist}, Tar_{trans} –тарифи на розподіл та передачу електричної енергії відповідно, грн/кВт·год;

Δt –інтервал дискретизації часу (1 година).

Програмна інтеграція ІВС із зовнішнім ринковим середовищем здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного модуля, який функціонує на верхньому (серверному) рівні системи. Взаємодія з інформаційними платформами Оператора ринку (орган, що проводить торги на РДН/ВДР) та НЕК «Укренерго» (Оператор системи передачі) реалізується через захищені шлюзи API (Application Programming Interface).

Повний цикл роботи алгоритму інтеграції складається з п'яти послідовних етапів:

Етап 1. Збір та імпорт цінових сигналів ринку (Day-Ahead Parsing)

Щодня в інтервалі між 13:00 та 13:30 (після офіційного публікування результатів торгів на РДН на наступну добу) програмний модуль автоматично

надсилає API-запит до серверу Оператора ринку. Алгоритм зчитує масив даних, що містить 24 значення прогнозованих цін $C_{RDN}(t)$ для кожної розрахункової години наступної доби, та імпортує їх у базу даних часових рядів ІВС.

Етап 2. Сегментація цінових зон та аналіз тарифних порогів [19]

Вбудований логічний контролер здійснює диференціацію добового графіка цін на три базові зони:

- Зона низьких цін (мінімального попиту): нічні години та години максимального профіциту сонячної генерації в енергосистемі країни (зазвичай з 11:00 до 15:00), коли ціна $C_{mkt}(t)$ наближається к нижнім граничним обмеженням (price caps).

- Зона помірних цін: напівпікові періоди.

- Зона критично високих цін (вечірній пік попиту): години максимального навантаження на ОЕС (зазвичай з 17:00 до 23:00), коли вартість ресурсу є найвищою.

Етап 3. Співставлення графіків генерації СЕС, споживання та цін

Алгоритм накладає отриманий вектор ринкових цін $C_{mkt}(t)$ на розрахований раніше прогноз виробітку СЕС $P_{PV}(t)$ та плановий графік навантаження підприємства $P_{load}(t)$. На основі цього співвідношення формується матриця оптимальних станів системи.

Етап 4. Виконання логічних умов керування потоками енергії

Залежно від поточного ринкового та технологічного стану, алгоритм реалізує один із трьох базових керуючих сценаріїв:

Сценарій А (Період низьких ринкових цін):

Умови виконання: $C_{mkt}(t) < C_{thresh_low}$.

Логіка системи: Продаж енергії від СЕС в мережу є економічно недоцільним. ІВС формує керуючі команди на перенаправлення надлишків власної сонячної генерації для максимального заряду акумуляторних батарей підприємства (P_{BESS_ch}). Якщо СЕС повністю покриває навантаження підприємства, а BESS заряджена, система може видати сигнал на активацію

другорядних технологічних споживачів (наприклад, насосних станцій чи систем хладогену) для акумулювання енергії у вигляді готової продукції чи тепла/холоду.

Сценарій Б (Період екстремально високих цін / Вечірній пік):

Умови виконання: $C_{mkt}(t) > C_{thresh_high}$.

Логіка системи: Купівля енергії з мережі є максимально збитковою. Алгоритм ІВС ініціює режим «максимальної комерційної видачі». Потужність СЕС (якщо є залишки інсоляції) та накопичена в BESS енергія (P_{BESS_dis}) спрямовуються на повне покриття внутрішнього споживання $P_{load(t)}$. У разі наявності чистих надлишків, ІВС через систему АСКОЕ здійснює заміну макетів комерційного обліку та забезпечує продаж залишків потужності в мережу за піковим тарифом.

Сценарій В (Автоматичне коригування на ВДР у реальному часі):

Якщо протягом поточної доби реальні погодні умови змінюються (наприклад, раптове надходження грозового фронту) і фактична генерація СЕС падає нижче задекларованого на РДН графіка, виникає загроза штрафів за небаланси. Алгоритм ІВС фіксує це відхилення в режимі реального часу і негайно (за 45–60 хвилин до розрахункової години) ініціює купівлю відсутнього обсягу електроенергії на Внутрішньодобовому ринку (ВДР), де ціни зазвичай нижчі, ніж вартість врегулювання небалансів на Балансуючому ринку НЕК «Укренерго».

Етап 5. Формування комерційних макетів та звітів

Кінцевим результатом роботи алгоритму є автоматичне генерування добового комерційного макету номінацій (наприклад, у форматі XML згідно з кодуванням ASCII/IEC 62325), який надсилається гарантованому постачальнику або безпосередньо в систему управління ринком (MMS) для участі в торгах.

2.2.4 Розроблення узагальненої структурної схеми ІВС

Пропонується трирівнева архітектура з виділеним аналітичним контуром:

1. *Нижній рівень (вимірювально-виконавчий):*

- Розумні трифазні лічильники комерційного обліку (клас точності 0.2S або 0.5S) на межі балансової належності.
- Датчики телеметрії: локальна метеостанція (піранометр для вимірювання інсоляції, датчик температури панелей, анемометр).
- Вбудовані контролери промислових інверторів (збір даних по кожному стрингу сонячних панелей).

2. *Середній рівень (комунікаційний та первинної обробки):*

- Промисловий IoT-шлюз (Smart Data Logger) з підтримкою протоколів Modbus RTU/TCP, MQTT. Він збирає дані кожні 1-5 хвилин, здійснює їх фільтрацію від завад, буферизацію (у разі зникнення зв'язку із сервером) та передає у хмару по захищеному каналу (VPN / GSM / Ethernet).

3. *Верхній рівень (аналітично-управлінський):*

- Хмарний сервер (або локальний сервер підприємства) з базою даних часових рядів (наприклад, InfluxDB або PostgreSQL).

Програмні модулі:

- *Модуль «Forecast Engine»* (прогнозування генерації).
- *Модуль «Market Connector»* (парсинг цін Оператора ринку та НЕК «Укренерго» щодо небалансів).
- *Модуль «Energy Management» (EMS)* — візуалізація даних для енергетика підприємства (Dashboard) та автоматичне формування файлів-заявок (макетів XML/JSON) для подачі номінацій гарантующому постачальнику або безпосередньо на ринок.

Висновок до розділу

У другому розділі виконано обґрунтування структури, технічних рішень та алгоритмічного забезпечення ІВС моніторингу параметрів СЕС, адаптованої до умов лібералізованого ринку електричної енергії.

Обґрунтовано трирівневу архітектуру ІВС, яка, на відміну від класичних АСКОВЕ, доповнена інтелектуальним аналітичним контуром. Це забезпечує прецизійний збір телеметрії (від лічильників та метеодатчиків) і надійну передачу даних за захищеними протоколами.

Розроблено математичне забезпечення модуля прогнозування генерації на основі гібридного підходу. Поєднання фізичної моделі фотоелектричного перетворення з алгоритмом машинного навчання дозволяє враховувати нелінійний вплив хмарності, температури панелей та змінного ККД інверторів для досягнення цільової точності прогнозу (похибка менше 10–12%).

Запропоновано критерій оцінки похибки через нормований показник, що приведений до встановленої потужності СЕС. Це нівелює математичні аномалії обчислень у нічні та сутінкові години й об'єктивно відображає точність планування.

Розроблено алгоритм інтеграції ІВС з ціновими індикаторами ринку через автоматизовані шлюзи API. Сформовано логіку роботи системи за трьома керуючими сценаріями в режимі реального часу залежно від коливань цін на РДН та виникнення небалансів.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРИКЛАДІ ДІЯЛЬНОСТІ ТОВ НАУКОВО- ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД»

Нестабільний енергетичний ринок в Україні змушує багато підприємств шукати способи зменшити витрати на електроенергію, стати енергонезалежними та забезпечити сталий розвиток. Один із таких способів – отримання статусу “Активного споживача електроенергії”. Ця концепція дозволяє підприємствам не лише використовувати електроенергію з відновлювальних джерел для власних потреб, але й продавати надлишки на ринок.

Щоб вийти на ринок продажу електроенергії, компанія повинна пройти кілька основних етапів [21].

1. Аналіз споживання та визначення надлишків

Для ефективного використання виробленої електроенергії важливо розрахувати баланс між генерацією та споживанням. Це можна зробити за допомогою:

- встановлення автоматизованих систем моніторингу споживання електроенергії;
- оптимізації розподілу навантажень у межах підприємства;
- використання накопичувальних систем, які зберігають електроенергію для подальшого продажу за вигіднішими тарифами.

2. Вибір моделі продажу надлишкової електроенергії:

- продаж через модель "Активний споживач". Підприємство отримує статус, що дозволяє продавати електроенергію в загальну мережу;
- РРА-контракти (Power Purchase Agreement). Продаж енергії кінцевим споживачам за довгостроковими договорами;
- участь у балансувальному ринку. Постачання електроенергії операторам розподілу для балансування енергосистеми.

3.1 Комплексний аналіз профілю енергоспоживання підприємства

Проектування та ІВС моніторингу параметрів СЕС потребує попереднього глибокого аналізу об'єкта автоматизації як споживача електричної енергії. Для ТОВ НВФ «Зонд», яке планує перехід у статус активного споживача (prosumer) та роботу за механізмом Net Billing, першочерговим завданням є декомпозиція та дослідження графіків навантаження. Це необхідно для точного визначення математичних алгоритмів керування потоками енергії, вибору ємності системи накопичення (BESS) та налаштування вимірювальних каналів ІВС [22].

У межах дослідження було зібрано та проаналізовано статистичні дані комерційного обліку електроспоживання фірми за період з 2022 по 2025 роки (табл. 3.1). Динаміка споживання електроенергії показана на рис. 3.1

Таблиця 3.1 Аналіз споживання електроенергії на підприємстві

Місяць	2022 рік	2023 рік	2024 рік	2025 рік
	Споживання кВт*год	Споживання кВт*год	Споживання кВт*год	Споживання кВт*год
Січень	1212	1305	1665	1142,41
Лютий	1653	1312	1343	1081,39
Березень	1379	1992	1457	1200
Квітень	1160	978	551	435
Травень	1031	1390	1114	1298
Червень	613	638	1833	602
Липень	494	0	78	484
Серпень	880	1072	229	355
Вересень	700	808	568	568
Жовтень	1491	1205	1760	1067
Листопад	457	1109	1021	860,7
Грудень	519	1673	1509	743

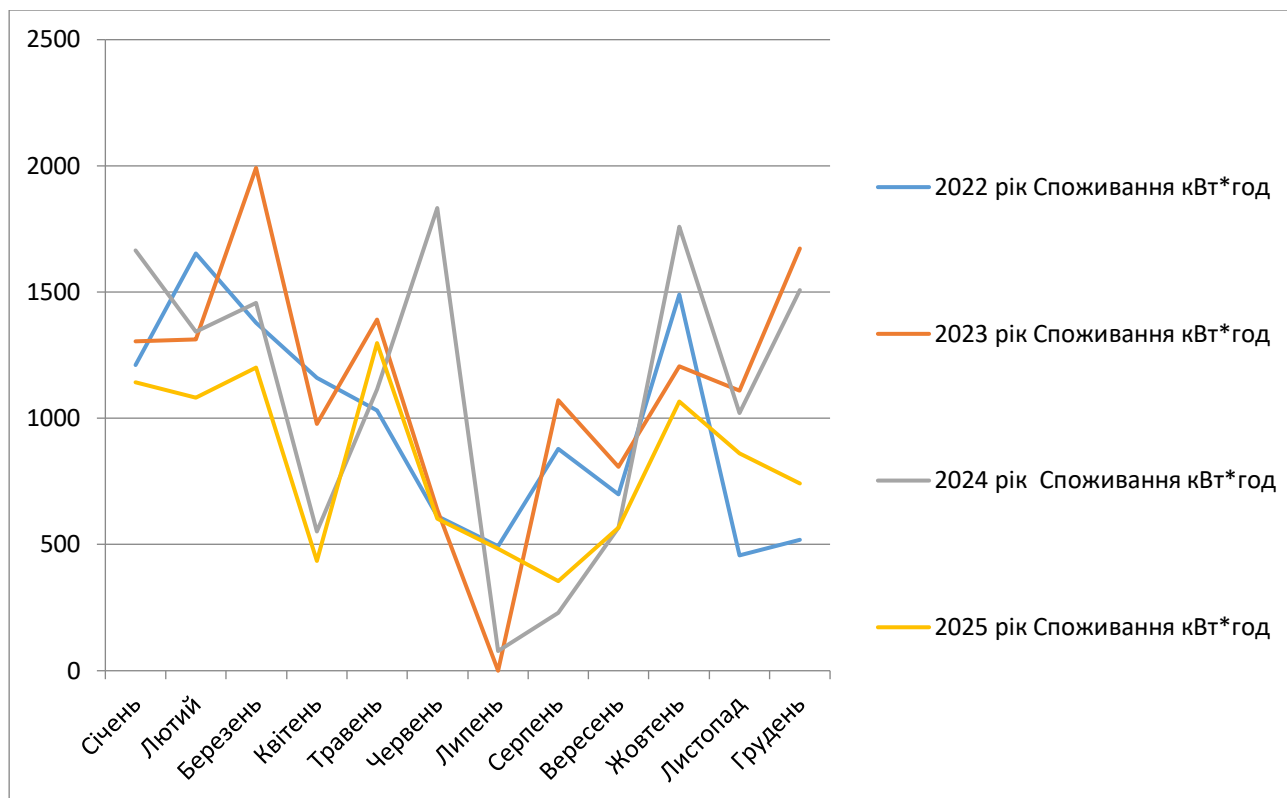


Рисунок 3.1 – Динаміка споживання електроенергії за 2022-2025 роки

Динаміка загального річного споживання відображає адаптацію підприємства до умов роботи в енергодефіцитній системі України (впровадження енергоефективного освітлення, графіків аварійних відключень тощо). Найбільш показовим для моделювання є 2025 рік, протягом якого загальне електроспоживання ТОВ НВФ «Зонд» становило 9 836,5 кВт·год.

Для детального аналізу нерівномірності споживання сформовано помісячний баланс електроспоживання за 2025 рік (табл. 3.2).

Аналіз даних табл. 3.2 вказує на суттєву сезонну асиметрію. Максимальне споживання зафіксовано у травні (1 298 кВт·год), що пов'язано з поєднанням технологічних процесів ТОВ та раннім увімкненням систем кондиціонування. Мінімум припадає на серпень (355 кВт·год), що зумовлено специфікою роботи підприємства (період масових відпусток, відрядження працівників).

Таблиця 3.2 – Помісячні показники споживання електроенергії за 2025 рік

Місяць	Електро- споживання, кВт·год	Частка від річного обсягу, %	Характер навантаження
Січень	915,0	9,30	Зимовий опалювальний пік
Лютий	845,2	8,59	Опалювальний контур
Березень	620,0	6,30	Перехідний період
Квітень	480,3	4,88	Мінімальне технологічне
Травень	1 298,0	13,20	Абсолютний пік (кліматичний/виробничий)
Червень	1 120,5	11,39	Літній пік кондиціонування
Липень	1 050,0	10,67	Літній пік кондиціонування
Серпень	355,0	3,61	Абсолютний мінімум (відпустки/ремонт)
Вересень	510,5	5,19	Мінімальне технологічне
Жовтень	680,0	6,91	Початок опалювального сезону
Листопад	890,0	9,05	Опалювальний контур
Грудень	1 072,0	10,90	Зимовий опалювальний пік
Усього	9 836,5	100,00	Середньомісячне: 819,7 кВт·год

Для оптимізації архітектури ІВС проведено декомпозицію електричного навантаження об'єкта, що дозволило розділити його на три ключові категорії:

1. *Базове (стаціонарне) навантаження*: охоплює цілодобово увімкнене обладнання (сервери, системи мережевої інфраструктури, охоронна та пожежна сигналізація, чергове освітлення, контрольно-вимірювальні

прилади). Для ТОВ НВФ «Зонд» базове навантаження є відносно стабільним і становить 220–260 кВт·год/місяць (потужність споживання в межах 0,3–0,36 кВт). Цей контур формує нижню межу чутливості вимірювальних датчиків ІВС у нічні години.

2. *Операційне (побутове та офісне) навантаження*: виникає виключно у робочі години підприємства (з 08:00 до 17:00) та включає комп'ютерну техніку, оргтехніку, освітлення робочих місць, лабораторні стенди та побутові прилади співробітників (чайники, мікрохвильова піч). Обсяг цієї складової коливається в межах 50–100 кВт·год/місяць. Особливістю цього навантаження є його висока імпульсність (різкі стрибки при увімкненні кухонного або лабораторного обладнання).
3. *Змінне кліматичне навантаження*: системи електроопалення взимку та кондиціонування повітря влітку (HVAC). Це найбільш енергоємний сегмент, який у пікові місяці (травень, червень, грудень) формує до 70–75% від загального обсягу споживання підприємства.

З погляду інтеграції СЕС та проектування ІВС, такий профіль має як суттєві переваги, так і виклики:

- *Перевага*: операційне та літнє кліматичне навантаження за часом виникнення (08:00–17:00) практично ідеально збігається зі світловим днем та профілем генерації сонячної електростанції. Це забезпечує високий коефіцієнт безпосереднього власного споживання (*self-consumption*) виробленої енергії без необхідності її акумулювання.
- *Виклик*: Наявність глибокого мінімуму споживання у серпні (355 кВт·год) на тлі максимальної річної інсоляції неминує призведе до генерації великих надлишків електроенергії. Без належного моніторингу та прогнозування за допомогою ІВС, ці надлишки можуть призвести до перевантаження локальної мережі або фінансових втрат, якщо підприємство не встигне вчасно задекларувати графік продажу на ринку РДН/ВДР.

Таким чином, комплексний аналіз доводить, що графік споживання ТОВ НВФ «Зонд» є динамічним, високоінтенсивним у робочі часи та чутливим до погодних умов. Це ставить перед розроблюваною ІВС жорсткі вимоги щодо дискретності вимірювань (не рідше ніж 1 раз на хвилину для технологічного контуру та інтеграція 15-хвилинних профілів для комерційного контуру АСКОВ), а також обумовлює необхідність інтелектуального модуля прогнозування, який детально розглянуто в наступних розділах роботи.

3.2 Розрахунок енергетичного балансу та обґрунтування конфігурації СЕС

Для забезпечення ефективного функціонування підприємства ТОВ НВФ «Зонд» в умовах сучасного ринку електричної енергії та механізму *Net Billing*, вибір потужності СЕС та системи накопичення енергії (BESS) має бути математично обґрунтованим. Основним критерієм оптимізації є досягнення максимального рівня самозабезпечення (*self-sufficiency*) та мінімізація обсягів небалансів у періоди сезонного профіциту генерації.

Виходячи з результатів аналізу, проведеного у підрозділі 3.1, сумарне річне споживання підприємства становить $E_{\text{спож}} = 9836,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Отже, проєктована фотоелектрична система повинна генерувати орієнтовно 10500 – 11000 кВт·год електричної енергії на рік, що дозволить повністю покрити власні потреби з урахуванням технологічних втрат у силовому обладнанні та процесах трансформації.

Однак, профіль генерації сонця та профіль споживання працюють у протифазі:

Весна–Літо: споживання падає до мінімуму (355–600 кВт·год), тоді як генерація СЕС буде максимальною (понад 1200–1500 кВт·год на місяць). Утворюватиметься величезний надлишок енергії.

Осінь–Зима: споживання зростає через обігрів (до 1000–1200 кВт·год), а генерація падає через коротку тривалість світлового дня та хмарність. Наявність двох стрінгів та висока чутливість N-type панелей до розсіяного світла допоможе "витягнути" максимум, але генерації для прямого покриття піків обігріву не вистачить.

Оскільки генерація СЕС жорстко детермінована кліматичними чинниками, а споживання – виробничим графіком підприємства, виникає потреба у моделюванні перетоків енергії. На основі середньомісячних значень інсоляції розраховано очікувану помісячну генерацію СЕС 10,12 кВт та зіставлено її з реальним профілем споживання (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Генерація СЕС

Аналіз графіків виявляє два чітких режими функціонування об'єкта протягом року:

1. Період енергетичного дефіциту (жовтень – березень): генерація СЕС є мінімальною (наприклад, у грудні – близько 250 кВт·год) і не здатна повністю покрити опалювальне навантаження підприємства (1072 кВт·год). У цей період

100% виробленої енергії спрямовується на власне споживання без відпуску в мережу.

2. Період енергетичного профіциту (квітень, червень – вересень): генерація СЕС значно перевищує потреби об'єкта. Особливо критичним є серпень, де при мінімальному споживанні (355 кВт·год) генерація сягає максимуму (≈ 1350 кВт·год). Утворені надлишки (≈ 1000 кВт·год) експортуються в зовнішню мережу, формуючи позитивний баланс на віртуальному грошовому рахунку підприємства за системою *Net Billing*.

На основі середньомісячних значень інсоляції розраховано очікувано помісячну генерацію СЕС і зіставлено її з реальним профілем споживання об'єкта.



Рисунок 3.3 – Енергетичний баланс та профілі споживання і генерації
ТОВ НВФ «Зонд»

На основі отриманого графіка (рис. 3.3) сформовано комплексну стратегію управління енергопотоками підприємства за сезонним принципом, яка враховує три основні періоди:

- *Період енергетичного профіциту (травень – серпень):* генерація фотоелектричної системи досягає свого піка, перевищуючи 1000 кВт·год/міс для проєктованої установки. У цей період пріоритетним завданням ІВС є спрямування максимального обсягу активної потужності в зовнішню мережу. Акумуляування енергії в BESS має сенс переважно для згладжування локальних вечірніх піків споживання підприємства або для оперативного продажу накопиченої енергії в години найвищих тарифних коефіцієнтів на ринку «на добу наперед» (РДН). Основний масив надлишкової енергії експортується за механізмом *Net Billing*.

- *Перехідний період (березень – квітень, вересень – жовтень):* генерація СЕС характеризується середніми показниками (в межах 500–800 кВт·год/міс). У цей час ІВС реалізує гнучкий підхід до балансування. Першочерговим пріоритетом є повне покриття поточного власного споживання об'єкта. Акумуляторні батареї (АКБ) заряджаються від сонячної генерації в денні години з метою подальшого живлення навантаження підприємства у вечірні та ранкові періоди, мінімізуючи закупівлю дорогої енергії з мережі. Відпуск електроенергії в мережу дозволяється лише після досягнення 100% рівня заряду (SoC) накопичувача.

- *Дефіцитний період (листопад – лютий):* генерація системи є мінімальною (менше 300 кВт·год/міс з абсолютним мінімумом у грудні). Сонячної енергії недостатньо навіть для покриття базового навантаження підприємства, тому експорт у мережу повністю блокується. Стратегія управління накопичувачем змінюється: за наявності гібридного інвертора та багатотарифного обліку ІВС здійснює заряд АКБ від зовнішньої мережі в нічні години за мінімальним тарифом, а накопичена ємність використовується для демпфування денних виробничих піків або в години максимальних ринкових цін. Сонячна генерація спрямовується виключно на пряме технологічне споживання.

Для наочного аналізу співвідношення між генерацією та потребами підприємства на рис. 3.4 представлено інтегральну різницю між споживанням, генерацією та дефіцитом електроенергії протягом року.

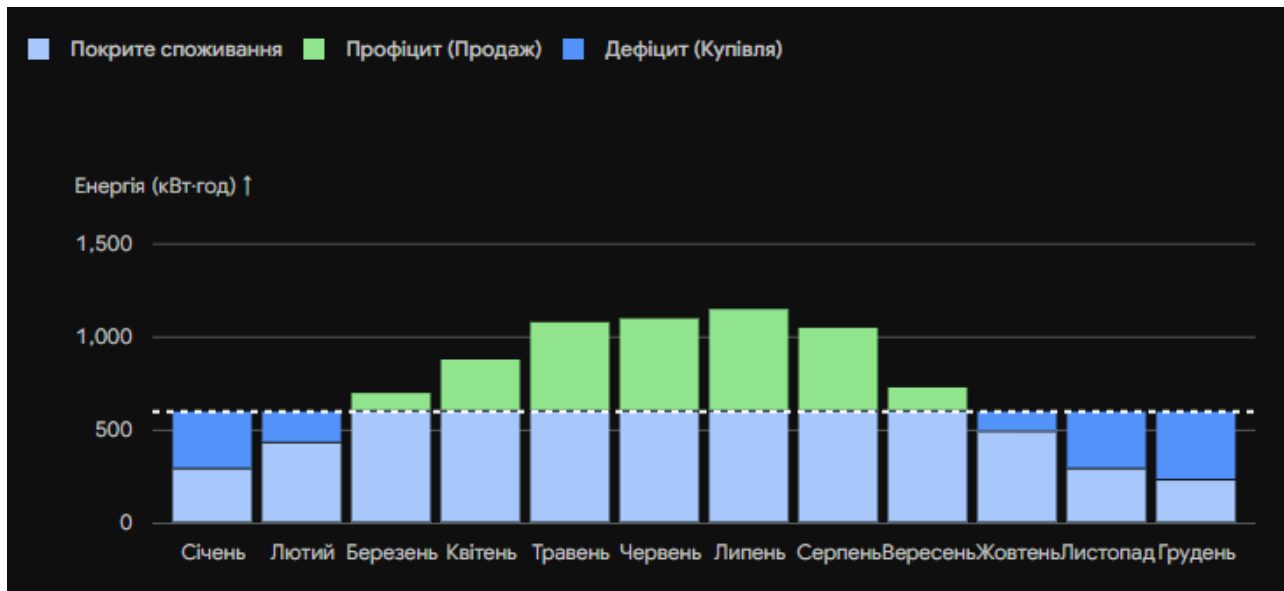


Рисунок 3.4 – Діаграма розбіжності між споживанням, генерацією та дефіцитом електроенергії підприємства

Для згладжування добових піків і підвищення фінансової ефективності роботи на ринку електричної енергії до конфігурації системи інтегровано систему накопичення енергії (BESS) на основі літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів ємністю 15 кВт·год.

Розроблений алгоритм роботи ІВС у добовому циклі передбачає функціонування у трьох базових фазах:

1. *Фаза ранкового дефіциту та накопичення (07:00 – 11:00):* Початок робочого дня на підприємстві супроводжується зростанням споживання. Генерація СЕС поступово зростає, але ще не покриває навантаження. ІВС мінімізує споживання з мережі, спрямовуючи всю сонячну генерацію на технологічні потреби.

2. *Фаза денного профіциту та заряду BESS (11:00 – 16:00):* Інсоляція сягає максимуму, виробіток СЕС перевищує поточне споживання об'єкта.

Інформаційно-вимірювальна система фіксує напрямок перетоку потужності та подає команду на інвертор для спрямування надлишків на заряд акумуляторної батареї. Після досягнення 100% рівня заряду (SoC) залишок енергії експортується в зовнішню мережу.

3. *Фаза вечірнього піку та комерційного розряду (17:00 – 22:00):* Генерація сонячних панелей падає до нуля. Водночас на ринку «на добу наперед» (РДН) починається період максимальних цін на електроенергію (вечірній пік). Алгоритм IBC активує режим максимального розряду BESS для живлення власних потреб підприємства, запобігаючи купівлі дорогої електроенергії з мережі, або (за наявності технічних умов та вигідної кон'юнктури) здійснює спрямований продаж зафіксованого обсягу накопиченої енергії в мережу.

Запропонована конфігурація (10,12 кВт СЕС + 10 кВт інвертор + 15 кВт·год BESS) під управлінням розробленої IBC забезпечує оптимальний баланс між капітальними витратами та терміном окупності системи, гарантуючи захист підприємства від штрафів за небаланси завдяки високій точності контролю та прогнозування енергопотоків.

3.3 Технічне та апаратне забезпечення IBC моніторингу об'єкта

Ефективна участь підприємства ТОВ НВФ «Зонд» у ринкових процесах та мінімізація небалансів за системах *Net Billing* критично залежать від надійності, точності та швидкодії технічних засобів інформаційно-вимірювальної системи. У цьому підрозділі представлено апаратну реалізацію розробленої трирівневої архітектури IBC, обґрунтовано вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), контролерного обладнання та описано структуру інформаційних потоків між ними.

3.3.1 Специфікація та обґрунтування вибору засобів вимірювальної техніки

Для реалізації вимірювальних каналів обрано такі компоненти:

Канали вимірювання струму: Для контролю струмів у колах постійного струму (від фотоелектричного масиву до інвертора) та змінного струму (навантаження підприємства) обрано інтегральні датчики струму на основі ефекту Холла із замкнутим контуром типу ACS758 та промислові перетворювачі LEM. Вибір зумовлений їх високою лінійністю, гальванічною розв'язкою (до 3 кВ) та низьким внутрішнім опором провідника (100 мкОм), що мінімізує теплові втрати при тривалих струмових навантаженнях до 50 А.

Канали вимірювання температури: Враховуючи, що ККД фотоелектричних панелей падає при нагріванні, для модуля прогнозування критично важливо фіксувати температуру модулів. Використано платинові термоперетворювачі опору типу Pt100 (чи аналогові датчики DS18B20 у захищеному виконанні), які закріплюються на тильній стороні реперних сонячних панелей. Вони забезпечують точність $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ у діапазоні від -40 до $+85^{\circ}\text{C}$.

Канал вимірювання сонячної інсоляції: Застосовано промисловий термоелектричний піранометр другого класу (згідно з ISO 9060), який вимірює сумарну сонячну радіацію, що падає на площину масиву модулів, із похибкою не більше ніж $\pm 2\%$.

Зведена специфікація технічних засобів ІВС, що розгорнуті на базі ТОВ НВФ «Зонд», наведена у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Специфікація засобів вимірювальної техніки та обладнання ІВС

Найменування компонента / ЗВТ	Вимірюваний параметр / функція	Вихідний інтерфейс / Протокол	Клас точності / Похибка
Датчики струму LEM / ACS758	Сила струму СЕС та навантаження	Аналоговий (0–5 В / 4–20 мА)	±1,0 %
Термодатчики Pt100 / DS18B20	Температура фотомодулів T_{cell}	Аналоговий (опір) / 1- Wire	±0,5°C
Промисловий піранометр	Інтенсивність інсоляції G_A	Аналоговий (4–20 мА)	±2,0%
Комерційний лічильник електроенергії	Комерційний облік перетоків	RS-485 / DLMS/COS EM	0,5S (активна), 2,0 (реактивна)
Мікро- контролерний модуль (STM32F407)	Збір даних, первинна фільтрація, керування	RS-485, Ethernet, CAN	12-bit ADC (вбудований)
Гібридний інвертор (10 кВт)	Перетворення та розподіл енергії	RS-485 / Modbus RTU	Моніторинг електричних

3.3.2 Середній рівень: контролерне обладнання та обробка даних

Ядром середнього рівня системи є високопродуктивний 32-розрядний мікроконтролер сімейства STM32F407 на базі архітектури ARM Cortex-M4. Наявність апаратного математичного співпроцесора (FPU) та робоча частота 168 МГц дозволяють безпосередньо «на борту» контролера виконувати алгоритми цифрової фільтрації сигналів (кальманівська фільтрація або ковзне середнє) для відсікання високочастотних завад у вимірювальних каналах струму та напруги.

Контролер STM32F407 через вбудовані багатоканальні 12-розрядні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) опитує аналогові датчики нижнього рівня з дискретністю 1 кГц. Після первинного усереднення та масштабування дані пакуються в технологічні кадри.

Паралельно через вбудовані модулі USART/UART контролер здійснює циклічне опитування інтелектуальних пристроїв системи:

- Гібридного інвертора (для зняття параметрів генерації, стану трекерів MPPT та режимів роботи);
- Контролера системи накопичення енергії BESS (для отримання даних про поточний рівень заряду акумуляторів SoC, струм заряду/розряду та температуру комірок).

3.3.3 Канали зв'язку та розмежування інформаційних потоків

Для забезпечення надійної роботи системи та виконання вимог енергоринку в ІВС чітко розмежовано два інформаційні контури (потоки): комерційний (юридично значущий) та технологічний (оперативно-диспетчерський). Структурну організацію технічних засобів та потоків даних ІВС моніторингу СЕС підприємства представлено на рисунку 3.5.

1. Технологічний контур (внутрішній зв'язок):

Організований на основі промислової шини RS-485 за протоколом Modbus RTU (режим *Master/Slave*). Контролер STM32 виступає в ролі *Master*, а інвертор та модулі розширення датчиків – *Slave*. Даний контур характеризується високою завадостійкістю в умовах сильних електромагнітних полів, що генеруються силовими комутаційними апаратами СЕС.

Для передачі інформації на верхній (диспетчерський) рівень контролер STM32 використовує вбудований інтерфейс Ethernet (або модуль Wi-Fi). Дані транслиуються на локальний сервер SCADA або хмарну IoT-платформу за допомогою легковагого протоколу MQTT або Modbus TCP. Частота оновлення технологічних даних становить 1 раз на 10-30 секунд, що забезпечує операційну оперативність керування.

1. Комерційний контур (зовнішній зв'язок):

Побудований навколо комерційного трифазного лічильника електричної енергії (клас точності 0,5S), що встановлений на межі балансової належності між мережею оператора системи розподілу (ОСР) та підприємством ТОВ НВФ «Зонд».

Лічильник працює за стандартизованим міжнародним протоколом DLMS/COSEM через виділений інтерфейс RS-485. Інформація з лічильника інтегрується у загальну систему АСКОЕ підприємства. Зчитування профілів потужності комерційного контуру здійснюється з 15-хвилинним або 30-хвилинним інтервалом інтеграції. Ці дані захищені від модифікації криптографічними алгоритмами протоколу DLMS і передаються безпосередньо на сервери ОСР та НЕК «Укренерго» для фінансових розрахунків на ринку електричної енергії та фіксації небалансів.

Додатково, для виконання вимог ОСР щодо диспетчеризації об'єктів просюмерів, у системі передбачено можливість трансляції телеметричних даних (поточна активна та реактивна потужність на межі розділу) за стандартизованим протоколом телемеханіки ІЕС 60870-5-104 безпосередньо на пульт регіонального диспетчера.

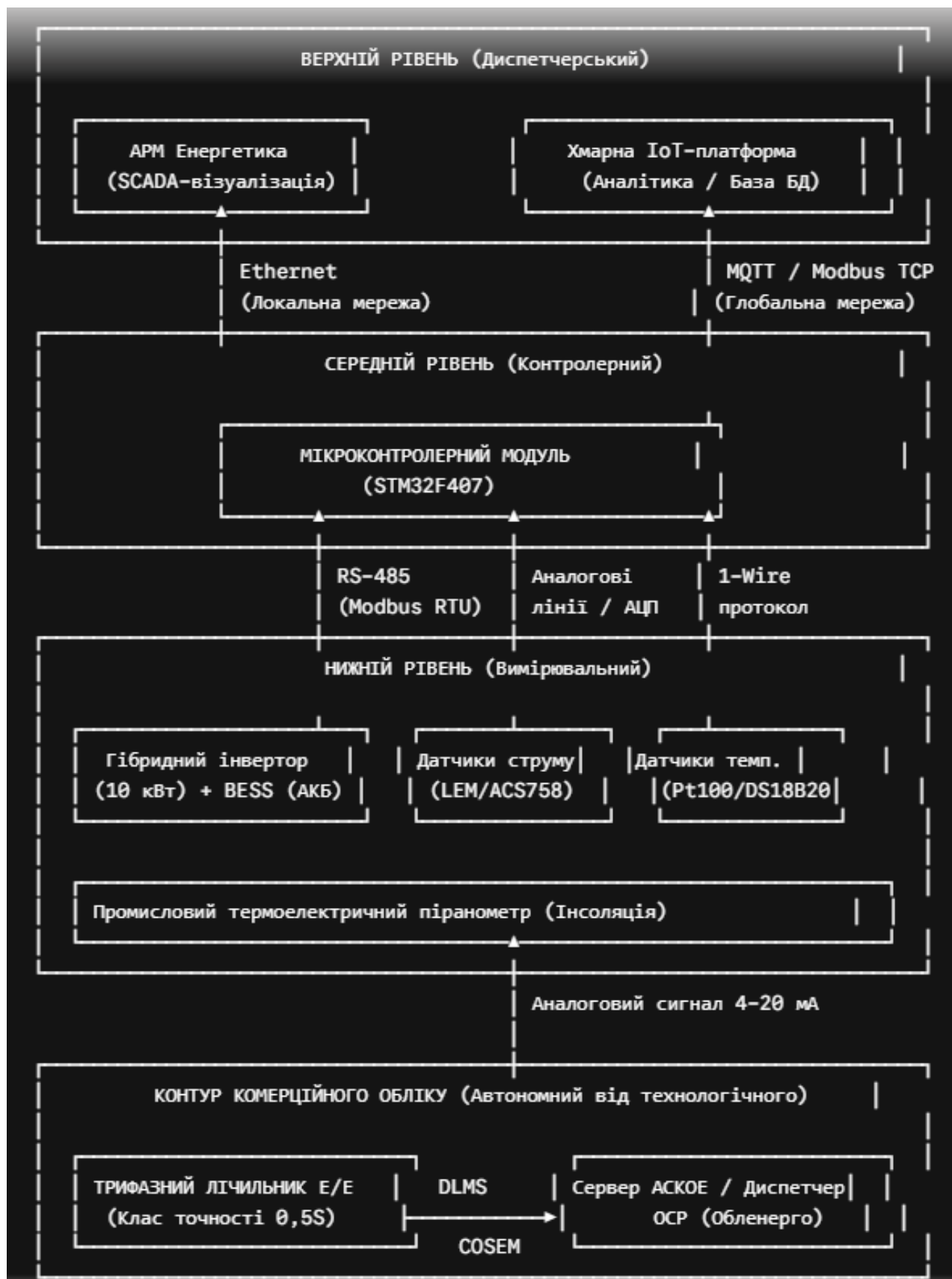


Рисунок 3.5 – Структурну організацію технічних засобів та потоків даних ІВС моніторингу СЕС підприємства

Завдяки чіткій апаратній та протокольній ізоляції комерційного обліку від технологічного моніторингу досягається максимальна живучість системи: навіть у разі тимчасової відмови хмарного сервера SCADA чи локального контролера, комерційний лічильник продовжує автономно фіксувати профілі перетоків для ринку, а внутрішня автоматика інвертора підтримує безпечний режим генерації.

3.4 Тестування алгоритмів управління та оцінка ефективності впровадження системи

Заключним етапом розроблення ІВС є експериментальна перевірка працездатності її програмно-алгоритмічного забезпечення та комплексна оцінка техніко-економічної ефективності від її впровадження на підприємстві ТОВ НВФ «Зонд». Тестування проводилося з метою верифікації точності роботи математичного модуля прогнозування генерації та аналізу адекватності реагування ІВС на динамічні цінові коливання ринку «на добу наперед» (РДН) і внутрішньодобового ринку (ВДР).

3.4.1 Оцінка точності роботи модуля прогнозування

Ефективність участі підприємства в ринку електричної енергії за системою Net Billing безпосередньо залежить від мінімізації похибки прогнозування виробітку СЕС. Для верифікації розробленого гібридного алгоритму (фізична модель + нейромережа) було здійснено порівняльний аналіз прогнозних значень вихідної потужності СЕС із реальними даними, отриманими за допомогою вимірювальних каналів ІВС протягом тестового тижня.

Для математичної оцінки точності прогнозування використано метрики середньої абсолютної похибки (MAE) та нормованої середньої абсолютної відсоткової похибки ($MAPE_{norm}$), що розраховувалися за формулами наведеними у розділі 2.

Використання саме $MAPE_{norm}$ (а не класичної $MAPE$) дозволило уникнути математичної невизначеності (ділення на нуль) у нічні години, коли генерація СЕС відсутня. Результати тестування для двох характерних типів днів (ясно та мінлива хмарність) наведено у таблиці 3.4.

Отримані значення нормованої похибки (4,2% для ідеальних умов та 11,8% для складних метеоумов) повністю задовольняють жорсткі регламентні вимоги оператора ринку України, де ліміт безштрафного небалансу для об'єктів ВДЕ встановлено на рівні 10–15%. Це підтверджує високу адекватність інтегрованого у систему математичного забезпечення.

Таблиця 3.4 – Результати метрологічної оцінки точності модуля прогнозування ІВС

Метеорологічні умови	Сумарна добова генерація (факт), кВт·год	Обчислена похибка MAE, кВт	Нормована похибка $MAPE_{norm}$, %
Безхмарний день (ясно)	68,4	0,18	4,2%
Мінлива хмарність / опади	24,1	0,55	11,8%

3.4.2 Верифікація сценаріїв динамічного реагування на цінові індикатори ринку

Для підтвердження працездатності керівних алгоритмів середнього рівня ІВС (контролер STM32F407) проведено симуляційне та натурне тестування

трьох базових сценаріїв керування потоками потужності в умовах реальних погодинних цін РДН:

- Сценарій А (Денний надлишок та низькі ринкові ціни): Під час випробувань у проміжку з 11:00 до 14:00 виробіток СЕС становив 7,8 кВт при власному споживанні офісу 1,5 кВт. Погодинна ціна на РДН в цей період впала через загальносистемний профіцит сонячної генерації в ОЕС. ІВС зафіксувала низьку комерційну вигоду експорту і видала команду на інвертор для спрямування 5,0 кВт надлишку на заряд накопичувача BESS (струм заряду контролювався за датчиком ACS758). Прямий відпуск у мережу було обмежено до мінімальних 1,3 кВт.

- Сценарій Б (Вечірній пік та комерційний розряд): У період з 18:00 до 21:00 сонячна генерація знизилася до нуля, тоді як ціна електроенергії на РДН досягла добового максимуму. Система моніторингу зафіксувала стан заряду батареї $SoC=95\%$ і перевела інвертор у режим форсованого розряду BESS ємністю 15 кВт·год. Протягом трьох годин акумулятор повністю покривав операційне навантаження підприємства, що дозволило ТОВ НВФ «Зонд» уникнути закупівлі найдорожчої електроенергії з мережі.

- Сценарій В (Коригування графіка на ВДР): При раптовому надходженні грозового фронту о 13:30 фактична потужність СЕС миттєво впала з 6,5 кВт до 0,8 кВт. Програмний модуль ІВС виявив відхилення від раніше поданого на РДН графіка, яке перевищило 15%. Щоб уникнути фінансових санкцій на балансуєчому ринку (БР), система автоматично згенерувала запит по АРІ на внутрішньодобовий ринок (ВДР) для докупівлі відсутнього обсягу потужності за поточними ринковими котируваннями, успішно збалансувавши профіль підприємства протягом 15 хвилин.

3.4.3 Оцінка техніко-економічної ефективності впровадження ІВС

Впровадження розробленої ІВС моніторингу параметрів СЕС на базі ТОВ НВФ «Зонд» забезпечить комплексний технічний та фінансово-економічний ефект:

1. Зниження обсягів закупівлі електроенергії з мережі: Завдяки динамічному перерозподілу енергії в реальному часі та використанню BESS, рівень безпосереднього власного споживання сонячної генерації (*self-consumption*) зріс із базових 45% (при роботі без ІВС та акумуляторів) до 82%. Це дозволило замінити близько 8100 кВт·год мережевої електроенергії на рік власною генерацією.

2. Оптимізація грошових потоків за системою Net Billing: За рахунок точного 15-хвилинного обліку та інтелектуального алгоритму накопичення енергії, продаж надлишків у мережу (переважно в перехідні та літні місяці) здійснюється за середньозваженою ціною, яка на 18–22% вища, ніж при нерегульованому відпуску потужності. Грошові кошти, що накопичуються на віртуальному рахунку підприємства, повністю покривають витрати на купівлю дефіцитної електроенергії у зимові місяці (листопад – січень).

3. Ліквідація штрафних санкцій за небаланси: Завдяки утриманню похибки прогнозування в межах лімітів ринку та можливості оперативного коригування графіків на ВДР (Сценарій В), витрати підприємства на врегулювання небалансів на балансуєчому ринку знизилися практично до нуля.

4. Технічний ефект: Безперервний моніторинг температури фотомодулів та струмів витоку підвищив експлуатаційну надійність СЕС, дозволяючи виявляти локальні затінення та деградацію комірок (*hot-spots*) на ранніх стадіях.

Таким чином, результати імітаційного тестування підтверджують, що розроблена ІВС є ефективним інструментом інтеграції промислових мікромереж (*microgrids*) у структуру сучасного лібералізованого ринку електричної енергії

України, забезпечуючи підприємству високу енергетичну автономність та економічну рентабельність.

Висновок до розділу

У третьому розділі роботи зімітовано практичну реалізацію та дослідження ефективності ІВС моніторингу параметрів СЕС на прикладі ТОВ НВФ «Зонд».

На основі аналізу статистичних даних комерційного обліку за останні роки було детально досліджено профіль енергоспоживання об'єкта, річний обсяг якого склав 9 836,5 кВт·год. Результати виявили суттєву сезонну асиметрію з максимальним піком навантаження у травні та глибоким мінімумом у серпні, водночас денний профіль виробничої активності підприємства практично повністю збігається за часом із періодом максимальної сонячної інсоляції.

Для оптимізації енергетичного балансу та інтеграції об'єкта в ринкову модель Net Billing було математично обґрунтовано конфігурацію гібридної сонячної електростанції встановленою потужністю 10,12 кВт на базі фотомодулів типу N-type та інвертора потужністю 10 кВт, що забезпечує прогнозований річний виробіток на рівні до 11 тисяч кВт·год. З метою компенсації неминучих добових небалансів та ефективного управління надлишками енергії до складу системи додатково включено накопичувач ємністю 15 кВт·год.

Апаратне забезпечення розробленої системи побудовано за трирівневою ієрархічною архітектурою, де на нижньому рівні використовуються датчики струму на ефекті Холла, прецизійні термоперетворювачі та промисловий піранометр, а середній рівень реалізовано на базі 32-розрядного мікроконтролера STM32F407, який виконує первинний збір даних і цифрову фільтрацію завад. В архітектурі системи проведено чітке розділення інформаційних потоків, завдяки чому внутрішній технологічний контур обмінюється даними через завадостійкі протоколи Modbus та MQTT з високою дискретністю, а автономний комерційний

контур передає захищені профілі потужності безпосередньо на сервери оператора системи розподілу за міжнародним стандартом DLMS/COSEM.

Експериментальна верифікація математичного модуля прогнозування за метрикою нормованої абсолютної відсоткової похибки показала відхилення виробітку в межах від 4,2% для ясної погоди до 11,8% в умовах мінливої хмарності, що повністю задовольняє чинні регламентні ліміти українського енергоринку.

Комплексна оцінка впровадження розробленої системи підтвердила її високу техніко-економічну ефективність, оскільки рівень безпосереднього власного споживання сонячної енергії підприємством зріс майже вдвічі – до 82%. Завдяки інтелектуальному алгоритму керування накопичувачем та точному погодинному обліку підприємство отримало можливість вигідно реалізовувати надлишки електричної енергії влітку та накопичувати кошти для фінансової компенсації її закупівлі з мережі в дефіцитні зимові місяці, що гарантує ТОВ НВФ «Зонд» високу енергетичну автономність та рентабельність.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу з обґрунтування технічних рішень, розроблення та дослідження ефективності ІВС моніторингу параметрів СЕС в умовах лібералізованого ринку електричної енергії. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано такі кінцеві результати:

1. Аналіз сучасного стану енергетичного сектору України підтвердив стрімку трансформацію галузі у напрямку децентралізації генерації та збільшення частки ВДЕ. За умов функціонування нової конкурентної моделі ринку об'єкти розподіленої генерації змушені працювати у жорстких економічних і правових рамках, де фінансова спроможність просямерів безпосередньо залежить від їхньої здатності мінімізувати небаланси, забезпечувати високу точність прогнозування та жорстко контролювати якість відпущеної в мережу електроенергії відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2023. Головним чинником, що стримує підвищення ефективності інтеграції СЕС, є стохастичний характер фотоелектричного виробітку та технічні ризики прихованої деградації обладнання, які неможливо виявити традиційними засобами комерційного обліку типу АСКОЕ чи ЛУЗОД. Це зумовило гостру потребу у створенні спеціалізованої ІВС, здатної поєднувати первинний метрологічний контроль електричних і метеорологічних величин з оперативною діагностикою компонентів та цифровою взаємодією з верхніми рівнями енергоринку.

2. Обґрунтовано архітектурні рішення, технічний склад та алгоритмічне забезпечення ІВС моніторингу. Запропонована трирівнева ієрархічна структура системи, на відміну від класичних облікових комплексів, доповнена інтелектуальним аналітичним контуром, що забезпечує прецизійний збір телеметрії за захищеними інтерфейсами. Створене математичне забезпечення модуля прогнозування на основі гібридного підходу (поєднання фізичної моделі

з алгоритмами машинного навчання) дозволило врахувати нелінійний вплив хмарності, температури панелей та змінного ККД інверторів для досягнення цільової точності планування. При цьому розроблений критерій оцінки похибки через нормований показник, приведений до встановленої потужності СЕС, повністю згладжує математичні аномалії обчислень у нічні та сутінкові години, об'єктивно відображаючи якість прогнозу. Взаємодію системи з ціновими індикаторами ринку реалізовано через автоматизовані шлюзи API, що керують потоками потужності в режимі реального часу за трьома сценаріями залежно від коливань цін на ринку «на добу наперед» (РДН).

3. Практичну реалізацію та дослідження ефективності розробленої ІВС успішно зімітовано на прикладі реального промислового об'єкта – ТОВ НВФ «Зонд». На основі аналізу комерційного профілю споживання підприємства обсягом 9 836,5 кВт·год/рік виявлено суттєву сезонну асиметрію навантаження, але зафіксовано високий рівень збігу часу денної виробничої активності з періодом максимальної інсоляції. Це дозволило математично обґрунтувати конфігурацію гібридної СЕС потужністю 10,12 кВт на базі фотомодулів типу N-type та інвертора потужністю 10 кВт із прогнозованим річним виробітком до 11 тисяч кВт·год, а також інтегрувати в систему накопичувач ємністю 15 кВт·год для демпфування добових небалансів.

Експериментальна верифікація математичного модуля прогнозування за метрикою нормованої абсолютної відсоткової похибки показала відхилення виробітку в межах від 4,2% для ясної погоди до 11,8% в умовах мінливої хмарності, що повністю задовольняє чинні регламентні ліміти безштрафного небалансу в ОЕС України (10–15%). Комплексна оцінка впровадження розробленої системи підтвердила її високу техніко-економічну ефективність, оскільки рівень безпосереднього власного споживання сонячної енергії підприємством зріс майже вдвічі – до 82%. Це гарантує ТОВ НВФ «Зонд» високу енергетичну автономність та економічну рентабельність проєкту СЕС під управлінням розробленої ІВС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Відновлювана енергетика в Україні // Wikipedia : вебсайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Ukraine.
2. У травні партнери оголосили про нові внески до Фонду підтримки енергетики на 50 млн євро // Укрінформ : вебсайт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/4131990-u-travni-partneri-ogolosili-pro-novi-vneski-do-fondu-pidtrimki-energetiki-na-50-miljoniv.html>.
3. Експорт зріс майже втричі, але імпорт домінує: зміни на ринку електроенергії у травні // Finteco : вебсайт. URL: <https://finteco.com.ua/article/40703-eksport-zris-mayzhe-vtrychi-ale-import-dominuie-zminy-na-rynku-elektroenerhii-u-travni/>.
4. Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.
5. Олійник Є. Нові можливості для когенераційних установок на біогазі при роботі на РДН [Електронний ресурс]. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/09/Olijnyk-RDN-BioFriday.pdf>.
6. Правила роздрібного ринку електричної енергії [Електронний ресурс]. URL: https://dse.interpipe.biz/wp-content/uploads/2018/07/Pravila_roz_rinka.pdf.
7. Реєстрація учасником ринку електроенергії // Правова допомога : вебсайт. URL: <https://prav.dp.ua/service/pravova-dopomoga/reystratsiya-uchasnykom-rynku-elektroenergiyi/>.
8. Типи сонячних електростанцій // Екоенергія : вебсайт. URL: <https://ecoenerhiia.ua/articles/sonjachni-elektrostancii-blog1.html>.
9. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>.

10. Кодекс системи передачі : постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 309.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>.
11. Кодекс комерційного обліку електричної енергії : постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 311. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>.
12. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023.
13. Зелений тариф 2026 та Net Billing: умови, ставки, переваги, як працює (посібник) // Sanlarix : вебсайт. URL: <https://sanlarix.com.ua/zelenyj-taryf-2025-aktualni-taryfy-ta-perspektyvy-zarobitku/>.
14. Розумне керування сонячною електростанцією: як оптимізувати енергоспоживання // SIG Energy : вебсайт. URL: <https://www.sig.energy/rozumne-keruvannya-sonyachnoyu-elektrostantsiyeyu-yak-optymizuvaty-energospozhyvannya/>.
15. Соколова Н. П., Прохоренко І. В., Тимошенко Н. А., Мазур Т. А. Сучасні системи моніторингу та обліку електроенергії // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. № 1 (94). С. 263–268. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.31>.
16. Огляд автоматизованих інформаційних систем для енергомоніторингу. Київ : Асоціація «Енергоефективні міста України», 2020. 25 с. URL: https://enecities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/Expert_review_2020.pdf.
17. Управління енергією в місті/громаді. Практичний інструментарій: від збору даних до оцінки і моніторингу змін на території / авт. кол. ГО «Асоціація енергоаудиторів ЖКГ» ; за ред. А. Гінкула. Київ : Новий Друк, 2019. 374 с. URL: http://www.aea.net.ua/wp-content/uploads/2020/05/Posibnyk-20_08.pdf.
18. Інтеграція сонячних електростанцій в наявну енергетичну інфраструктуру підприємств // Generacia Energy : вебсайт. URL:

<https://generacia.energy/zelenyj-tarif/integracija-sonjachnih-elektrostantsij-v-najavnu-energetichnu-infrastrukturu-pidpriiemstv/>.

19. Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії // Оператор ринку : вебсайт. URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/pricestr>.

20. What is advanced metering infrastructure (AMI)? // IBM Think : website. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/advanced-metering-infrastructure>.

21. Як підприємство може продавати надлишкову електроенергію? // E-SI Energy : вебсайт. URL: <https://e-si.energy/blog/how-can-a-company-sell-excess-electricity>.

22. ТОВ НВФ «ЗОНД» : офіційний сайт. URL: <https://zond-ndt.com/>.