

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»**

**Інженерно-технічний факультет  
Кафедра електронних систем**

**ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ**

**Конспект лекцій**

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Рівень вищої освіти</b> | <b>Перший (бакалаврський)</b>   |
| <b>Галузь знань</b>        | <b>G Інженерія, виробництво та будівництво</b>                                  |
| <b>Спеціальність</b>       | <b>G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка</b> |
| <b>Освітня програма</b>    | <b>Електронні системи</b>   |
| <b>Статус дисципліни</b>   | <b>обов'язкова</b>  |
| <b>Мова навчання</b>       | <b>українська</b>   |

**СХВАЛЕНО**  
на засіданні кафедри  
електронних систем.  
Протокол №10  
від 22.06.2025р.

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Цифрові технології в енергетиці» для здобувачів вищої освіти галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво, спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, освітньої програми Електронні системи.

Розробники: Юркін І.М., к.ф.-м.н.,доц., кафедра електронних систем,  
Заяць Т.М., к.ф.-м.н.,доц., кафедра електронних систем,  
Іваницький В.П., доктор фіз.-мат. наук, проф., кафедра  
приладобудування.

Рецензент: Сусліков Л.М., доктор фіз.-мат. наук, проф., кафедра прикладної фізики і квантової електроніки

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП  | 4  |
| 1. ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ПРОМИСЛОВOSTІ   | 5  |
| 1.1 Стандарти ISO 50001 та інші підходи до енергоаудиту                                | 5  |
| 1.2 Аналіз втрат енергії на різних етапах виробництва                                  | 8  |
| 1.3 Практичні приклади   | 10 |
| 2. ОСНОВИ ІНДУСТРІЇ 4.0 В ЕНЕРГЕТИЦІ   |    |
| 2.1. Принципи Енергетики 4.0   | 15 |
| 2.2 Автоматизоване управління енергетичними процесами                                  | 18 |
| 2.3 Прогнозування енергоспоживання та генерації  | 25 |
| 2.4.Цифрові двійники в енергетиці  | 30 |
| 2.5.Адаптивне регулювання навантаження в енергетичних системах промислових підприємств | 42 |
| 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕНЕРГЕТИЦІ                                       |    |
| 3.1 Цифрові підстанції (ІЕС 61850)   | 51 |
| 3.2. Практичні приклади використання цифрових підстанцій                               | 58 |
| 3.3. Smart Grid та SCADA-системи   | 58 |
| 3.4 Практичні приклади використання Smart Grid та SCADA-системи                        | 61 |
| ВИСНОВКИ   | 63 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ   | 64 |

## ВСТУП

У сучасних умовах трансформації енергетики, викликаній зростанням обсягів децентралізованої генерації, необхідністю підвищення енергоефективності та впровадженням відновлюваних джерел енергії, цифрові технології стають фундаментальним чинником сталого розвитку промислових підприємств. Проте, попри інтенсивний розвиток окремих цифрових платформ, значна кількість підприємств все ще стикається з проблемами інтеграції SCADA-систем, ефективного використання смарт-лічильників, прогнозування генерації та навантаження, а також впровадження адаптивного керування навантаженням.

Навчальний посібник «Цифрові технології в енергетиці» спрямований на подолання саме цих проблем і орієнтований як на студентів бакалаврського рівня за спеціальністю G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, так і на фахівців підприємств, що впроваджують цифрові рішення в енергетиці. Його актуальність визначається потребою в міждисциплінарній підготовці інженерів, здатних поєднувати знання з енергоменеджменту, автоматизації, аналітики даних і технологій Smart Grid.

Новизна матеріалу полягає в практичному узагальненні сучасного досвіду цифровізації енергетичних процесів на прикладі українських підприємств (зокрема, ПАТ «Хмельницькобленерго», ПАТ «Київобленерго»), а також у детальному аналізі структури цифрових двійників, IoT-інфраструктури, прогнозних моделей на основі штучного інтелекту. У конспекті лекцій також ураховуються виклики, пов'язані з впровадженням ISO 50001, потребами адаптивного навантаження та забезпеченням надійності роботи в умовах використання ВДЕ.

Таким чином, даний конспект лекцій є важливим інструментом не лише академічного, а й прикладного навчання для майбутніх фахівців та чинних працівників підприємств, які мають реалізовувати принципи Енергетики 4.0 в умовах сучасної промислової дійсності.

# 1 ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ПРОМИСЛОВОСТІ

Енергоефективність у промисловості є ключовим чинником для зниження витрат, підвищення конкурентоспроможності та зменшення впливу на навколишнє середовище. Цей розділ розглядає фундаментальні аспекти енергоефективності, зокрема аналіз втрат енергії, оптимізацію режимів роботи обладнання та впровадження стандартів енергоменеджменту, таких як ISO 50001.

## 1.1 Стандарти ISO 50001 та інші підходи до енергоаудиту

Стандарт ISO 50001:2018 (Energy management systems — Requirements with guidance for use) є міжнародною нормою, яка визначає вимоги до створення, впровадження, підтримання та покращення системи енергетичного менеджменту (СЕМ)[1]. Метою є систематичне підвищення енергоефективності, зниження витрат та зменшення впливу на довкілля. ISO 50001 заснований на моделі PDCA (Plan-Do-Check-Act) [2], що застосовується також у системах ISO 9001[3] та ISO 14001[4].

**Таблиця 1.1 - Основні етапи впровадження системи енергоменеджменту**

| Етап                                      | Опис   | Інструменти/Методи                                      |
|---|--|---|
| 1. Аналіз енергоспоживання                | Ідентифікація основних споживачів енергії та профілів навантаження | Енергоаудит, AMR/SCADA                                  |
| 2. Встановлення енергетичної бази (EnB)   | Формування порівняльної бази для моніторингу змін                  | Історичні дані, погодинні графіки                       |
| 3. Визначення цілей та індикаторів (EnPI) | Наприклад: зменшення споживання кВт·год/т продукції                | KPI, дашборди в SCADA                                   |
| 4. План дій                               | Технічні та організаційні заходи для підвищення ефективності       | Заміну електродвигунів, оптимізацію тиску в компресорах |
| 5. Реалізація та навчання персоналу       | Тренінги, модернізація АСКОЕ, аудит систем вентиляції              | ERP з модулем енергоменеджменту                         |
| 6. Моніторинг, звітність та перегляд      | Постійний аналіз результатів, перегляд цілей                       | ISO аудит, SCADA, AI-аналітика                          |

**Таблиця 1.2 - Стандарти та підходи до енергоаудиту, відмінні від ISO 50001 [5]**

| Стандарт/Метод                            | Сутність   | Застосування                        |
|---|--|-------------------------------------|
| EN 16247                                  | Стандарт енергоаудиту (ЄС)                         | Початковий аудит перед ISO 50001    |
| ASHRAE Level 1-3                          | Стандарти енергоаудиту для будівель/інфраструктури | Промислові об'єкти та ТЦ            |
| MVP (Measurement & Verification Protocol) | Протокол верифікації енергозбереження              | Контрактні моделі EPC               |
| Енергоаудит згідно ДСТУ ISO 50002:2021    | Українська адаптація міжнародного аудиту           | Для сертифікації енергоефективності |

### 1.1.1 Сертифікаційні системи та ISO 14097:2021

У рамках глобальної мети досягнення сталого розвитку, сертифікація енергетичних систем і відповідність міжнародним стандартам стають невід'ємною частиною управління енергетичними процесами в промисловості. Одним з важливих стандартів є ISO 14097:2021 [6], що стосується оцінки та моніторингу кліматичних ризиків для промислових енергосистем.

ISO 14097 (2021) є міжнародним стандартом, який визначає методи оцінки і впровадження адаптації до змін клімату, а також ризиків, пов'язаних з кліматичними змінами, у рамках енергетичних систем. Стандарт передбачає використання різноманітних стратегій для зменшення викидів парникових газів та оптимізації енергоспоживання з урахуванням мінливих кліматичних умов. Це включає в себе оцінку ризиків, пов'язаних з кліматичними змінами, і надання рекомендацій щодо адаптаційних стратегій для сталого управління енергетичними системами.

Стандарт має важливе значення для промислових підприємств, оскільки він дозволяє оцінити їхній вплив на навколишнє середовище та змінювані кліматичні умови, що може бути корисним для зниження викидів і оптимізації виробничих процесів.

**Таблиця 1.3 - Основні принципи ISO 14097:2021**

| <b>Принцип</b>                      | <b>Опис</b>  |
|-------------------------------------|--|
| Оцінка кліматичних ризиків          | Визначення потенційних загроз, пов'язаних із змінами клімату для енергосистем              |
| Впровадження адаптаційних стратегій | Розробка заходів щодо зменшення впливу кліматичних змін на енергетичні системи             |
| Сталий розвиток                     | Забезпечення екологічної, соціальної та економічної стійкості енергетичних процесів        |
| Моніторинг та звітність             | Постійний моніторинг впроваджених стратегій та їх коригування в залежності від результатів |

### 1.1.2 ASHRAE Guideline 14-2014: Енергоаудит та верифікація результатів

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Guideline 14-2014 [7] надає стандарти для проведення енергоаудитів та верифікації енергозбереження. Даний документ є основним керівництвом для фахівців у галузі енергоменеджменту, що визначає методи і процедури для ефективною реалізації енергоаудитів.

ASHRAE Guideline 14-2014 є надзвичайно корисним для оцінки результатів енергозбереження, оскільки включає в себе методи для вимірювання та перевірки зниження енергоспоживання після впровадження заходів щодо підвищення енергоефективності. Це включає в себе використання відповідних інструментів, таких як вимірювання енергоспоживання, контроль параметрів обладнання, а також аналіз змін в енергетичних характеристиках після впровадження змін.

Цей стандарт дозволяє забезпечити достовірність даних і підтвердити ефективність реалізованих заходів енергозбереження, що важливо для звітності перед регулюючими органами та для отримання сертифікацій щодо енергоефективності.

**Таблиця 1.4 - Ключові етапи верифікації за ASHRAE Guideline 14-2014**

| <b>Етап</b>               | <b>Опис</b>   |
|---------------------------|---|
| Визначення базового стану | Визначення початкового рівня енергоспоживання до впровадження заходів             |
| Планування верифікації    | Визначення методів, інструментів і критеріїв для перевірки результатів            |
| Проведення вимірювань     | Виконання замірів енергоспоживання після реалізації заходів з енергоефективності  |
| Порівняння результатів    | Порівняння отриманих даних з базовими показниками для визначення економії енергії |

### **1.1.3 IPMVP Vol. III: Протоколи верифікації енергозбереження**

IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) [8] - це міжнародний стандарт для вимірювання та верифікації енергозбереження. Протокол забезпечує методологію, за допомогою якої можна здійснити верифікацію і підтвердити досягнення запланованих результатів в області енергозбереження.

IPMVP Vol. III є однією з частин цього протоколу, яка зосереджена на спеціалізованих методах верифікації енергозбереження в різних секторах. Він надає чіткі вказівки щодо використання різноманітних технік та інструментів для точного вимірювання результатів. Протокол допомагає виробникам і постачальникам енергії довести ефективність своїх заходів та сприяє зниженню витрат енергії в результаті впроваджених заходів.

**Таблиця 1.5 - Ключові принципи IPMVP Vol. III**

| <b>Принцип</b>                   | <b>Опис</b>   |
|----------------------------------|---|
| Верифікація економії енергії     | Методологія вимірювання досягнення цілей енергозбереження                                 |
| Використання стандартних методів | Використання стандартизованих процедур для забезпечення точності та надійності вимірювань |
| Адаптація до умов підприємства   | Гнучкість методів для застосування до різних галузей та умов                              |

### **1.1.4 Порівняння ISO 50001 та альтернативних підходів у SCADA-системах**

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) [9] широко використовуються для моніторингу та управління енергоспоживанням у промислових процесах. Порівняння ISO 50001 з альтернативними підходами

енергоменеджменту в SCADA-системах є важливим для вибору оптимальної стратегії енергетичного менеджменту на підприємствах.

ISO 50001 пропонує структуровану модель для управління енергоспоживанням через впровадження стандартів та процедур для моніторингу і аналізу енергетичних показників. Вона орієнтована на системний підхід, що включає в себе цілі, стратегії, впровадження заходів та постійний моніторинг результатів.

Альтернативні підходи, такі як SCADA-системи з використанням AI-аналітики, можуть мати більше гнучкості в реальному часі, дозволяючи швидко реагувати на зміни в енергоспоживанні та оптимізувати процеси без значних затримок. Проте, порівняно з ISO 50001, SCADA-системи часто менш структуровані в плані стратегічного управління і більше орієнтовані на оперативний моніторинг та контролювання.

**Таблиця 1.6 - Порівняння ISO 50001 та SCADA-систем**

| <b>Параметр</b> | <b>ISO 50001</b>                             | <b>SCADA-системи</b>                      |
|-----------------|--|---|
| Підхід          | Структурований, стратегічний                 | Оперативний, реальний час                 |
| Орієнтація      | Управління енергоспоживанням через стандарти | Моніторинг і оптимізація в реальному часі |
| Гнучкість       | Системний підхід з обов'язковими процедурами | Гнучкість у налаштуваннях та адаптації    |
| Інструменти     | Інтеграція з ERP, постійний аналіз           | AI-аналітика, миттєва реакція на зміни    |

## **1.2 Аналіз втрат енергії на різних етапах виробництва**

Втрати енергії в промислових процесах виникають на різних етапах енергетичного циклу [10]. Класифікацію таких втрат наведено в таблиці 1.7.

**Таблиця 1.7 – Основні джерела втрат енергії у промисловому середовищі [11]**

| <b>Категорія втрат</b> | <b>Джерело виникнення</b>                                   | <b>Тип втрат</b>     |
|------------------------|---|----------------------|
| Перетворення енергії   | ККД котлів, генераторів, ІБП                                | Теплові, електричні  |
| Передача та розподіл   | Омічні втрати в кабелях, втрати на трансформаторах          | Активні втрати       |
| Гармонічні спотворення | Частотні спотворення від частотних перетворювачів, LED      | Реактивні та теплові |
| Пульсації навантаження | Динамічне навантаження електроприводів, точильних верстатів | Втрати регулювання   |
| Асиметрія напруги      | Нерівномірний розподіл фазових навантажень                  | Перевантаження фаз   |

### 1.2.1 Втрати через гармонічні спотворення (Total Harmonic Distortion, THD) [12]

Гармоніки – це частоти, кратні основній (50 Гц), які спричиняють додаткові струми в мережі. Високий рівень THD викликає:

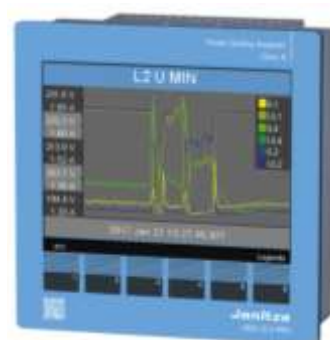
- перегрів трансформаторів;
- хибне спрацювання автоматики;
- зниження ККД двигунів.

THD визначається як [13]:

$$\text{THD}_I = (\sqrt{\sum I_n^2} / I_1) \times 100\% \quad (1.1)$$



Fluke 435-II



Janitza UMG 512-PRO

Рисунок 1.1 – Прилади, що використовуються для вимірювання THD

### 1.2.2 Вплив пульсацій у навантаженні

Пульсації струму та напруги виникають при раптовій зміні навантаження. Внаслідок цього спостерігається:

- коливання напруги (voltage sag/swell);
- стрибкоподібне спрацювання ПЗП;
- падіння ККД електроприводів.

### 1.2.3 Методика EN 50160 як основа оцінки якості електроенергії

EN 50160:2010 – нормативний документ, що визначає допуски параметрів напруги [14]:

- напруга:  $\pm 10\%$ ;
- частота:  $50\text{Гц} \pm 1\%$ ;
- гармоніки:  $\text{THD} \leq 8\%$ ;
- асиметрія:  $\leq 2\%$ ;
- тривалі відхилення: контроль  $\leq 95\%$  часу.

### 1.2.4 Європейські директиви з Power Quality

Згідно з директивами EU 2009/125/EC (Ecodesign) та Directive 2014/30/EU (EMC), класифікація втрат включає [15]:

**Таблиця 1.8 – Втрати енергії згідно з європейськими нормативами**

| Тип втрат                | Вимірюваний параметр    | Регламентований рівень |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Гармонічні               | THD                     | $\leq 8\%$ (EN 50160)  |
| Мерехтіння (flicker)     | Pst, Plt                | $\leq 1,0; \leq 0,8$   |
| Несиметрія фаз           | U- / U+                 | $\leq 2\%$             |
| Втрати в мережах         | I <sup>2</sup> R, cos φ | оптимізується в SCADA  |
| Втрати в трансформаторах | ΔP, ΔQ                  | згідно з IEC 60076     |

Таким чином:

- гармоніки, пульсації та асиметрії є серйозними джерелами втрат;
- для обліку використовують стандартизовані аналізатори якості енергії;
- EN 50160 забезпечує нормативну базу для оцінки параметрів електропостачання;
- виробничі підприємства мають враховувати вимоги директив ЕУ щодо енергоефективності.

### 1.3 Практичні приклади

#### 1.3.1 Нормативне регулювання втрат електроенергії згідно з ДСТУ EN 50160:2014

Попри поширену думку, що ДСТУ EN 50160:2014 [16] регламентує втрати енергії в системі електропостачання, насправді цей стандарт не встановлює безпосередніх допустимих величин втрат електроенергії у лініях електропередачі або на трансформаторах. Основна мета документа - визначити параметри якості напруги в точках приєднання споживача до мережі, а саме:

- відхилення напруги від номінального значення;
- частотні відхилення;
- гармонійні спотворення;
- перерви та коливання напруги;
- флікери тощо.

Однак, в розділі 4.1 «Характеристики напруги в точці поставки» стандарту прямо зазначається:

*"Стандарт не визначає конкретних меж для втрат активної або реактивної енергії в мережі. Однак тривалі систематичні відхилення напруги можуть вказувати на наявність незбалансованих навантажень або втрат у розподільній мережі, що потребує моніторингу оператором системи розподілу."*

Таким чином, в практичному застосуванні, моніторинг втрат базується на відстеженні параметрів якості напруги, що може опосередковано свідчити про наявність аномальних втрат — особливо через:

- незбалансовані фази;
- перенавантаження трансформаторів;
- високі гармоніки (що спричиняють додаткові теплові втрати).

Отже, в рамках виконання вимог ДСТУ EN 50160:2014, підприємства розробляють **внутрішні нормативи** щодо втрат, опираючись на:

- технічні умови оператора системи розподілу;
- результати енергетичного аудиту;
- рекомендації ISO 50001 (система енергетичного менеджменту).

### **А.ПАТ «Хмельницькобленерго» [17]**

**Тип підприємства:** оператор системи розподілу електроенергії на території Хмельницької області.

**Основна діяльність:** розподіл електричної енергії від високовольтних підстанцій до кінцевих споживачів (промислових, комунальних і побутових).

#### **А.1. Аналіз втрат енергії**

##### **Первинні проблеми:**

- **Високі технічні втрати в мережах 0,4–10 кВ** через застарілі кабельні лінії.
- **Низька ефективність трансформаторного парку** (частина трансформаторів експлуатуються >30 років).
- **Відсутність точного обліку на ряді ПС**, що ускладнює локалізацію втрат.
- **Невраховані нічні навантаження та перенавантаження в пікові години.**

**Таблиця 1.9 – Джерела втрат електроенергії на підприємстві (попередній аудит) [17]**

| <b>Джерело втрат</b>                    | <b>Величина втрат, % від обсягу розподілу</b> |
|---|---|
| Технічні втрати в мережах 10/0,4 кВ     | 5,2%  |
| Втрати у трансформаторах                | 2,8%  |
| Втрати через незбалансованість фаз      | 1,1%  |
| Втрати через несанкціоноване споживання | 1,3%  |
| <b>Загальні втрати</b>                  | <b>10,4%</b>                                  |

**Висновок:** витрати на втрати у мережах склали близько **38 млн. грн./рік** при тарифі ~2,4 грн./кВт·год (станом на 2023 рік).

#### **А.2. Оптимізація режимів роботи**

У процесі оптимізації енергоспоживання ПАТ «Хмельницькобленерго» впровадило автоматизовану систему комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) та систему диспетчерського керування SCADA [17]. Ці системи забезпечують комплексний моніторинг в реальному часі, дозволяючи швидко реагувати на зміни навантаження та виявляти аномалії у розподілі електроенергії.

### 1. АСКОЕ – Автоматизована система обліку

АСКОЕ була розгорнута на 110 підстанціях та включала понад 1800 смарт-лічильників.

Основні компоненти системи:

- цифрові лічильники з класом точності 0,5S;
- модулі передачі даних (GSM/PLC);
- сервер збору та обробки даних;
- інтерфейс оператора (Web-доступ, аналітика);

Період опитування: кожні 15 хвилин.

Формати: XML/IEC 62056-21 (DLMS/COSEM).

### 2. SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SCADA-система була впроваджена на базі GE Digital iFIX з OPC-сервером. Інтеграція з RTU (Remote Terminal Units) та PLC дозволила реалізувати функціонал:

- моніторинг стану вимикачів, трансформаторів;
- візуалізація топології мереж у реальному часі;
- передача аварійних сигналів (тривоги, блокування);
- енергетичний баланс по трансформаторах та ЛЕП;

Загальна кількість каналів телеметрії: понад 4800 точок збору даних.

### 3. Схема взаємодії систем

Завдяки поєднанню АСКОЕ та SCADA було досягнуто значного підвищення ефективності роботи: зменшення часу виявлення аварій з 3–4 годин до 15–30 хвилин, автоматизація формування звітності, та зменшення людського фактору при обліку споживання.

#### А.3 Заходи, які були реалізовані:

1. Секціонування мереж 10 кВ для зменшення довжини активних ліній.
2. Замінено 19 трансформаторів ТМ-400 на енергоефективні трансформатори з меншими втратами холостого ходу (ТМГ-400-УЗ).
3. Встановлено 110 Smart-лічильників на ПС і 1800 розумних лічильників у житловому секторі в рамках пілотного проекту.

#### А.4. Отриманий ефект (після 12 місяців)

Таблиця 1.10 – Результати [17]

| Показник                                      | До оптимізації | Після оптимізації | Зменшення         |
|---|----------------|-------------------|-------------------|
| Сумарні технічні втрати в мережах (%)         | 10,4%          | 7,8%              | -2,6%             |
| Річні втрати електроенергії (млн. кВт·год)    | 34,8           | 26,0              | -8,8              |
| Економія коштів (при тарифі 2,4 грн//кВт·год) | –              | –                 | ~21,1 млн грн/рік |

## А.5. Впровадження ISO 50001

У 2023 році було прийнято рішення впровадити **систему енергетичного менеджменту (EnMS)** відповідно до **ISO 50001:2018**:

### Основні кроки:

- проведено **енергетичний аудит** згідно з ДСТУ ISO 50002.
- створено **енергетичну політику** підприємства та призначено відповідального за EnMS.
- визначено **ключові енергетичні показники (EnPI)**, зокрема:
  - Витрати на втрати/100 км мережі;
  - Коефіцієнт завантаження трансформаторів;
  - Витрати енергії на облік (АСКОЕ);
- розроблено **План дій** на 3 роки:
  - Модернізація 40 км ЛЕП;
  - Автоматизація 5 підстанцій (SCADA).

### Результати впровадження ISO 50001

- Сертифікацію отримано в серпні 2024 р. (SGS Україна).
- Підвищення **прозорості енергоспоживання**.
- Підвищення інвестиційної привабливості (участь у «зелених» тендерах ЄБРР).
- Внутрішнє навчання персоналу з енергоменеджменту.



Рисунок 1.2 – Втрати електроенергії на підстанціях ПАТ «Хмельницькобленерго» (за місяць) [17]

## **В.ПАТ "Київобленерго"**

На ПАТ "Київобленерго", впровадження ISO 50001 відбувалося в рамках проекту Міненерго та GIZ (Німеччина) [18,19]. Було встановлено:

- 45 багатофункціональних лічильників з телеметрією (Schneider Electric, Siemens),
- автоматизована система збору даних (АСКОЕ) з інтеграцією в SCADA (ЕТАР),
- створена база ЕнРІ: [споживання кВт·год/км лінії, втрати/баланс].

### **Результати через 12 місяців:**

- Зниження втрат електроенергії: з 12,3% до 9,7%,
- Підвищення точності обліку до 99,2%,
- Зменшення аварійних зупинок на 30%.

## 2 ОСНОВИ ІНДУСТРІЇ 4.0 В ЕНЕРГЕТИЦІ

Індустрія 4.0 — це парадигма цифрової трансформації виробництва, що базується на автоматизації, обміні даними в реальному часі, інтеграції кіберфізичних систем, хмарних технологій та штучного інтелекту [20,21]. У контексті енергетики вона забезпечує перехід до гнучких, саморегульованих, енергоефективних і високонадійних енергосистем нового покоління.

Енергетика 4.0 базується на таких принципах [22,23]:

- **Децентралізація** джерел енергії (включаючи ВДЕ);
- **Інтелектуалізація** систем (Smart Grid);
- **Цифровізація** вимірювань та керування (ІоТ, SCADA);
- **Сервіси на вимогу** та автоматичне балансування навантаження.

### 2.1. Принципи Енергетики 4.0

#### 2.1.1 Децентралізація джерел енергії

Децентралізація передбачає перехід від централізованих енергосистем до розподілених, де енергія виробляється ближче до місця споживання. Це включає використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові установки, що інтегруються в локальні мікромережі.

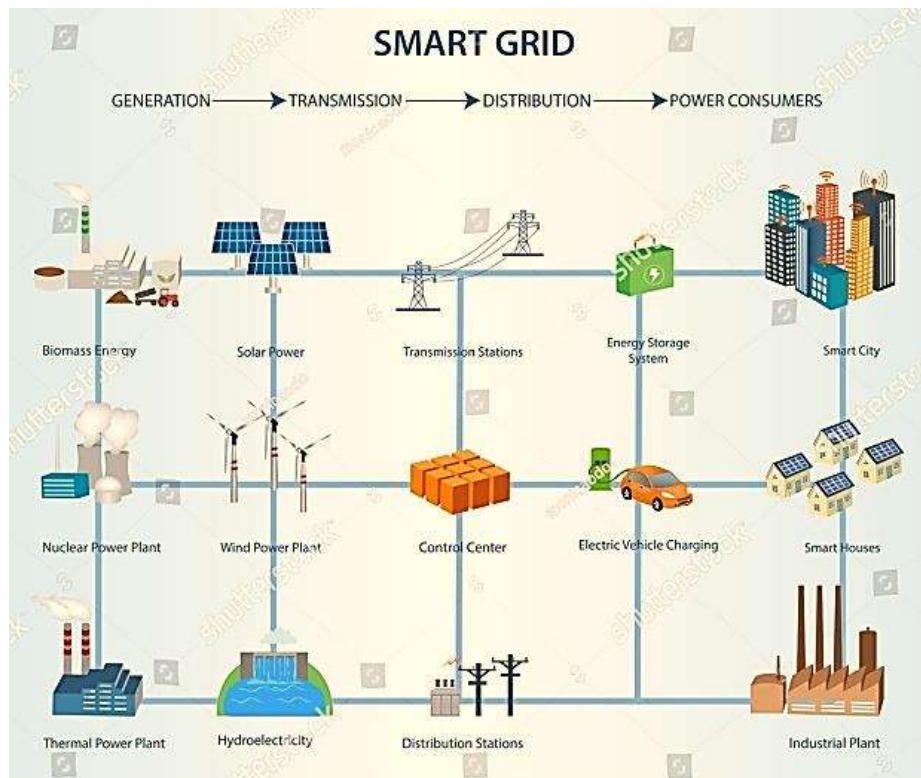
**Таблиця 2.1 – Порівняння централізованих та децентралізованих енергосистем [22]**

| Характеристика        | Централізована система | Децентралізована система        |
|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| Відстань до споживача | Велика                 | Мала                            |
| Надійність            | Залежить від мережі    | Вища завдяки локальним джерелам |
| Гнучкість             | Обмежена               | Висока                          |
| Інтеграція ВДЕ        | Складна                | Спрощена                        |

В Україні впровадження децентралізованих систем може сприяти енергетичній незалежності та стійкості до зовнішніх впливів.

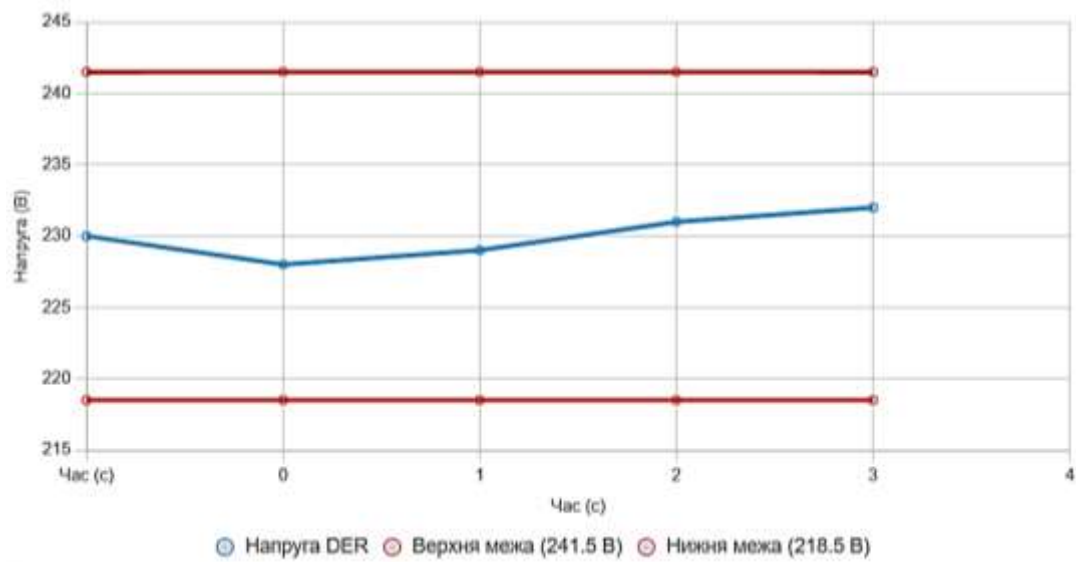
#### 2.1.2 Інтелектуалізація систем (Smart Grid)

Smart Grid — це інтеграція цифрових технологій у енергетичну інфраструктуру, що дозволяє двосторонню комунікацію між виробниками та споживачами енергії [24,25]. Це забезпечує ефективне управління енергопотоками, швидке реагування на зміни попиту та інтеграцію ВДЕ.



**Рисунок 2.1 – Структура Smart Grid [26]**

IEEE 1547 [27] визначає стандарти для підключення розподілених джерел енергії (DER) до електричних систем. Стандарт встановлює вимоги до регулювання напруги, контролю частоти та захисту від острівного режиму.



**Рисунок 2.2 – Відповідність регулювання напруги за IEEE 1547**

Наприклад, DER повинні відключатися протягом 2 секунд, якщо частота мережі відхиляється більше ніж на  $\pm 0.5$  Гц.

Вимога до регулювання напруги виражається як:

$$V_{DER} \in [V_{nom} - 5\%, V_{nom} + 5\%]$$

де  $V_{nom}$  — номінальна напруга мережі (наприклад, 230 В для однофазних систем).

Використання Smart Grid дозволяє:

- оптимізувати розподіл енергії;
- зменшити втрати в мережі;
- забезпечити надійність постачання;
- інтегрувати різноманітні джерела енергії.

**Практичний кейс: IEEE 1547 на сонячній фермі у Вінниці** Сонячна ферма потужністю 10 МВт у Вінниці впровадила інвертори, сумісні з IEEE 1547, у 2023 році. Система забезпечила стабільність мережі, підтримуючи напругу в межах  $\pm 5\%$  і відключення під час збоїв у мережі, що скоротило відключення на 20%. Дані з [27] підтверджують відповідність вимогам захисту від острівного режиму.

### 2.1.3 Цифровізація вимірювань та керування (IoT, SCADA)

Цифровізація включає впровадження Інтернету речей (IoT) [28-30] та систем SCADA [31] для моніторингу та управління енергетичними процесами в реальному часі. Це дозволяє збирати дані з численних сенсорів, аналізувати їх та приймати обґрунтовані рішення для оптимізації роботи систем.

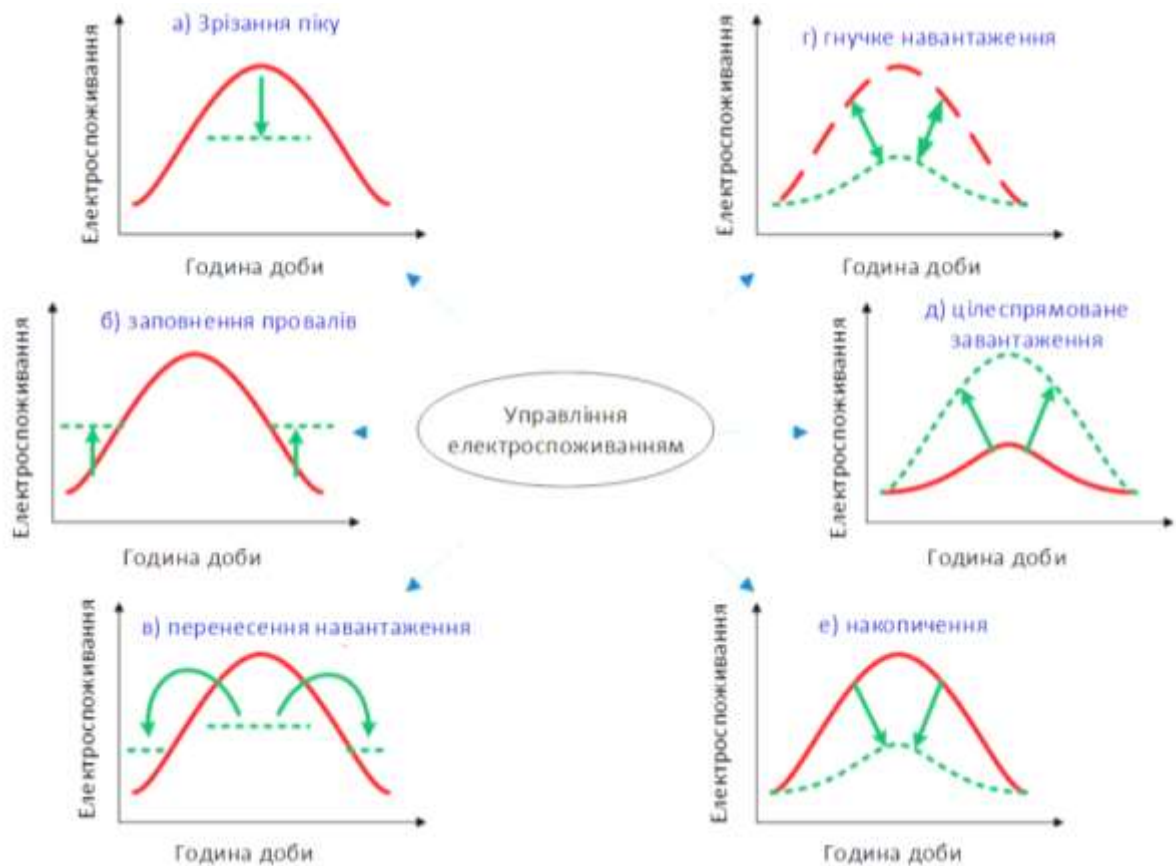
**Таблиця 2.2 – Переваги цифровізації в енергетиці**

| Параметр                      | До цифровізації | Після цифровізації |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| Час реагування                | Високий         | Низький            |
| Точність вимірювань           | Обмежена        | Висока             |
| Можливість прогнозування      | Обмежена        | Розширена          |
| Інтеграція з іншими системами | Складна         | Спрощена           |

Використання IoT та SCADA забезпечує прозорість процесів, зменшує ризики аварій та підвищує ефективність управління.

### 2.1.4 Сервіси на вимогу та автоматичне балансування навантаження

Сервіси на вимогу передбачають автоматичне регулювання споживання енергії відповідно до її доступності та вартості. Це досягається через системи управління попитом, які можуть змінювати режим роботи обладнання в залежності від сигналів з енергомережі.



**Рисунок 2.3 – Принцип роботи системи управління попитом [32-34]**

Переваги:

- зменшення пікових навантажень;
- оптимізація витрат на енергію;
- підвищення стабільності мережі.

Для промислових підприємств це означає можливість гнучкого управління енергоспоживанням, що веде до економії та підвищення конкурентоспроможності.

## **2.2 Автоматизоване управління енергетичними процесами**

У сучасних умовах промислові підприємства стикаються з необхідністю підвищення енергоефективності, надійності та гнучкості енергетичних систем. Автоматизовані системи управління енергетичними процесами (АСУЕП) є ключовим інструментом для досягнення цих цілей [35-40].

Автоматизація дозволяє в режимі реального часу реагувати на зміни параметрів енергосистеми, зменшувати втрати та підвищувати стабільність.

Основними компонентами є:

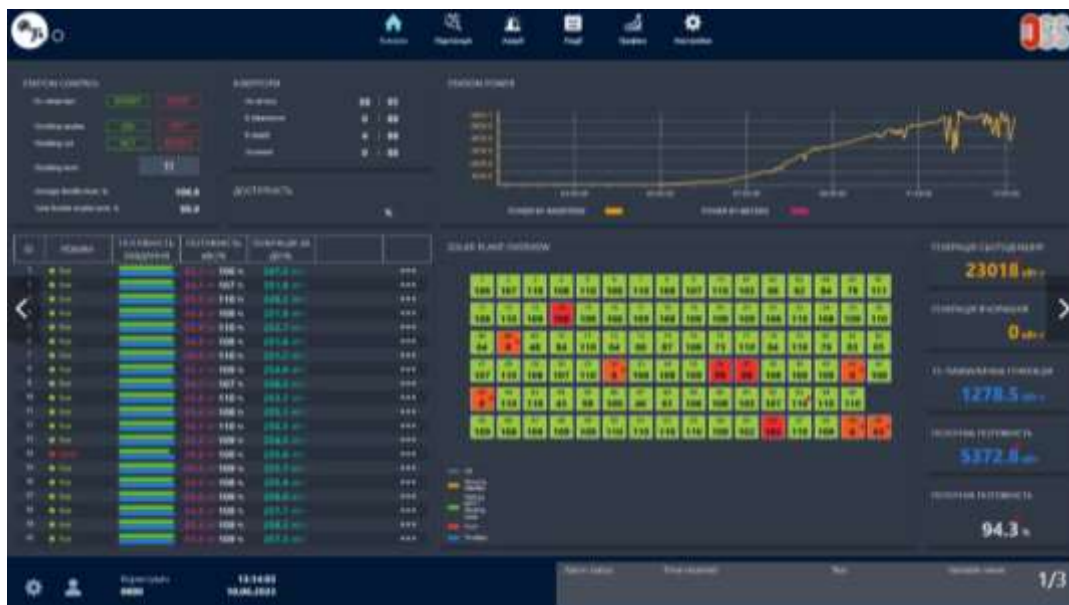
- **SCADA-системи:** моніторинг, діагностика, візуалізація та керування;
- **PLC-контролери:** реалізація локального управління;
- **RTU-модулі:** збір даних у розподілених мережах;
- **IoT-пристрої:** сенсори, модулі передачі даних.

**Таблиця 2.3 – Приклади автоматизованих систем у промисловій енергетиці**

| Технологія           | Функція                       | Приклад впровадження |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| SCADA (WebAccess)    | Централізоване управління СЕС | СТАФ-ДОВГЕ (2025)    |
| PLC Siemens S7       | Регулювання інвертора         | Сонячна ферма «Плай» |
| ІоТ-сенсор Advantech | Моніторинг температури/струму | Панелі Jinko Tiger   |

### 2.2.1 SCADA-системи: моніторинг, діагностика, візуалізація та керування

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це система, що забезпечує централізований моніторинг та керування технологічними процесами [35,39-40]. Вона дозволяє операторам отримувати реальні дані, візуалізувати процеси, здійснювати діагностику та приймати обґрунтовані рішення для оптимізації роботи енергетичних систем.



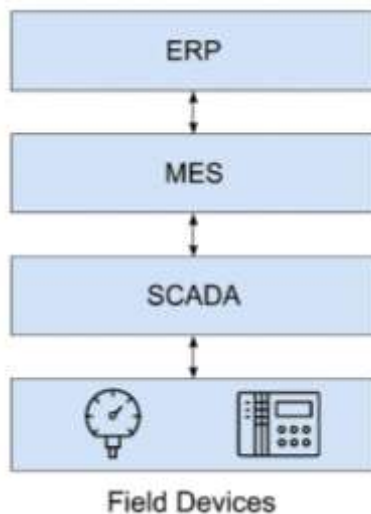
**Рисунок 2.4 – Інтерфейс SCADA-системи для сонячної електростанції [39]**

#### Основні функції SCADA-систем:

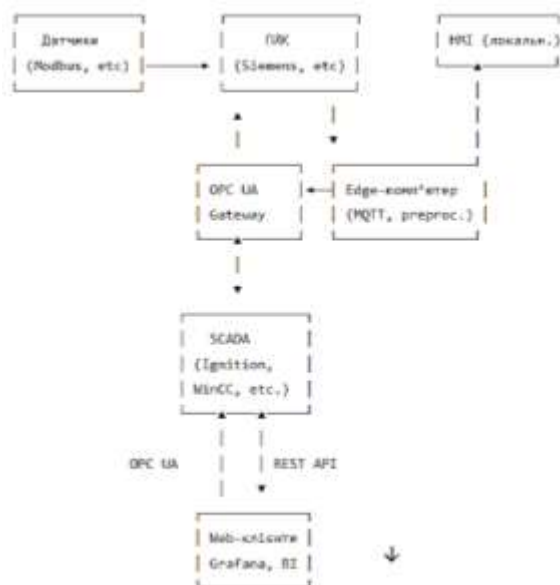
- збір та обробка даних з польових пристроїв;
- візуалізація технологічних процесів;
- управління обладнанням в реальному часі;
- архівування та аналіз історичних даних;
- оповіщення про аварійні ситуації

Стандарт ІЕС 62264 [41] визначає модель інтеграції між системами управління виробництвом (MES) та підприємницькими системами (ERP). SCADA-системи, згідно з цією моделлю, займають проміжне положення між

польовими пристроями та MES, забезпечуючи збір даних та їх передачу для подальшої обробки.



**Рисунок 2.5 – Архітектурна модель згідно з ІЕС 62264 (інтеграція з MES) [41-42]**



**Рисунок 2.6 – Схема архітектури SCADA з інтерфейсом OPC UA та REST API [42]**

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [42-43] забезпечує стандартизований обмін даними між SCADA-системами та іншими компонентами інфраструктури. Інтеграція REST API дозволяє зовнішнім додаткам отримувати доступ до даних SCADA через веб-протоколи, що спрощує інтеграцію з хмарними сервісами та мобільними додатками.

Архітектура SCADA з інтерфейсом OPC UA та REST API складається з:

- 1. Польовий рівень (Field Level)**

- Датчики, приводи, ПЛК (Siemens, Schneider, Omron, Allen-Bradley тощо)
- Зв'язок: Modbus RTU/TCP, Profinet, EtherCAT, CAN, BACnet
- 2. Проміжний рівень (Edge Level / Gateway)**
  - OPC UA Server / Gateway
    - Виконує роль концентратора: агрегує дані від ПЛК та надає їх далі через OPC UA або REST
    - Протоколи перетворення: Modbus → OPC UA
  - Edge-комп'ютер
    - Фільтрація, агрегація, попередня аналітика
- 3. SCADA-сервер (Control Level)**
  - SCADA-система (наприклад, Ignition, WinCC, Zenon, InduSoft)
    - Отримує дані через OPC UA Client
    - Контролює об'єкти, управляє подіями, алармами, журналюванням
  - REST API-сервер (вбудований у SCADA або окремий)
    - Забезпечує зовнішній доступ до даних (наприклад, через HTTPS)
    - Може бути частиною MES / ERP інтеграції
- 4. Рівень візуалізації (HMI / Dashboard)**
  - Локальні HMI-панелі (наприклад, Siemens KTP, Red Lion)
  - Web-візуалізація (через браузер)
  - REST API клієнти: мобільні додатки, Node-RED, Power BI, Grafana, SCADA Web Clients
- 5. Хмарні сервіси / Зовнішні API (Optional)**
  - Надсилання даних у Azure IoT, AWS IoT, Google Cloud IoT
  - REST API, MQTT для інтеграції з Big Data / AI сервісами

SCADA-системи можуть бути вразливими до атак типу "відмова в обслуговуванні" (DoS), які спрямовані на виведення системи з ладу шляхом перевантаження її запитами [43]. Такі атаки можуть призвести до втрати контролю над критичними процесами та значних економічних збитків. Застосування заходів згідно з ІЕС 62443 допомагає зменшити ці ризики.

### **2.2.2 PLC-контролери: реалізація локального управління**

Програмовані логічні контролери (PLC) — це спеціалізовані комп'ютери, призначені для автоматизації технологічних процесів на рівні окремих пристроїв або вузлів системи [44-47]. Вони забезпечують виконання логічних операцій, таймерів, лічильників та інших функцій, необхідних для локального управління обладнанням.

#### **Переваги використання PLC:**

- Висока надійність та стійкість до промислових умов
- Гнучкість у програмуванні та налаштуванні
- Можливість інтеграції з іншими системами (SCADA, HMI)
- Швидке реагування на зміни в процесі



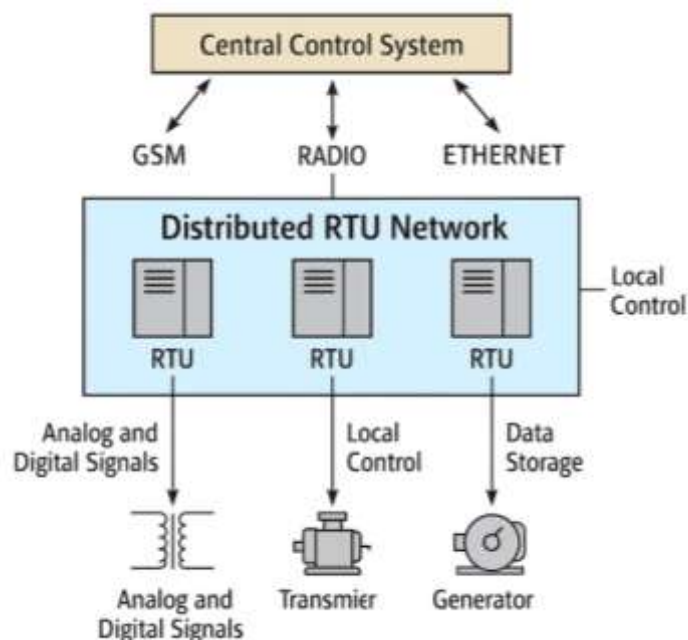
**Рисунок 2.7 – Приклад PLC-контролера [48]**

### 2.2.3 RTU-модулі: збір даних у розподілених мережах

Віддалені термінальні пристрої (RTU) використовуються для збору даних та передачі їх до центральної системи управління [49-51]. Вони особливо корисні в розподілених мережах, де необхідно моніторити та керувати віддаленими об'єктами, такими як трансформаторні підстанції або віддалені генераторні установки.

#### Функції RTU:

- Збір аналогових та цифрових сигналів
- Передача даних через різні канали зв'язку (наприклад, GSM, радіо, Ethernet)
- Виконання локальних алгоритмів управління
- Забезпечення резервного зберігання даних



**Рисунок 2.8 – Архітектура розподіленої RTU-мережі [52,53]**

### 2.2.4 IoT-пристрої: сенсори, модулі передачі даних

Інтернет речей (IoT) — це концепція, що передбачає об'єднання фізичних пристроїв, оснащених сенсорами та засобами зв'язку, в єдину мережу для збору та обміну даними. Інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT) у промислові

енергетичні системи значно підвищує ефективність, надійність та гнучкість управління енергетичними процесами. Цей розділ розглядає ключові компоненти IoT-інфраструктури, такі як сенсори температури, вологості, освітленості, смарт-лічильники електроенергії та модулі бездротової передачі даних (LoRa, NB-IoT) [28-30,54-55].

**Приклади IoT-пристроїв [56-58]:**

- Сенсори температури, вологості, освітленості
- Смарт-лічильники електроенергії
- Модулі бездротової передачі даних (наприклад, LoRa, NB-IoT)

Сенсори температури, вологості та освітленості є критичними для моніторингу та контролю навколишнього середовища в промислових умовах. Вони забезпечують точні вимірювання, необхідні для оптимізації енергоспоживання та підтримки стабільних умов роботи обладнання.



**Таблиця 2.4 – Сенсори для моніторингу навколишнього середовища**

| Тип сенсора                          | Зображення  | Основні характеристики                                  | Виробники                         | Ціна    |
|--------------------------------------|---|---|-----------------------------------|---------|
| DHT22<br>(температура,<br>вологість) |   | -40...+80°C;<br>±0.5°C;<br>Вологість: ±2%               | Adafruit, Seeed Studio,<br>ЛОГІКА | \$5–15  |
| TSL2561<br>(освітленість)            |  | 0–40,000 lux; I <sup>2</sup> C;<br>висока<br>чутливість | AMS, SparkFun,<br>ЕЛЕКТРОНПРИЛАД  | \$10–25 |

Смарт-лічильники є критичними елементами в системах моніторингу енергоспоживання. Вони забезпечують точні дані про споживання електроенергії та підтримують інтерфейси для інтеграції з IoT-платформами через MODBUS або інші протоколи.

Модулі бездротової передачі даних, такі як LoRa та NB-IoT, забезпечують надійну та енергоефективну комунікацію між пристроями в IoT-мережах, особливо в умовах великої кількості пристроїв та обмеженого енергоспоживання.

**Таблиця 2.5 – Смарт-лічильники електроенергії**

| Тип лічильника          | Зображення  | Основні характеристики                 | Виробники                     | Ціна      |
|-------------------------|---|--|-------------------------------|-----------|
| DDSU666<br>(однофазний) |  | 230V;<br>до 100А;<br>MODBUS;<br>клас 1 | Schneider, ZPA,<br>Енергоміра | \$50–100  |
| DTSU666<br>(трифазний)  |  | 3×230/400V;<br>MODBUS;<br>клас 0.5     | Siemens,<br>Landis+Gyr, НІК   | \$100–200 |

LoRa (Long Range) — це технологія для енергоефективної передачі даних на великі відстані, яка ідеально підходить для сонячних електростанцій, де сенсори можуть бути розташовані на значній відстані від шлюзів.

**Таблиця 2.6 – LoRa (Long Range) модулі**

| Модель      | Зображення  | Основні характеристики    | Виробники | Ціна    |
|-------------|---|---------------------------|-----------|---------|
| WISE-4610   |  | EU868; до 5 км;<br>IP65   | Advantech | €340    |
| LoRaST      |  | STM32; UART;<br>LoRaWAN   | Dragino   | \$30–50 |
| LoRa1276-C1 |  | 868MHz; SPI; -<br>139 dBm | G-NiceRF  | \$7–8   |

NB-IoT (Narrowband IoT) — це мобільна технологія зв'язку, що дозволяє підключати пристрої до мережі інтернет через стільникові мережі. Використовується для зв'язку в умовах глибокого покриття та низького енергоспоживання.

**Таблиця 2.7 – NB-ІоТ модулі**

| Модель       | Зображення  | Основні характеристики           | Виробники | Ціна   |
|--------------|---|----------------------------------|-----------|--------|
| WISE-4471-UA |  | Cat. NB1/M1;<br>MQTT; IP65       | Advantech | €296   |
| Quectel BG96 |  | LTE Cat<br>M1/NB1;<br>GNSS; UART | Quectel   | \$9–12 |

### 2.3 Прогнозування енергоспоживання та генерації

У контексті розвитку відновлюваної енергетики (ВДЕ) та зростаючих вимог до енергоефективності промислових підприємств, прогнозування енергоспоживання та генерації електроенергії набуває вирішального значення. Цей розділ присвячено сучасним методам прогнозування генерації енергії з ВДЕ (зокрема, на основі даних про інсоляцію та хмарність), попиту споживачів (включаючи погодні умови та типи навантажень), а також прогнозуванню втрат в енергосистемі. Прогнозування базується на машинному навчанні, нейронних мережах, алгоритмах обробки часового ряду. Всі підходи розглядаються з позицій практичного впровадження на промислових об'єктах.

#### 2.3.1. Прогнозування генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)

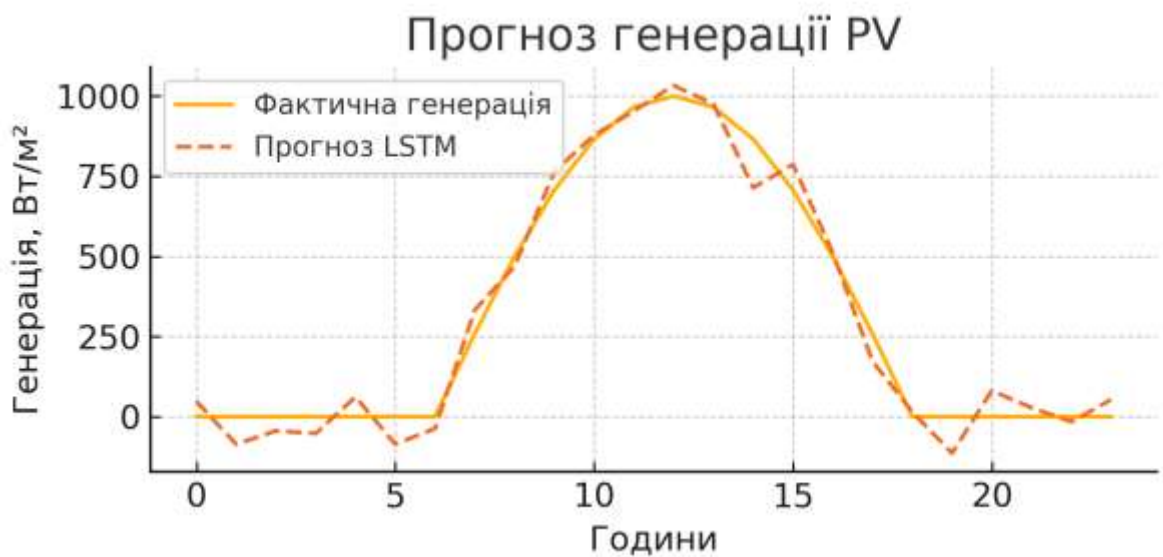
Генерація сонячної енергії є стохастичним процесом, що залежить від рівня інсоляції, хмарності, температури навколишнього середовища та географічного положення. Сучасні підходи до прогнозування базуються на обробці історичних метеоданих у поєднанні з супутниковими прогнозами погоди та числовими моделями.

**Таблиця 2.8 – Класифікація моделей прогнозування генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)**

| Метод                                | Опис  | Переваги/Недоліки  |
|--------------------------------------|---|--|
| <b>Фізичні моделі [59]</b>           | Базуються на математичних рівняннях, що описують перенесення енергії, положення Сонця та характеристику модулів.<br>Приклад: модель PVlib на основі даних Meeonorm.               | Висока точність за наявності якісних вхідних даних.<br>Вимогливість до ресурсів. |
| <b>Статистичні моделі [60-62]</b>    | Моделі на основі середніх значень, кореляцій та коваріацій історичних даних.<br>Приклад: регресія на даних за останні 3 роки.   | Швидкість обчислень, але низька точність при змінних умовах.                     |
| <b>Машинне навчання (ML) [63-64]</b> | Використання нейронних мереж, регресійних дерев, LSTM для моделювання складних нелінійних зв'язків.<br>Приклад: LSTM для передбачення хмарності та інсоляції на 24 години вперед. | Висока адаптивність, потреба у великих масивах даних.                            |



**Рисунок 2.9 – Алгоритм прогнозу добового виробництва СЕС (на основі кліматичних даних Закарпаття)**



**Рисунок 2.10 – Приклад прогнозу генерації PV-системи за допомогою LSTM-моделі [63-65]**

### 2.3.2. Прогнозування енергоспоживання споживачами

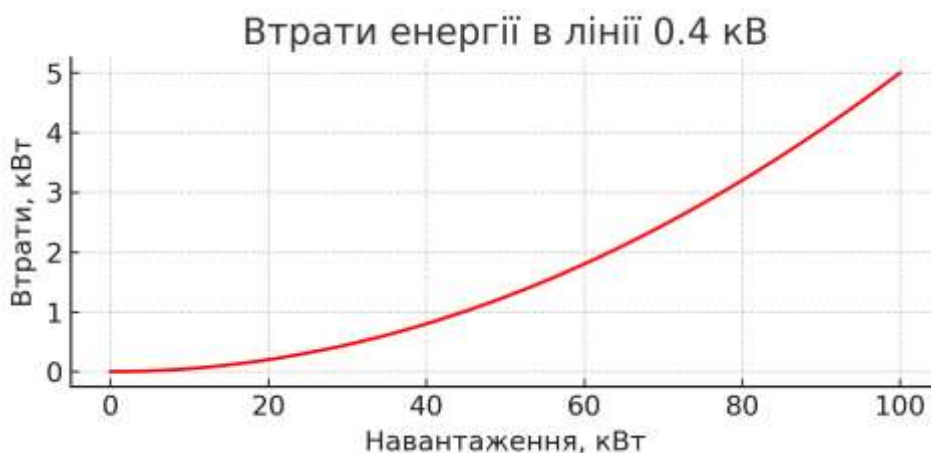
Попит на електроенергію формується під впливом численних факторів, зокрема температури, режимів роботи обладнання, графіків роботи змін. Надійне прогнозування дозволяє уникати перевантажень, оптимізувати режим генерації та закупівель на ринку.

**Таблиця 2.9 – Класифікація моделей прогнозування енергоспоживання споживачами**

| Тип моделі                      | Характеристика Використовують ковариацію добових/тижневих патернів.  | Області застосування          |
|---------------------------------|--|-------------------------------|
| ARIMA / SARIMA [66-68]          | Лінійні часові ряди з сезонністю<br>Дерева добре виявляють аномальні точки в енергоспоживанні.                     | Добове/тижневе навантаження   |
| XGBoost / Random Forest [69-71] | Дерева рішень, стійкі до нестационарності<br>Моделі здатні адаптуватися до складних промислових змін навантаження. | Навантаження з аномаліями     |
| LSTM / GRU [72-74]              | Нейромережі з пам'яттю   | Промислові цикли з сезонністю |

### 2.3.3. Прогнозування енергетичних втрат у системі

Втрати в електричних мережах поділяють на технічні (омічні втрати в проводах, трансформаторах) та нетехнічні (пов'язані з обліком та крадіжками). Технічні втрати залежать від навантаження, топології мережі та її конфігурації. Прогнозування цих втрат здійснюється за допомогою моделей розподілених мереж або машинного навчання на базі SCADA-даних [75-77].



**Рисунок 2.11 – Залежність технічних втрат від навантаження для кабельної лінії 0.4 кВ [78]**

Прогнозування енергетичних втрат у системах електропостачання є критично важливим для забезпечення ефективного управління енергетичними ресурсами. Сучасні гібридні моделі, що поєднують методи машинного навчання та традиційні статистичні підходи, демонструють високу точність у передбаченні втрат, особливо в умовах змінного навантаження та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

## **А. Огляд сучасних гібридних моделей**

### **А.1. Модель Prophet + LSTM**

Гібридна модель, що поєднує Prophet та LSTM, використовує переваги обох підходів: Prophet ефективно моделює сезонні та трендові компоненти, тоді як LSTM здатна виявляти складні нелінійні залежності у часових рядах. У дослідженні, проведеному на основі даних Elia Grid, така модель показала значне покращення точності прогнозування порівняно з окремими моделями Prophet та LSTM [79].

### **А.2. Інші гібридні моделі**

Інші гібридні підходи, такі як CNN-LSTM, LSTM-AE та їх комбінації, також демонструють високу ефективність у прогнозуванні енергоспоживання. Наприклад, модель CNN-LSTM-AE досягла найнижчих значень помилок на наборі даних UCI, що свідчить про її здатність точно передбачати енергоспоживання в різних умовах [80].

## **В. Метрики оцінки моделей**

- **MAE (Mean Absolute Error):** Середнє абсолютне відхилення між прогнозованими та фактичними значеннями.
- **RMSE (Root Mean Square Error):** Квадратичне середнє відхилення, що надає більшу вагу великим помилкам.

Ці метрики є стандартними для оцінки точності моделей прогнозування енергоспоживання.

**Таблиця 2.10 – Порівняльна таблиця точності моделей**

| <b>Модель</b>  | <b>Набір даних</b> | <b>MAE</b> | <b>RMSE</b> |
|----------------|--------------------|------------|-------------|
| Prophet + LSTM | Elia Grid          | 0.221      | 0.621       |
| CNN-LSTM-AE    | UCI                | 0.01       | 0.02        |
| LSTM           | ENTSO-E            | 0.007      | 0.238       |
| CNN-LSTM       | AEP                | 0.536      | 0.719       |

Гібридні моделі, що поєднують Prophet та LSTM, демонструють високу точність у прогнозуванні енергетичних втрат, особливо в умовах складних та змінних навантажень. Інші гібридні підходи, такі як CNN-LSTM та LSTM-AE, також показують перспективні результати. Вибір конкретної моделі залежить від специфіки задачі, доступних даних та вимог до точності прогнозування.

## **B1. Гібридна модель Prophet + LSTM [81,82]**

### **Аналітичне представлення**

Гібридна модель Prophet + LSTM поєднує переваги статистичного моделювання сезонності та трендів (Prophet) з можливістю LSTM моделювати нелінійні залежності та довгострокову пам'ять.

1. **Модель Prophet:** розкладає часовий ряд  $y(t)$  на тренд  $g(t)$ , сезонність  $s(t)$  та залишкову компоненту  $\varepsilon(t)$ :

$$y(t)=g(t)+s(t)+\varepsilon(t) \quad (2.1)$$

2. **Розрахунок залишків:** отримуємо залишки  $r(t)$  як різницю між фактичними значеннями та прогнозом Prophet:

$$r(t)=y(t)-\hat{y}_{\text{Prophet}}(t) \quad (2.2)$$

3. **Модель LSTM:** навчається на залишках  $r(t)$  для моделювання нелінійних залежностей:

$$\hat{r}(t)=\text{LSTM}(r(t-1),r(t-2),\dots,r(t-n)) \quad (2.3)$$

4. **Фінальний прогноз:** поєднує прогноз Prophet та корекцію від LSTM:

$$\hat{y}(t)=\hat{y}_{\text{Prophet}}(t)+\hat{r}(t) \quad (2.4)$$

Такий підхід дозволяє моделі враховувати як сезонні тренди, так і складні нелінійні патерни в даних.

### **Метрики точності**

- **MAE (Mean Absolute Error):** середнє абсолютне відхилення між прогнозованими та фактичними значеннями:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.5)$$

- **RMSE (Root Mean Square Error):** квадратичне середнє відхилення, що надає більшу вагу великим помилкам:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.6)$$

## **B2. Гібридна модель CNN-LSTM-AE [83-84]**

### **Аналітичне представлення**

Модель CNN-LSTM-AE поєднує можливості згорткових нейронних мереж (CNN) для виділення просторових ознак, LSTM для моделювання

часових залежностей та автоенкодерів (АЕ) для зменшення розмірності та видалення шуму.

1. **Згортковий шар (CNN):** використовується для виділення локальних ознак з вхідних даних:

$$\mathbf{f}_{\text{CNN}} = \text{ReLU}(\mathbf{W}_{\text{conv}} * \mathbf{X} + \mathbf{b}) \quad (2.7)$$

де  $*$  - операція згортки,  $\mathbf{W}_{\text{conv}}$  — ваги згорткового шару,  $\mathbf{X}$  - вхідні дані,  $\mathbf{b}$  - зсув.

2. **LSTM:** моделює часові залежності на основі ознак, виділених CNN:

$$\mathbf{h}_t = \text{LSTM}(\mathbf{f}_{\text{CNN}}, \mathbf{h}_{t-1}) \quad (2.8)$$

3. **Автоенкодер (АЕ):** зменшує розмірність та видаляє шум з ознак:

- **Кодування:**

$$\mathbf{z} = \sigma(\mathbf{W}_e \mathbf{h}_t + \mathbf{b}_e) \quad (2.9)$$

- **Декодування:**

$$\hat{\mathbf{h}}_t = \sigma(\mathbf{W}_d \mathbf{z} + \mathbf{b}_d) \quad (2.10)$$

де  $\mathbf{W}_e, \mathbf{W}_d$  - ваги кодувальника та декодувальника,  $\mathbf{b}_e, \mathbf{b}_d$  - відповідні зсуви,  $\sigma$  - активаційна функція.

4. **Фінальний прогноз:** отримується через повнозв'язний шар:

$$\hat{y} = \sigma(\mathbf{W}_{fc} \cdot \hat{\mathbf{h}}_t + \mathbf{b}_{fc}) \quad (2.11)$$

де:  $\hat{\mathbf{h}}_t$  - вихід автоенкодера,  $\mathbf{W}_{fc}, \mathbf{b}_{fc}$  - параметри повнозв'язного шару,  $\sigma$  - активаційна функція.

### Метрики точності

- **MAE:** середнє абсолютне відхилення.
- **RMSE:** квадратичне середнє відхилення.

У дослідженні, проведеному на основі даних UCI, модель CNN-LSTM-AE досягла MAE = 0.01 та RMSE = 0.02, що свідчить про високу точність прогнозування.

### 2.4.Цифрові двійники в енергетиці

Цифровий двійник (digital twin) — це віртуальна модель фізичного об'єкта або системи, яка дозволяє аналізувати стан, прогнозувати поведінку та оптимізувати роботу енергетичних об'єктів у режимі реального часу.

У світлі динамічного розвитку систем автоматизації, прогнозування та моніторингу енергетичних процесів цифрові двійники (англ. Digital Twins, DT) поступово перетворюються з концептуального інструменту в критичну

технологію для проектування, експлуатації та оптимізації об'єктів енергетичної інфраструктури [85-89]. Згідно з [85], цифрові двійники дозволяють скоротити витрати на технічне обслуговування до 30% та підвищити ефективність до 20%.

Цей розділ присвячено фундаментальним аспектам створення, структури та застосування цифрових двійників у контексті промислової енергетики, з акцентом на проблематику впровадження, інтерфейси до SCADA-систем, взаємодію з польовими пристроями та реальні кейси розгортання.

#### 2.4.1. Структура цифрового двійника

Цифровий двійник в енергетиці — це віртуальна репрезентація фізичного енергетичного об'єкта або системи, яка оновлюється в режимі реального часу на основі даних з сенсорів, SCADA-систем або інших джерел.

Цифровий двійник складається з трьох ключових компонентів:

- 1) Фізичний об'єкт (наприклад, сонячна електростанція, трансформатор, споживча установка).
- 2) Віртуальна модель, яка описує фізичні та функціональні характеристики.
- 3) Канал двостороннього обміну даними для синхронізації станів у реальному часі.

**Таблиця 2.11 – Основні компоненти цифрових двійників [86-88]:**

| Компонент          | Функція  | Приклад у енергетиці                   |
|--------------------|--|--|
| Фізичний об'єкт    | Обладнання (генератори, трансформатори, станції)           | Промислова сонячна електростанція.     |
| Збір даних         | Сенсори, IoT-пристрої, PLC                                 |  |
| Мережеве з'єднання | Протоколи MQTT, OPC UA, Modbus                             | MQTT, OPC UA для телеметрії.           |
| Цифрова модель     | Симуляційні та аналітичні модулі (Matlab/Simulink, COMSOL) | Модель PV-модуля з тепловими втратами. |
| Візуалізація       | Платформи HMI/SCADA, Web-інтерфейси                        |  |
| Аналітика          | AI/ML-модулі для прогнозування стану                       |  |

#### 2.4.2. Типи цифрових двійників в енергетиці

Існують такі типи цифрових двійників [85,87-89]:

- Двійники компонентів (equipment twins);
- Двійники процесів (process twins);
- Двійники систем (system twins);
- Двійники енергомереж (grid twins)

**Таблиця 2.12 – Класифікація цифрових двійників**

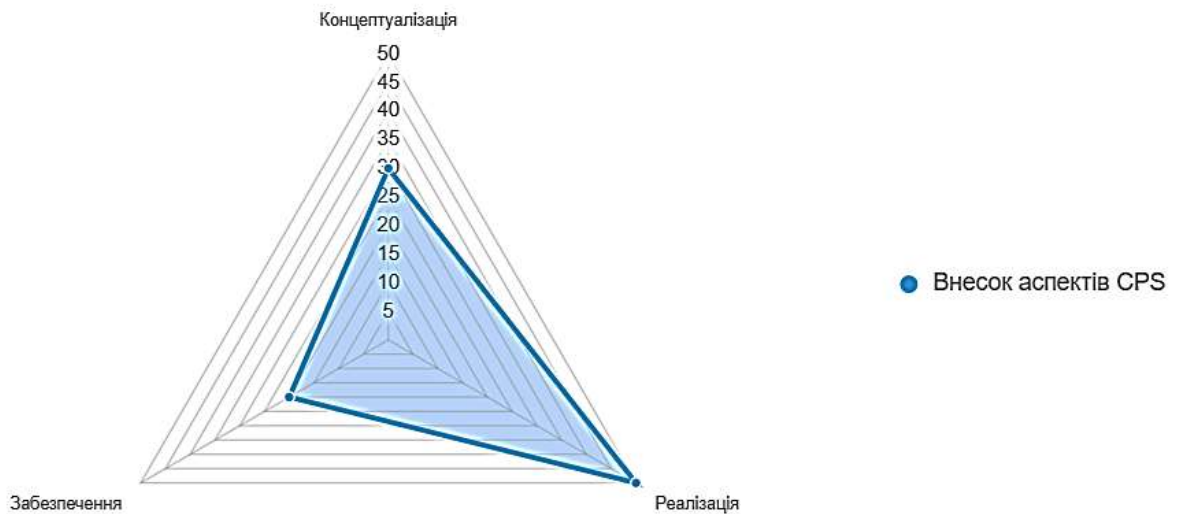
| Тип двійника                               | Опис  | Приклад використання   | Практичне значення   |
|--|---|--|--|
| <b>Двійник компонента (Equipment Twin)</b> | Це цифрова модель окремого фізичного пристрою або елемента обладнання. Вона включає параметри роботи, дані з сенсорів, історію експлуатації та моделі зносу. Такі двійники дозволяють передбачити відмови, здійснювати предиктивне обслуговування та оптимізувати режим роботи. | Моніторинг стану сонячного інвертора з прогнозуванням зниження ефективності через термічні навантаження.                             | Зниження витрат на обслуговування обладнання, збільшення терміну експлуатації. Менше простоїв виробництва. |
| <b>Двійник процесу (Process Twin)</b>      | Модель, що відображає динамічні взаємодії між компонентами та процесами, включаючи параметри потоків енергії, матеріалів чи даних. Використовується для оптимізації технологічних процесів, підвищення ефективності та контролю якості.   | Модель енергопередачі від масиву сонячних панелей до внутрішньої мережі підприємства з урахуванням втрат.                            | Можливість виявлення вузьких місць, оптимізація алгоритмів контролю та зменшення енергетичних втрат.       |
| <b>Двійник системи (System Twin)</b>       | Представляє собою інтегровану модель всієї системи — наприклад, енергетичної системи підприємства. Включає численні елементи та їх взаємодію. Забезпечує цілісне бачення роботи системи.  | Модель локальної мікромережі з розподілом навантаження, прогнозуванням попиту та моделюванням аварійних режимів.                     | Оптимальне управління системою, планування резервів, покращення надійності та безпеки енергопостачання.    |
| <b>Двійник енергомережі (Grid Twin)</b>    | Цифрове відображення електричної мережі, включаючи динамічну поведінку на рівні підстанцій, трансформаторів, ліній електропередач. Використовується для моделювання сценаріїв, керування попитом, інтеграції ВДЕ.   | Модель взаємодії промислового підприємства із зовнішньою мережею в режимі реального часу, з урахуванням коливань напруги та частоти. | Забезпечення відповідності нормативам мережі, мінімізація штрафів, підтримка стабільності в умовах змін.   |

NIST Framework for Cyber-Physical Systems (CPS) [90] пропонує структурований підхід до проектування та аналізу систем, що інтегрують фізичні та обчислювальні компоненти, такі як цифрові двійники в енергетиці. Фреймворк визначає три аспекти: концептуалізація, реалізація та забезпечення. У енергетичних застосуваннях цифрові двійники відповідають аспекту реалізації, забезпечуючи моніторинг і оптимізацію в реальному часі.

Поведінка системи моделюється як:

$$\mathbf{S}(t)=\mathbf{f}(\mathbf{P}(t),\mathbf{C}(t),\mathbf{D}(t))\mathbf{S}(t)), \quad (2.12)$$

де:  $S(t)$  - стан системи в момент часу  $t$ ,  $P(t)$  - фізичні процеси (наприклад, потік енергії),  $C(t)$  - обчислювальні процеси (наприклад, алгоритми ШІ),  $D(t)$  - вхідні дані (наприклад, показники сенсорів).



**Рисунок 2.11 – Аспекти NIST (CPS) у цифрових двійниках [90]**

**Практичний кейс: Цифровий двійник для вітрової ферми з використанням NIST CPS** Вітрова ферма в Данії застосувала NIST CPS для створення цифрового двійника для прогнозного обслуговування. Система інтегрувала дані сенсорів (вібрація, температура) з моделями ШІ, скоротивши витрати на обслуговування на 25%. Дані з [90] підкреслюють роль аспекту забезпечення в гарантії надійності системи.

### 2.4.3. Приклади застосування цифрових двійників у промисловій енергетиці

Цифрові двійники поступово переходять із лабораторної концепції у промислову практику. У різних галузях енергетики вони вже демонструють здатність підвищити надійність, керованість та адаптивність об'єктів енергопостачання. Розглянемо найтипівіші приклади їх впровадження [85-96].

**Таблиця 2.13 – Приклади застосувань цифрових двійників у промисловій енергетиці**

| Сфера застосування      | Технологія/ Платформа   | Компанія  | Призначення   | Переваги:   | Недоліки:   |
|-------------------------|---|-----------|---|---|---|
| Розподілене генерування | Azure Digital Twins<br><br>Платформа має відкритий API, масштабовану хмарну інфраструктуру та | Microsoft | Моделювання станцій і навантажень<br>Azure Digital Twins дозволяє створювати семантичну | Висока масштабованість (підтримка тисяч об'єктів одночасно);<br>Інтеграція з іншими сервісами Azure (аналітика, штучний | Висока вартість ліцензування та впровадження для малого/середнього бізнесу;<br>Залежність від стабільного |

|                             |  |                          |   |  |   |
|-----------------------------|--|--------------------------|---|--|---|
|                             | підтримку IoT-мереж.   |                          | модель об'єкта генерації (наприклад, сонячної електростанції або мікрогрід), відображаючи динамічну поведінку в реальному часі.   | інтелект, безпека); Гнучке моделювання залежностей між об'єктами (зони, вузли, ланцюги).   | інтернет-з'єднання та хмарної інфраструктури; Обмеження при роботі з об'єктами, що мають низький рівень автоматизації.  |
| <b>Стан трансформаторів</b> | <b>ABB Ability</b><br>Рішення є вигідним для підприємств, які мають критичну інфраструктуру (високовольтні підстанції, заводські розподільчі щити), де збої трансформаторів можуть призвести до значних втрат.   | <b>ABB</b>               | <b>Прогноз несправностей</b><br>ABB Ability використовує цифрові двійники трансформаторів, що базуються на даних сенсорів (температура, вологість, часткові розряди, струм витоку) з аналізом деградаційних механізмів. | Підвищення надійності обслуговування (від реактивного до превентивного); Зменшення ризику аварій; Інтеграція з SCADA та CMMS-системами.  | Необхідність точної калібровки сенсорів; Вузька спеціалізація (сфокусовано лише на обладнанні ABB або сумісному з ним); Потреба в регулярній валідації моделей з урахуванням старіння обладнання. |
| <b>Інфраструктура СЕС</b>   | <b>TwinCAT, IoT Hub</b><br>Поєднання платформи автоматизації TwinCAT (реального часу) з хмарними інструментами збору даних (IoT Hub від Siemens) дозволяє здійснювати цифрове дублювання режимів виробництва/споживання електроенергії. На практиці це — цифрова мікромережа з мітками часу, прив'язаними до виробітку. Платформи є оптимальними для СЕС середньої/високої потужності з динамічною структурою споживання. Це також ефективне рішення для підприємств із багатозмінною роботою, де енергоспоживання змінюється протягом | <b>Beckhoff, Siemens</b> | <b>Оптимізація енергобалансу</b>  | Можливість динамічного балансування навантаження; Висока точність моделювання за рахунок роботи в реальному часі; Гнучка інтеграція з енергоаудиторським і та SCADA-системами. | Необхідність висококваліфікованих фахівців для налаштування та обслуговування; Висока складність первинного налаштування IoT-інфраструктури; Низька окупність при потужностях <50 кВт.            |

|                       |   |                   |                                     |   |   |
|-----------------------|---|-------------------|-------------------------------------|---|---|
|                       | доби.   |                   |                                     |   |   |
| <b>Цифрова мережа</b> | <p><b>Grid Twin</b><br/>повнофункціональна симуляційна модель електромережі, яка враховує топологію, завантаження, резервні канали, втрати та часові затримки. Забезпечує прогнозування нестабільностей, оптимізацію потоку потужності та виявлення "вузьких місць".<br/>Найбільш перспективне застосування - у міських електромережах, де змішані джерела енергії, змінні навантаження та критичні об'єкти. В промисловості такі двійники доцільні у великих виробничих кластерах або технопарках.</p> | <b>GE Digital</b> | <b>Симуляція розподільчих мереж</b> | <p>Повна інтеграція з мережею Smart Grid;<br/>Підтримка стандартів NERC, IEC 61850;<br/>Прогнозування реакції мережі на зміну споживання або генерації.</p> | <p>Надмірна складність для локальних (невеликих) мереж;<br/>Високі вимоги до якості вихідних даних;<br/>Необхідність адаптації до кожної конкретної мережі.</p> |

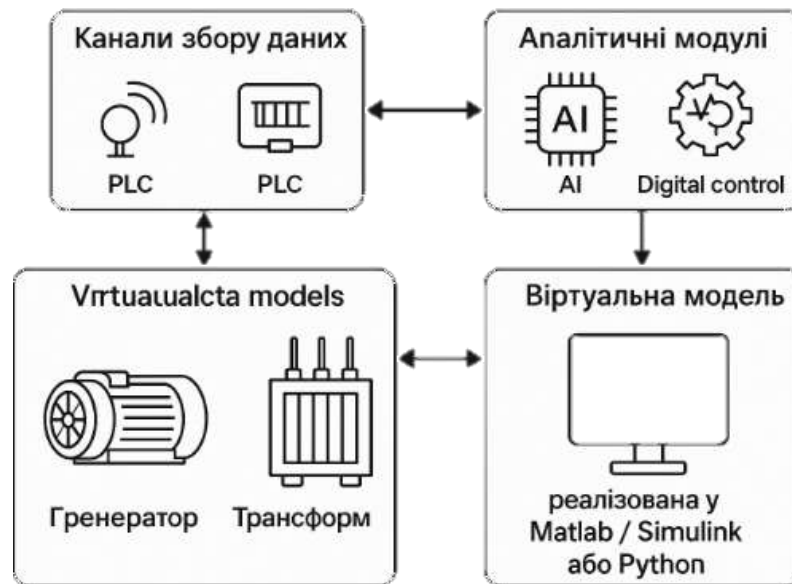
На промисловому підприємстві, де встановлено сонячну електростанцію, цифровий двійник дозволяє:

- прогнозувати генерацію на основі хмарності та інсоляції;
- виявляти деградацію фотоелементів;
- оптимізувати баланс споживання та зберігання енергії.

#### 2.4.4. Залучення штучного інтелекту

Моделі цифрових двійників часто інтегруються з алгоритмами машинного навчання [97-100]:

- прогнозування енергоспоживання на основі поведінкових патернів;
- виявлення аномалій у роботі обладнання;
- самоадаптація до змін зовнішніх умов.



**Рисунок 2.11 – Структура цифрового двійника системи енергопостачання [100]: фізичний об'єкт (генератор, трансформатор); канали збору даних (датчики, PLC); мережа (протоколи передачі); віртуальна модель (реалізована у Matlab/Simulink або Python); аналітичні модулі (AI, цифровий контроль).**

#### **Практичні виклики впровадження**

- **Інтерфейси:** Забезпечення сумісності з існуючими SCADA/HMI.
- **Частота оновлення:** Необхідність обробки великих обсягів даних у режимі близькому до реального часу.
- **Надійність комунікації:** Чутливість до відмов мережі чи затримок.
- **Кібербезпека:** Питання доступу до конфіденційних технологічних параметрів.

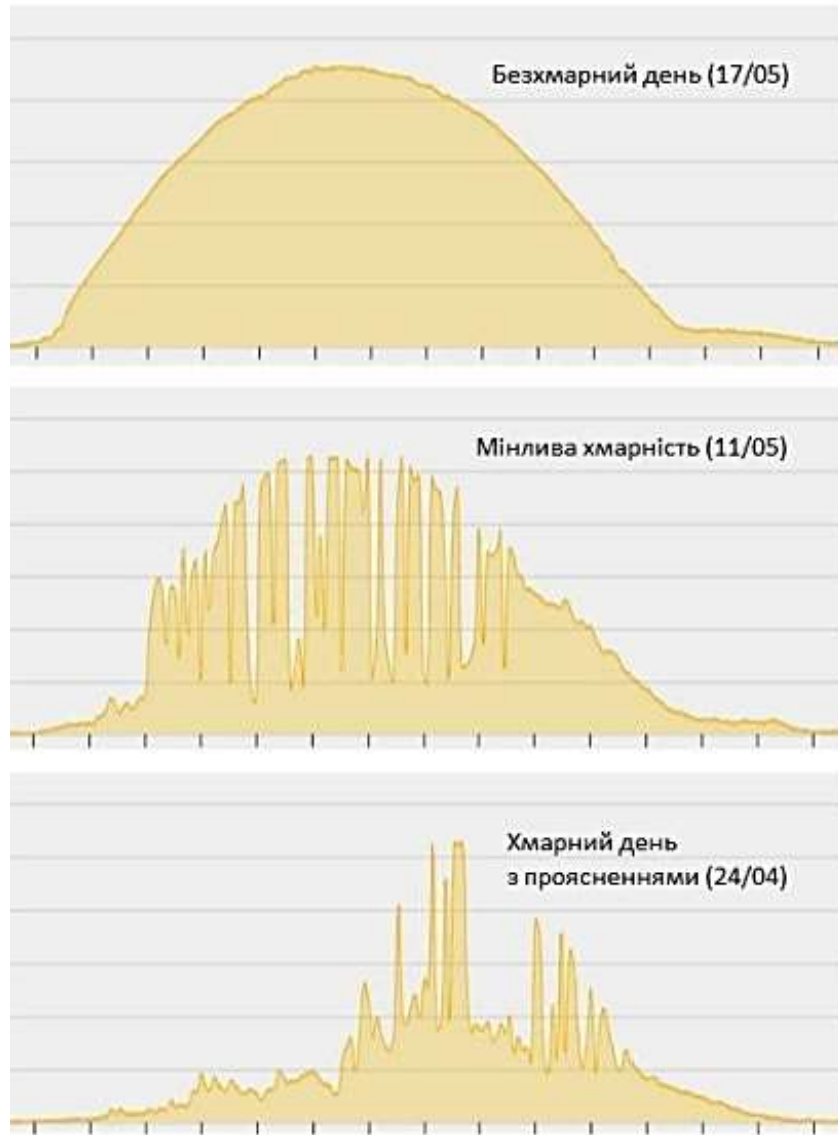
Для перегляду динамічного графіка сонячної генерації в реальному часі в Україні можливо скористатися інструментом **Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer** від Міжнародного енергетичного агентства (IEA). Цей онлайн-ресурс надає актуальні дані про виробництво електроенергії, включаючи сонячну генерацію, з можливістю візуалізації змін протягом дня [101].

На цьому сайті можливо:

- переглядати графіки виробництва електроенергії за різними джерелами, включаючи сонячну енергію;
- аналізувати зміни генерації протягом дня та порівнювати з іншими видами енергії;
- отримувати інформацію про попит на електроенергію в реальному часі.

Цей інструмент корисний для моніторингу поточної ситуації в енергетичному секторі України та прийняття обґрунтованих рішень щодо споживання електроенергії.

#### Мінливість потужності окремої СЕС протягом дня



**Рисунок 2.12 – Динамічний графік сонячної генерації в реальному часі**

Цифрові двійники є ключовим елементом енергетичної трансформації, що дозволяє гнучко реагувати на зміни, прогнозувати ризики та скорочувати витрати. Їхнє широке впровадження можливе лише за умови поєднання експертної інженерної практики, інфраструктури автоматизації та сучасних цифрових технологій.

#### **2.4.5. Взаємозв'язок цифрового двійника з BIM-моделями та автоматизованим проєктуванням. Відкриті платформи**

Цифрові двійники (digital twins, DT) у промисловій енергетиці дедалі частіше інтегруються з BIM-моделями (Building Information Modeling) [102] та системами автоматизованого проєктування (CAD/CAE). Така інтеграція

забезпечує не лише створення детальних віртуальних репрезентацій об'єктів, а й їхню динамічну синхронізацію з реальними експлуатаційними даними, що дозволяє оптимізувати проектування, експлуатацію та обслуговування енергетичних систем.

**BIM (Building Information Modeling)** — це методологія та цифрова технологія для створення, зберігання й управління інформацією про будівлі та інженерні споруди протягом усього їхнього життєвого циклу. BIM-модель — це не просто тривимірна геометрія об'єкта, а структурований набір даних, який містить інформацію про фізичні, функціональні, експлуатаційні та економічні характеристики об'єкта.

Основні характеристики BIM-моделі

- **Тривимірна геометрія:** BIM-модель відображає точну форму, розміри та просторове розташування всіх елементів будівлі (стіни, перекриття, інженерні мережі тощо).
- **Інформаційне наповнення:** Кожен елемент моделі містить атрибути — матеріали, характеристики, вартість, терміни монтажу, виробника, експлуатаційні параметри.
- **Динамічність:** Модель оновлюється на всіх етапах — від концепції до експлуатації, включаючи зміни під час будівництва та ремонту.
- **Інтеграція дисциплін:** В BIM-моделі поєднуються архітектурні, конструктивні, інженерні, технологічні та економічні дані.
- **Підтримка життєвого циклу:** Вся історія об'єкта, включаючи обслуговування, ремонти, модернізації, зберігається в моделі.

**Таблиця 2.14 - Відмінності BIM від традиційного проектування**

| Традиційне проектування           | BIM-моделювання   |
|-----------------------------------|---|
| 2D-креслення                      | 3D-об'єктна модель з даними   |
| Дані розрізнені, часто дублюються | Єдине джерело правди (single source of truth)                             |
| Важко відстежити зміни            | Автоматичне оновлення всієї моделі при зміні елементів                    |
| Координація вручну                | Автоматична координація між розділами (архітектура, інженерія, кошториси) |

У сфері енергетики та електроніки **BIM-модель** — це цифровий інформаційний простір, який об'єднує геометрію, фізичні характеристики, експлуатаційні параметри та логіку взаємодії елементів енергетичних об'єктів (електростанцій, підстанцій, розподільчих мереж, електронних систем керування тощо).

**Таблиця 2.15 - Практичні приклади BIM-моделей**

| № п/п | Приклад BIM моделі   | Зміст моделі   | Використання:   |
|-------|--|--|---|
| 1.    | <b>BIM-модель сонячної електростанції</b>                                    | Містить 3D-розташування сонячних панелей, монтажних конструкцій, інверторів, трансформаторної підстанції, кабельних трас, систем моніторингу та захисту. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Автоматичне формування специфікацій обладнання.</li> <li>• Виявлення колізій між кабельними трасами та конструкціями.</li> <li>• Оптимізація розміщення панелей для максимального використання сонячної радіації.</li> <li>• Інтеграція з цифровим двійником для моніторингу генерації, прогнозу деградації фотоелементів, аналізу втрат енергії.</li> </ul> |
| 2.    | <b>BIM-модель трансформаторної підстанції</b>                                | Включає трансформатори, розподільчі щити, шинопроводи, кабелі, системи автоматизації, релейний захист, вентиляцію, пожежну сигналізацію.                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Проектування та перевірка монтажу обладнання.</li> <li>• Моделювання електричних навантажень і теплових режимів.</li> <li>• Планування обслуговування та ремонту (з урахуванням доступу до обладнання).</li> <li>• Інтеграція з SCADA-системами для відображення реального стану обладнання.</li> </ul>  |
| 3.    | <b>BIM-модель розподільчої мережі підприємства</b>                           | Відображає всі кабельні лінії, розподільчі пункти, автоматичні вимикачі, датчики струму й напруги, точки підключення обладнання.                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Аналіз навантажень у різних режимах роботи.</li> <li>• Виявлення "вузьких місць" у мережі.</li> <li>• Планування модернізації або розширення мережі.</li> <li>• Інтеграція з цифровим двійником для оперативного моніторингу та управління</li> </ul>  |
| 4.    | <b>BIM-модель системи електронного керування (наприклад, для Smart Grid)</b> | Включає датчики, контролери, мережеві комутатори, програмовані логічні контролери (PLC), канали зв'язку, джерела резервного живлення.                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Віртуальна перевірка логіки керування.</li> <li>• Тестування сценаріїв аварійного відключення та самовідновлення.</li> <li>• Відстеження стану компонентів у реальному часі через інтеграцію з цифровим двійником</li> </ul>   |
| 5.    | <b>BIM-модель електротехнічної лабораторії або випробувального стенду</b>    | Включає розташування вимірювального обладнання, випробувальних стендів, кабельних трас, систем безпеки.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Планування розміщення нових приладів.</li> <li>• Аналіз ергономіки та безпеки робочих місць.</li> <li>• Автоматизація формування звітів про проведені випробування.</li> </ul>   |

ВІМ-модель дозволяє не лише візуалізувати об'єкт у 3D, а й інтегрує дані про обладнання, кабельні траси, автоматику, точки підключення, умови експлуатації та навіть сценарії роботи.

Переваги ВІМ-моделей у енергетиці та електроніці

- **Зменшення проектних помилок** завдяки автоматичному виявленню колізій.
- **Оптимізація витрат** на матеріали та обладнання.
- **Підвищення надійності експлуатації** через інтеграцію з цифровими двійниками та SCADA.
- **Прискорення модернізації** та реконструкції об'єктів.
- **Підвищення безпеки** завдяки точному плануванню евакуаційних маршрутів, зон обслуговування, доступу до обладнання.

Практичні кейси використання ВІМ-моделей для оптимізації роботи сонячних електростанцій включають такі напрямки:

1. Проектування та розміщення обладнання ВІМ-моделі дозволяють створити точну тривимірну цифрову копію сонячної електростанції з урахуванням географічних та кліматичних умов місцевості. Це дає змогу оптимізувати розташування фотомодулів, монтажних конструкцій, інверторів і трансформаторів для максимального збору сонячної енергії та мінімізації затінення [103].
2. Моделювання продуктивності та енергогенерації Інструменти, інтегровані з ВІМ, наприклад System Advisor Model (SAM), дозволяють прогнозувати добову, сезонну та річну генерацію електроенергії, враховуючи реальні умови експлуатації. Це допомагає оцінити ефективність проєкту до початку будівництва і коригувати дизайн для підвищення продуктивності [103].
3. Виявлення колізій та оптимізація монтажу ВІМ-модель автоматично виявляє просторові конфлікти між різними елементами системи — наприклад, кабельними трасами, опорами панелей, інверторами. Це дозволяє уникнути помилок і затримок під час монтажу, що знижує витрати і час реалізації проєкту [103,104].
4. Планування технічного обслуговування та ремонту Інформаційна модель містить дані про виробників, характеристики обладнання, гарантійні терміни, що полегшує планування профілактичних робіт і швидке усунення несправностей. Це підвищує надійність і тривалість експлуатації електростанції [103,105].
5. Інтеграція з цифровими двійниками для моніторингу ВІМ-модель використовується як основа для цифрового двійника, який в реальному часі отримує дані з сенсорів (температура, напруга, струм). Це дозволяє оперативно виявляти відхилення у роботі, прогнозувати деградацію панелей і оптимізувати режим роботи системи [103,106].
6. Фінансове моделювання та оцінка ефективності Завдяки ВІМ-моделі та інтегрованим інструментам можна розрахувати

вартість виробленої електроенергії з урахуванням капітальних і експлуатаційних витрат, що допомагає приймати обґрунтовані інвестиційні рішення [103,107].

### Взаємодія цифрового двійника та BIM

BIM-моделі забезпечують структуроване представлення фізичних, функціональних та експлуатаційних характеристик об'єкта. Водночас цифровий двійник розширює BIM-модель, інтегруючи в неї потоки даних у реальному часі (з сенсорів, SCADA, IoT), алгоритми прогнозування, аналітику та засоби візуалізації [102].

#### Схема взаємодії:

- BIM-модель → геометрична та семантична основа для цифрового двійника.
- Цифровий двійник → динамічне оновлення BIM-об'єктів на основі телеметрії та експлуатаційних даних.

Автоматизоване проектування та цифрові двійники

Сучасні системи автоматизованого проектування (CAD/CAE) можуть використовувати дані цифрового двійника для:

- швидкого прототипування;
- оптимізації параметрів (наприклад, енергоспоживання) на основі реальних експлуатаційних даних;
- автоматичної перевірки відповідності проектних рішень стандартам та вимогам.

Відкриті платформи для цифрових двійників та BIM

Останніми роками спостерігається зростання ролі **відкритих платформ** та open-source рішень, що особливо актуально для малих підприємств.

**Eclipse Ditto** [108] – відкрита платформа для управління цифровими двійниками IoT-пристроїв:

- підтримка REST API, MQTT, HTTP;
- можливість створення, оновлення та запитів до цифрових двійників;
- масштабованість та адаптивність для інтеграції з BIM/SCADA.

**FIWARE** [109] – модульна open-source екосистема для розгортання цифрових двійників у сфері smart building та smart energy, з підтримкою стандартів NGSI-LD для обміну контекстними даними.

**BuildingSMART** [110] – міжнародна організація, що розробляє відкриті стандарти для BIM, зокрема IFC (Industry Foundation Classes), які забезпечують:

- структурований обмін даними між BIM-системами;
- інтеграцію BIM-моделей із цифровими двійниками через відкриті API;
- підтримку життєвого циклу об'єкта (від проектування до експлуатації).

**BRICK Schema** – відкрита онтологія для опису фізичних та логічних об'єктів будівель, що спрощує інтеграцію BIM, цифрових двійників та автоматизованих систем.

Інтеграція для малих підприємств

Для малих підприємств відкриті інструменти (наприклад, FreeCAD, BlenderBIM, Node-RED [111,112]) у поєднанні з платформами типу Eclipse Ditto або FIWARE дозволяють:

- створювати власні цифрові двійники без ліцензійних витрат;
- інтегрувати BIM-моделі з реальними даними;
- автоматизувати моніторинг та управління об'єктами.

Приклад практичної інтеграції

1. BIM-модель у форматі IFC імпортується у платформу цифрових двійників (Eclipse Ditto).
2. Дані з сенсорів (через MQTT) синхронізують стан BIM-об'єктів у реальному часі.
3. Відкриті аналітичні модулі (наприклад, Grafana, OpenModelica) використовуються для візуалізації та оптимізації роботи об'єкта.
4. Всі компоненти інтегруються через відкриті API, що забезпечує масштабованість та гнучкість.

Ключові переваги відкритих платформ:

- Відсутність vendor lock-in;
- Гнучкість налаштування;
- Можливість кастомізації під специфічні бізнес-процеси;
- Доступність для малих і середніх підприємств.

## **2.5. Адаптивне регулювання навантаження в енергетичних системах промислових підприємств**

Адаптивне регулювання навантаження (англ. Adaptive Load Management, ALM) є сучасною парадигмою оптимізації енергоспоживання, яка особливо актуальна в умовах широкого впровадження відновлюваних джерел енергії та цифрових систем керування. ALM дозволяє підприємствам ефективно балансувати споживання електроенергії, зменшуючи пікові навантаження, інтегруючи сонячну генерацію та підвищуючи загальну енергоефективність [102, 113,114].

### **2.5.1. IEEE 2030.5 (Smart Energy Profile 2.0): Стандарти та практичне застосування в Україні**

**IEEE 2030.5 (Smart Energy Profile 2.0)** [115] — це міжнародний стандарт для забезпечення двосторонньої взаємодії між енергетичними пристроями, системами керування та розподіленими джерелами енергії (DER) у рамках розумних мереж (Smart Grid). Стандарт визначає протоколи обміну даними між обладнанням (наприклад, сонячними інверторами, зарядними станціями, системами зберігання енергії) та керуючими платформами через IP-мережі, забезпечуючи гнучке, безпечне та масштабоване керування навантаженням, генерацією та споживанням.

Ключові положення стандарту IEEE 2030.5:

- **Відкрита архітектура:** використання RESTful API для обміну даними між пристроями та серверами керування.

- **Підтримка DER:** керування сонячними електростанціями, акумуляторами, електромобілями, навантаженнями будівель.
- **Безпека:** автентифікація, шифрування, контроль доступу на основі сертифікатів.
- **Масштабованість:** підтримка як малих, так і великих енергетичних об'єктів.

Практичне застосування в Україні [116]:

- **Інтеграція сонячних електростанцій:** IEEE 2030.5 дозволяє підключати СЕС до диспетчерських центрів операторів систем розподілу для моніторингу генерації, керування віддаленим обмеженням потужності, реалізації вимог балансування.
- **Пілотні проекти:** В умовах децентралізації енергетики та розвитку ВДЕ в Україні, стандарт IEEE 2030.5 може бути використаний для створення локальних енергетичних спільнот (energy communities), мікромереж, а також для інтеграції з платформами SCADA та ALM.
- **Виклики:** Основними бар'єрами є недостатня стандартизація обладнання українських виробників, обмежена підтримка протоколу у наявних промислових контролерах, а також потреба у підвищенні кібербезпеки.

### 2.5.2. Основні поняття та визначення

- **Навантаження** — електричне споживання системою або окремим обладнанням.
- **Регулювання навантаження** — процес зміни рівня споживання у відповідь на зміну умов у мережі або на підприємстві.
- **Адаптивне регулювання** — динамічне та контекстно-залежне управління на основі даних, моделей та прогнозів.
- **DSM (Demand Side Management)** — більш загальне поняття, що включає ALM як один з методів.

### 2.5.3. Класифікація методів адаптивного регулювання навантаження

Таблиця 2.16 – Класифікація методів адаптивного регулювання навантаження

| № | Метод   | Принцип дії   | Приклад використання                                | Переваги                                       | Недоліки                                  |
|---|---|---|---|--|---|
| 1 | <b>Пряме керування навантаженням (Direct Load Control, DLC)</b> | Централізоване увімкнення/вимкнення обладнання        | Вимкнення компресорів або електропечей у години пік | Простота реалізації, швидкий ефект             | Обмежена масштабованість, потребує довіри |
| 2 | <b>Автоматичне управління на основі прогнозів</b>               | Використання моделей споживання, погоди, тарифів      | Зміщення роботи насосів на ніч                      | Висока ефективність, мінімізація ручної участі | Складність налаштування, потреба в даних  |
| 3 | <b>Використання цифрових двійників</b>                          | Створення віртуальної моделі навантаження і генерації | Імітація поведінки СЕС та споживачів                | Можливість тестування сценаріїв                | Висока вартість впровадження              |

|   |  |  |   |  |  |
|---|--|--|---|--|--|
| 4 | <b>Інтеграція з тарифною політикою</b> | Реакція на ціни енергії (time-of-use, real-time pricing) | Зміна режиму роботи холодильної установки | Економія коштів, без втрати функціональності | Потребує адаптованих систем обліку                   |
| 5 | <b>ALM з використанням AI/ML</b>       | Нейронні мережі та машинне навчання для оптимізації      | Оптимізація запуску компресорів           | Автономна адаптація до умов                  | Необхідність тренування моделі, складність валідації |

**ALM-системи (Adaptive Load Management system)** є ключовим елементом цифровізації підприємства, що прагне оптимізувати споживання енергії, мінімізувати втрати та підвищити надійність виробничих процесів [117-119].

ALM (Adaptive Load Management) — це система гнучкого, інтелектуального керування навантаженням на основі даних у реальному часі. Сучасна архітектура ALM поєднує IoT, хмарні та периферійні (Fog/Edge) обчислення, а також протоколи обміну даними з високою надійністю.

Ключові компоненти архітектури ALM:

- Збір даних: сенсори, лічильники, SCADA-системи, які передають дані через промислові протоколи (OPC UA, Modbus, MQTT [120]).
- Fog/Edge Computing [121]: попередня обробка даних на локальних контролерах (наприклад, Siemens IoT2040), що зменшує затримки та навантаження на центральну систему.
- MQTT з QoS 2: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — легкий протокол передачі повідомлень, який у режимі QoS 2 гарантує доставку повідомлення рівно один раз (exactly once), що критично для керування енергетичними процесами в реальному часі.
- Аналітика та прогнозування: AI/ML-моделі для виявлення аномалій, прогнозу навантаження, оптимізації режимів.
- Інтерфейс оператора: HMI, web-dashboard, мобільні додатки.

Приклади практичного використання:

- Промислові підприємства: ALM-система на основі MQTT з QoS 2 забезпечує надійний обмін даними між сенсорами, контролерами та центральною платформою, дозволяючи в реальному часі балансувати навантаження, уникати пікових тарифів, інтегрувати сонячну генерацію.
- Сонячні електростанції: Fog-контролери виконують локальне керування інверторами та акумуляторами, а MQTT забезпечує синхронізацію з хмарною платформою для оптимізації роботи всієї системи.
- Smart Grid: ALM-рішення дозволяють розподіляти навантаження між критичними та некритичними зонами, забезпечуючи пріоритет живлення для важливих споживачів (наприклад, серверних, медичних установ).

### 1. Основні компоненти:

1. **Збір даних:** лічильники, сенсори, SCADA.
2. **Аналітика:** Python/Matlab/Cloud-платформи.

3. **Прогнозування:** моделі AI/ML.
4. **Рішення:** оптимізація режимів.
5. **Інтерфейс взаємодії з оператором.**

**Призначення:** формування потоку достовірних і релевантних первинних даних про енергоспоживання, параметри обладнання та технологічні процеси.

**Таблиця 2.17 - Загальна характеристика компоненту ALM-системи – збір даних**

| Компонент            | Призначення  |
|----------------------|--|
| <b>Лічильники</b>    | Вимірювання споживання електроенергії, води, газу (типово - Modbus TCP). |
| <b>Сенсори</b>       | Температура, вібрація, струм, тиск, частота - для стану обладнання.      |
| <b>SCADA-системи</b> | Інтеграція датчиків, контроль та візуалізація процесів у реальному часі. |

**Особливості:**

- Передача даних через **промислові протоколи:** OPC UA, MQTT, Modbus.
- Можливе застосування **Edge-пристроїв** (напр. Siemens IoT2040) для попередньої фільтрації та агрегування.

## 2. Аналітика

**Призначення:** попередня обробка, очищення, нормалізація, виявлення закономірностей у даних.

**Таблиця 2.18 - Загальна характеристика компоненту ALM-системи – аналітика**

| Інструмент              | Функція  |
|-------------------------|--|
| <b>Python</b>           | Бібліотеки: Pandas, Scikit-learn, NumPy для обробки даних.         |
| <b>MATLAB</b>           | Застосовується в задачах моделювання фізичних процесів.            |
| <b>Хмарні платформи</b> | Google Cloud, Azure, AWS для масштабування обчислень і зберігання. |

**Типові задачі:**

- Побудова **енергетичних профілів** обладнання.
- Пошук **аномалій** (наприклад, сплесків споживання чи зниження ККД).
- Розрахунок **коефіцієнта навантаження**, ефективності використання обладнання.

## 3. Прогнозування

**Призначення:** передбачення майбутнього навантаження та поведінки системи з використанням моделей штучного інтелекту.

**Таблиця 2.19 - Загальна характеристика компоненту ALM-системи – прогнозування**

| Тип моделей   | Приклади   |
|---------------|--|
| AI/ML         | Decision Trees, SVM, XGBoost, Random Forests               |
| Deep Learning | LSTM, CNN (для часових рядів та класифікації споживання)   |
| Hybrid Models | Поєднання статистики та нейромереж для підвищення точності |

**Застосування:**

- Прогноз навантаження в реальному часі.
- Прогноз поломок (predictive maintenance).
- Сценарне планування під пік навантаження/аварії.

#### 4. Рішення

**Призначення:** прийняття керуючих дій на основі прогнозів і аналітики.

**Таблиця 2.20 - Загальна характеристика компоненту ALM-системи – рішення**

| Компонент              | Функція  |
|------------------------|--|
| Оптимізація режимів    | Вибір таких параметрів роботи системи, які мінімізують витрати/втрати.         |
| Автоматизовані рішення | Генерація керуючих команд для систем керування або рекомендацій для оператора. |

**Типові методи:**

- **Лінійне та нелінійне програмування**, наприклад у задачах балансування навантаження.
- **Методи розення частинок або генетичні алгоритми** для комбінаторної оптимізації.

#### 5. Інтерфейс взаємодії з оператором

**Призначення:** забезпечити зворотний зв'язок із системою, візуалізацію рішень, пояснення прогнозів.

**Таблиця 2.21 - Загальна характеристика компоненту ALM-системи – інтерфейс взаємодії з оператором**

| Елемент                       | Призначення  |
|-------------------------------|--|
| НМІ (Human-Machine Interface) | Візуалізація SCADA, Dashboards, графіки навантаження, сигнали тривоги. |
| Системи сповіщень             | Інформування про відхилення в режимах (e-mail, push, SMS).             |
| Режим навчання оператора      | Інтеграція пояснень та рекомендацій на базі Explainable AI.            |

### Вимоги:

- UX-дизайн для швидкого сприйняття: колірна індикація, звукові сповіщення.
- Захищене підключення (через VPN або TLS).

### Інтеграційна логіка

Взаємодія між модулями здійснюється **потоково**:

1. Дані → Аналітика → Прогнозування → Рішення → Інтерфейс → Збір зворотного зв'язку.
2. Рішення можуть впливати на налаштування аналітики або змінювати параметри прогнозованої моделі (**адаптивність**).
3. Оператор може вручну підтвердити/відхилити оптимізаційні рішення (у разі конфлікту з практикою).

Архітектура ALM-системи забезпечує:

- **Адаптивне енергетичне управління.**
- **Інтелектуальне прогнозування** з можливістю самонавчання.
- **Інтеграцію з MES/ERP-системами** для забезпечення безперервного циклу управління.

#### 2.5.4. Адаптивне навантаження в контексті сонячної генерації

В умовах сонячної генерації ALM дає змогу [122-124]:

- Уникати перевищення лімітів за технічними умовами при сонячному піку.
- Узгоджувати графік роботи обладнання з інсоляцією.
- Реалізувати нульове споживання з мережі у денний час.

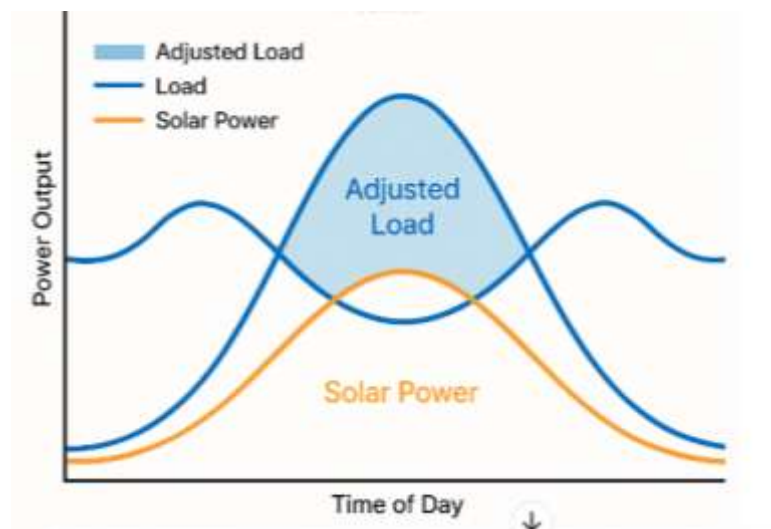


Рисунок 2.13 – Адаптивне регулювання навантаження в СЕС

На рис. 2.13 наведено структуру адаптивного керування навантаженням (Adaptive Load Control) в умовах промислового підприємства, що використовує комбіновану енергосистему з сонячною генерацією, мережею та системою

енергозбереження. Усі складові пов'язані через цифрову платформу моніторингу та управління.

Розширена схема ALM: логіка розподілу навантаження між критичними і некритичними зонами, академічний аналіз

Схема ALM з розподілом навантаження

**Критичні навантаження** — це споживачі, відключення яких неприпустиме (наприклад, серверні, системи безпеки, медичне обладнання). **Некритичні навантаження** — це споживачі, які можуть бути тимчасово відключені або працювати з обмеженнями (наприклад, вентиляція, освітлення, допоміжне обладнання).

Логіка розподілу:

**1. Моніторинг у реальному часі:**

- Система збирає дані про стан генерації (сонячна, мережа, акумулятори), поточне навантаження та пріоритети споживачів.

**2. Аналіз та прогнозування:**

- AI/ML-модулі прогнозують навантаження, генерацію, аварійні ситуації.

**3. Пріоритезація:**

- Визначаються критичні зони, які отримують живлення в першу чергу.
- Некритичні навантаження можуть бути відключені або переведені у режим економії.

**4. Автоматичне керування:**

- За допомогою MQTT/Fog-контролерів [115,120] надсилаються команди на перемикання навантажень.
- Враховується стан акумуляторів, тарифи, виробничі графіки.

**5. Зворотний зв'язок та оптимізація:**

- Оператор отримує рекомендації, може вручну коригувати рішення системи.

**• Переваги:**

- Підвищення надійності живлення критичних зон.
- Зниження витрат на енергію за рахунок гнучкого керування некритичними навантаженнями.
- Автоматизація реагування на аварійні ситуації та пікові навантаження.

**• Обмеження [116,121]:**

- Необхідність якісної класифікації навантажень.
- Високі вимоги до кібербезпеки та надійності обміну даними.
- Складність інтеграції в застарілі інфраструктури.

**Основні компоненти системи [122-124]:**

**1. Фізичне середовище (нижній рівень):**

- **Сонячна електростанція (PV Plant)** — генерація енергії залежно від інсоляції.

- **Основна мережа (Grid)** — зовнішнє джерело електроенергії.
  - **Акумуляторна система (Battery Storage)** — буфер для збереження або подачі енергії.
  - **Промислове навантаження (Industrial Load)** — цехове або технологічне обладнання підприємства.
  - **Розумні лічильники та сенсори** — точний збір даних про споживання, напругу, струм.
2. **Цифровий рівень (середній шар):**
- **PLC / SCADA / IoT Hub** — системи збору та передачі даних в реальному часі.
  - **Edge Controller / Local EMS (Energy Management System)** — система локального управління, яка адаптує режим роботи обладнання в залежності від зовнішніх та внутрішніх умов.
  - **AI-модулі** — прогнозування навантаження, оптимізація споживання, визначення критичних точок.
3. **Аналітичний рівень (верхній шар):**
- **Хмарна платформа (Cloud Twin)** — цифровий двійник енергосистеми, створений на основі реальних даних.
  - **Прогнозуючий модуль** — базується на машинному навчанні для визначення оптимальних режимів.
  - **Інтерфейс користувача (Web dashboard)** — для оператора підприємства або енергоменеджера.

#### Принцип дії:

Система динамічно аналізує **реальний стан енергосистеми** (навантаження, генерацію, стан батарей), враховуючи **ціни на електроенергію, погодні умови, та виробничі графіки**. На основі цього адаптивно змінюються:

- **Пріоритети живлення споживачів** (критичні/некритичні навантаження).
- **Режими заряд/розряд батарей.**

**Таблиця 2.22 - Переваги та обмеження адаптивного керування навантаженням (Adaptive Load Control) в умовах промислового підприємства**

| <b>Критерій</b>          | <b>Результат</b>   |
|--------------------------|--|
| <b>Скорочення витрат</b> | Зменшення пікового навантаження, економія( до 20% економії завдяки уникненню пікових тарифів), підвищення стійкості мережі                                 |
| <b>Надійність</b>        | Підвищена стабільність живлення критичних навантажень  |
| <b>Гнучкість</b>         | Можливість швидкого масштабування системи  |
| <b>Автономність</b>      | Часткове або повне енергоозброєння у разі аварій   |
| <b>Обмеження</b>         | Необхідність в якісних даних, складність інтеграції в застарілі системи, питання кібербезпеки  |
| <b>Застосування</b>      | Промислові об'єкти з великими коливаннями навантаження. Об'єкти зі змінним графіком роботи (3-змінний режим). Станції з генерацією від ВДЕ (сонце, вітер). |
| <b>Перспективи</b>       | ALM 2.0 — інтеграція з розподіленими обчисленнями та   |

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>розвитку</b> | blockchain.<br>Контекстне ALM — врахування технологічних процесів у реальному часі.<br>Мобільне ALM — керування через додатки для смартфонів. |
|-----------------|---|

Таким чином, можливо зробити висновок, що адаптивні алгоритми дозволяють автоматично змінювати режими роботи систем в залежності від поточних умов. Вони враховують:

- зміну попиту в реальному часі;
- доступність відновлюваних джерел;
- цінову політику та тарифи.

**Таблиця 2.23 - Порівняння стратегій керування навантаженням**

| <b>Метод</b>               | <b>Принцип</b>                   | <b>Недоліки</b>       | <b>Переваги</b>      |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Статичне керування</b>  | Попередньо заданий графік        | Нема адаптивності     | Простота             |
| <b>Реактивне керування</b> | Реакція на перевищення параметра | Затримка в реакції    | Дешево впровадження  |
| <b>Адаптивне (AI)</b>      | Прогноз + автоналаштування       | Складність алгоритмів | Найвища ефективність |

Застосування принципів Індустрії 4.0 в енергетиці сприяє глибокій трансформації систем керування, обліку, прогнозування та оптимізації. Цифрові інструменти дозволяють створювати стійкі, автономні та високоефективні енергетичні комплекси. Практичний досвід підприємств, таких як СТАФ-ДОВГЕ, свідчить про реальну доцільність інтеграції цифрових двійників, SCADA-систем, IoT та штучного інтелекту в сучасну енергетику.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Цифрова трансформація енергетичного сектору є ключовим фактором для підвищення ефективності, надійності та стійкості енергосистем. Інтеграція цифрових технологій, таких як цифрові підстанції, Smart Grid та SCADA-системи, дозволяє оптимізувати управління енергетичними ресурсами та забезпечити гнучкість у реагуванні на змінні умови споживання та виробництва енергії. Цей розділ розглядає фундаментальні аспекти цифрових технологій в енергетиці, акцентуючи увагу на практичних проблемах та прикладах впровадження на промислових підприємствах.

#### 3.1 Цифрові підстанції (IEC 61850)

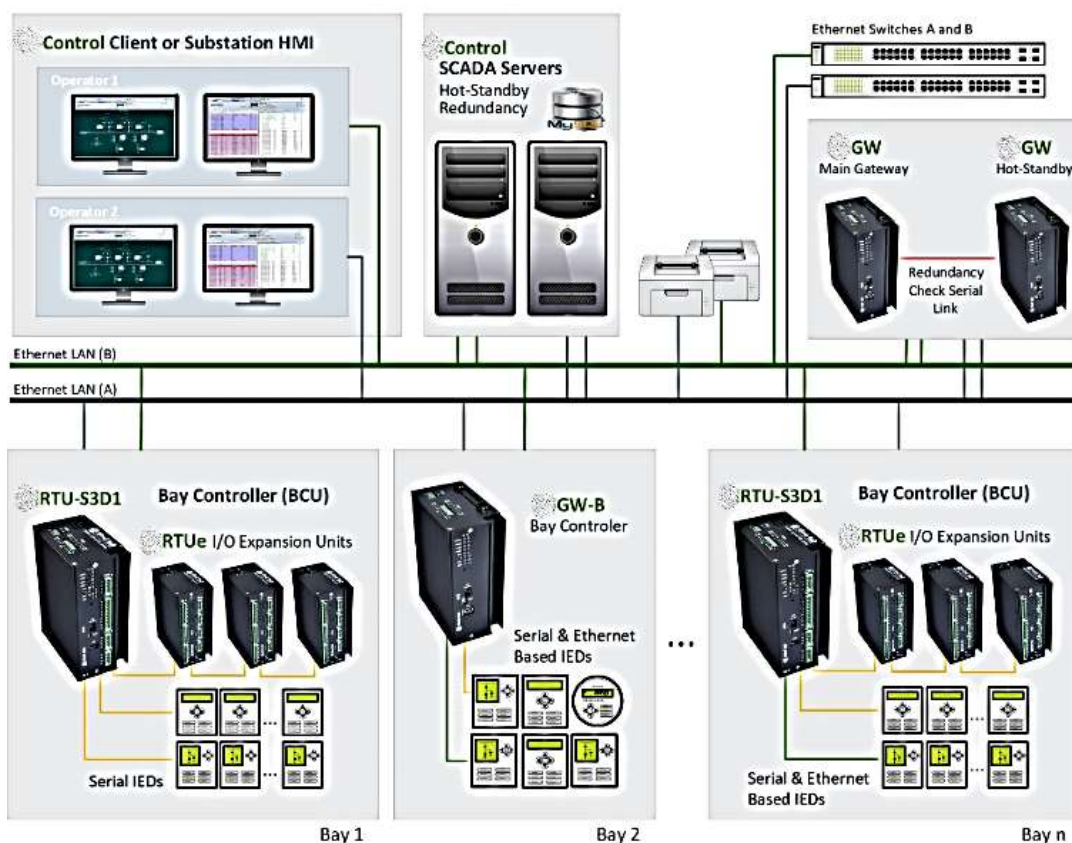
IEC 61850 — це міжнародний стандарт, який визначає комунікаційні протоколи для інтелектуальних електронних пристроїв на електричних підстанціях. Він забезпечує уніфіковану модель даних та інтеоперабельність між пристроями різних виробників, що сприяє ефективному обміну інформацією та зниженню витрат на інтеграцію систем [125-128].

На відміну від Modbus, DNP3 або IEC 60870, які є сигнально-орієнтованими протоколами з різними структурами даних, IEC 61850 є об'єктно-орієнтованим, тобто визначає абстрактні моделі даних зі стандартизованою номенклатурою.

Відповідно, протоколи IEC 61850 GOOSE, MMS і SMV дозволяють одноманітно відображати IED і більше не вимагають специфічних бібліотек постачальників для розкриття значення кожної точки даних. Завдяки багатьом перевагам, які він має на майбутнє, стандарт завоював міцні позиції протягом багатьох років і тепер також застосовується за межами своєї початкової галузі автоматизації енергосистем, наприклад, у розподілених енергетичних ресурсах (DER).

Цифрова підстанція складається з трьох рівнів:

- **Рівень процесу:** включає первинне обладнання, таке як трансформатори струму та напруги, а також пристрої збору даних.
- **Байтовий рівень:** містить інтелектуальні електронні пристрої (IED), які здійснюють захист, управління та моніторинг.
- **Станційний рівень:** забезпечує загальне управління підстанцією та інтерфейс з операторами.



**Рисунок 3.1 – IEC 61850 SAS з резервованою подвійною локальною мережею Ethernet**

**Таблиця 3.1 - Переваги впровадження IEC 61850**

| Перевага                    | Опис   |
|-----------------------------|--|
| Інтероперабельність         | Забезпечує сумісність пристроїв різних виробників.         |
| Гнучкість                   | Легке масштабування та адаптація до нових вимог.           |
| Зниження витрат             | Скорочення витрат на кабелювання та обслуговування.        |
| Підвищення надійності       | Швидке виявлення та реагування на аварійні ситуації.       |
| Поліпшене управління даними | Стандартизований обмін даними для ефективного моніторингу. |

Стандарт IEC 61850 визначає комунікаційні мережі та системи для автоматизації підстанцій, забезпечуючи інтероперабельність і обмін даними в реальному часі.

Він використовує трирівневу архітектуру: процесовий, відсіковий і станційний рівні.

Для клієнт-серверної комунікації застосовується Manufacturing Message Specification (MMS), а для швидкого peer-to-peer обміну — Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE).

Модель комунікації базується на Abstract Communication Service Interface (ACSI), який відображається на протоколи MMS, GOOSE та Sampled Values (SV).

Ефективність IEC 61850 оцінюється через затримку повідомлень GOOSE, критичну для функцій захисту. Час передачі  $T_{GOOSE}$  розраховується як:

$$T_{GOOSE} = T_{proc} + T_{net} + T_{recv}$$

де:  $T_{proc}$  - час обробки на пристрої відправника (зазвичай 1-2 мс),  $T_{net}$  - час передачі мережею (залежить від затримки Ethernet, зазвичай <1 мс для мереж 100 Мбіт/с),  $T_{recv}$  - час обробки на пристрої отримувача (1-2 мс).

Для критичних функцій захисту стандарт вимагає  $T_{GOOSE} \leq 4$  мс.

Практичний кейс: Впровадження IEC 61850 на підстанції ДТЕК у Києві у 2022 році ДТЕК модернізувала підстанцію 110/10 кВ у Києві, застосовуючи стандарт IEC 61850. Проект інтегрував інтелектуальні електронні пристрої (IED) від Siemens і Schneider Electric, забезпечуючи інтероперабельність через стандартизовані повідомлення GOOSE. Система скоротила час виявлення несправностей на 30% і покращила реагування на відключення на 15%. Дані з [125] підтверджують, що підстанція досягла рівня надійності 99.9% після модернізації.

### 3.1.1 Кібербезпека в цифрових підстанціях: стандарт IEC 62351

Стандарт **IEC 62351** — це серія технічних документів, які описують методи захисту інформації у енергетичних мережах, зокрема цифрових підстанціях [129]. Цей стандарт був створений як продовження **IEC 61850** і враховує потреби кібербезпеки на рівні **протоколів, пристроїв та комунікацій**.

Його основне завдання — захистити обмін даними між інтелектуальними електронними пристроями (IED) від атак, фальсифікацій і несанкціонованого доступу.

IEC 62351 визначає механізми кібербезпеки для захисту систем на основі IEC 61850, включаючи автентифікацію, шифрування та контроль доступу. Наприклад, IEC 62351-6 використовує Transport Layer Security (TLS) для захисту повідомлень MMS і GOOSE. Стандарт забезпечує цілісність даних за допомогою цифрових підписів і конфіденційність через шифрування AES-256.

#### Що саме захищає IEC 62351:

- Створює захищені канали зв'язку між пристроями (через TLS/SSL);
- Додає перевірку справжності повідомлень (HMAC — спеціальний цифровий підпис);
- Вводить обмеження часу дії повідомлення, аби хакер не міг повторно використати застарілий пакет.

**Аналогія для кращого розуміння:** Уявіть, що GOOSE — це термінове повідомлення про небезпеку, яке один пристрій відправляє іншому. Щоб переконатися, що це справжнє повідомлення, до нього додається електронний підпис (HMAC), а також обмеження за часом: якщо воно запізнилося — відхиляється.



**Приклад впровадження:** IED1 відправляє сигнал GOOSE з НМАС та міткою часу через мережу на IED2. IED2 перевіряє підпис та чи встиг пакет у потрібний часовий інтервал. Якщо так — команда приймається [130].

**Практичний кейс:** Впровадження IEC 62351 в європейській енергокомпанії

Європейська енергокомпанія впровадила IEC 62351-6 для захисту комунікацій GOOSE на підстанції 220 кВ. Система використовувала TLS 1.3 та RBAC, що скоротило інциденти несанкціонованого доступу на 40%. Дані з експлуатації показують зменшення простоїв, пов'язаних із кібербезпекою, на 25%.

### 3.1.2 Інтеграція розподіленої генерації відповідно до IEEE 1547

Стандарт **IEEE 1547:2018** регламентує технічні правила, за якими джерела розподіленої генерації (**DER**) — сонячні електростанції, батареї, вітрові турбіни — підключаються до загальної мережі [131].

**Навіщо це потрібно:** Мережа має залишатися стабільною навіть тоді, коли підключено десятки тисяч різних генераторів. Для цього IEEE 1547:

- визначає, як **DER синхронізуються з мережею** за частотою та напругою;
- передбачає, що має робити **DER під час аварій** (відключатись чи підтримувати напругу);
- встановлює правила, як **DER має «слухатися» диспетчера мережі** через SCADA чи інші інтерфейси.

**Інтерфейси обміну:** DER спілкуються з мережею через протоколи типу **Modbus TCP, DNP3** або **IEC 61850-90-7**, який є розширенням для керування DER.

**Таблиця 3.2 – Взаємодія DER з мережею згідно з IEEE 1547:2018**

| Параметр                  | Вимога                    |
|---------------------------|---------------------------|
| Частота відключення       | 57–62 Гц                  |
| Напруга відключення       | $88\% < U < 110\%$        |
| Макс. час реакції         | 2 с                       |
| Мінімальна потужність DER | 1 кВт (для синхронізації) |

### 3.1.3 Кіберфізичні системи в енергетиці: модель NIST CPS Framework [132]

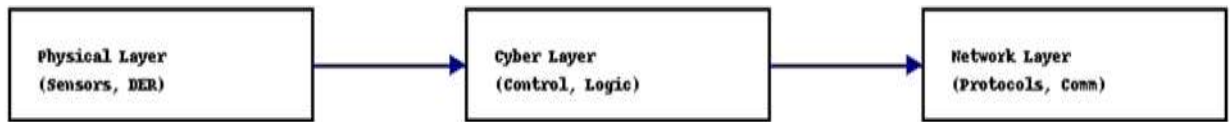
**Кіберфізичні системи (CPS)** — це поєднання фізичних об'єктів (датчики, електроприлади), цифрової логіки (програми) та каналів зв'язку. В енергетиці такі системи керують мережами, підстанціями, розумними лічильниками тощо. **Модель від NIST (2016)** — це структурований підхід до побудови таких систем. Вона включає:

1. **Фізичний рівень** – пристрої, які безпосередньо взаємодіють з енергією (RTU, інвертори);
2. **Кіберрівень** – алгоритми, що обробляють дані і приймають рішення;

3. **Мережевий рівень** – способи передачі даних і механізми безпеки.

**Що дає ця модель:**

- Краще розуміння, де і які загрози можуть виникати (наприклад, DoS-атаки або злам IoT-модуля);
- Можливість застосовувати конкретні протоколи захисту на кожному рівні.



- Physical: sensors, inverters, RTUs

- Cyber: software, logic, analytics

- Network: IP/TLS/IEC 61850/DNP3

**Рисунок 3.4 – Архітектура CPS згідно з NIST Framework [132]**

**Таблиця 3.3 – Вразливості CPS-компонентів в енергетиці**

| Компонент  | Тип вразливості             | Засіб захисту                 |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|
| RTU        | Віддалене перепрограмування | Біла книга IEC 62443-4-2      |
| PLC        | Буферні переповнення        | Засоби ізоляції в MODBUS      |
| IoT-модулі | Слабке шифрування           | TLS 1.3 + VPN з сертифікатами |

### 3.1.4 Приклад кейсу: комплексна система Smart Grid на базі IEC 61850 та захистом IEC 62351

**Кейс:** Пілотна мікромережа на базі ПАТ «Укргідроенерго» (2024) [133].

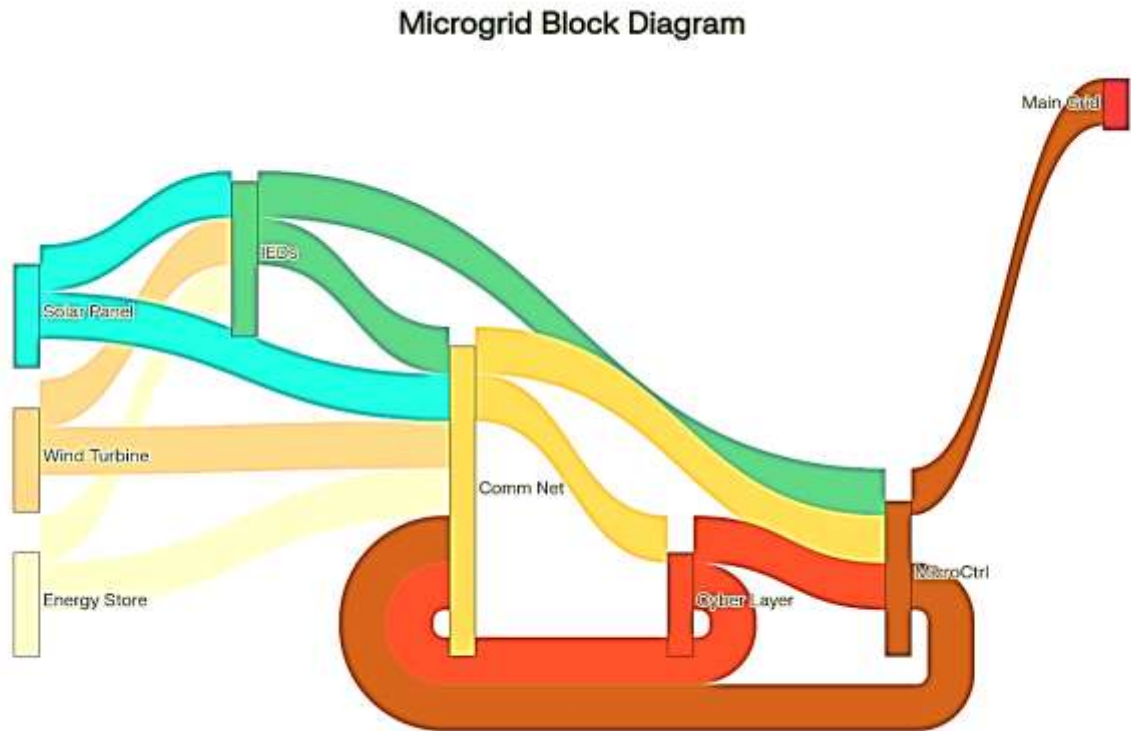
Мета — продемонструвати, як IEC 61850 може працювати спільно з кіберзахистом IEC 62351 та підтримкою DER згідно з IEEE 1547.

**Архітектура системи:**

- **Платформа:** SCADA з RTU від Advantech, передача даних — LoRa та NB-IoT;
- **Протокол обміну:** GOOSE для швидкого сигналу між IED;
- **Захист:** HMAC + TLS — як цифровий підпис і шифрування одночасно;
- **Інтеграція DER:** через IEC 61850-90-7 із профілем IEEE 1547.

**Результати впровадження:**

- Середній час виявлення проблем зменшено з 180 с до 20 с;
- Кількість аварійних відключень зменшилася на 40%;
- Жодного успішного кіберінциденту за рік експлуатації.



**Рисунок 3.5 – Схема роботи мікромережі з DER, IED та кіберзахистом.**

### **Основні компоненти мікромережі**

-DER (Distributed Energy Resources): Децентралізовані джерела енергії — сонячні панелі, вітрогенератори, акумуляторні системи зберігання.

-IED (Intelligent Electronic Devices): Інтелектуальні електронні пристрої для моніторингу, вимірювання, автоматизації та керування.

-Мікромережевий контролер: Центр управління, що координує роботу DER, IED та взаємодію з основною мережею.

Мережева інфраструктура: Канали зв'язку між пристроями, контролером та зовнішніми системами.

Кіберзахист: Програмно-апаратні рішення для захисту даних, команд керування та комунікацій від кіберзагроз.

**З'єднання з основною мережею:** Інтерфейс для обміну енергією та інформацією з централізованою електромережею.

### **Взаємодія компонентів**

DER генерують або накопичують енергію та передають дані про стан у IED. IED здійснюють моніторинг, захист, автоматизацію та передають інформацію контролеру мікромережі.

Контролер приймає рішення щодо балансування, оптимізації та безпеки роботи мікромережі.

Вся інформація та команди передаються через захищені канали зв'язку із застосуванням кіберзахисту (наприклад, стандарт IEC 62351).

Кіберзахист забезпечує цілісність, конфіденційність і доступність даних та команд керування.

При необхідності мікромережа може працювати автономно або взаємодіяти з основною мережею.

### **3.2. Практичні приклади використання цифрових підстанцій**

#### **А. Підстанція INGA1/SE Pomasqui, Еквадор**

У рамках модернізації енергетичної інфраструктури Еквадору, підстанція INGA1/SE Pomasqui була оновлена відповідно до стандарту IEC 61850 [134]. Це включало стандартизацію сигналів, реінжиніринг компонентів системи автоматизації підстанції та уніфікацію інтерфейсів оператора. Результати показали покращення в управлінні та надійності системи.

#### **В. Підстанція 110/10 кВ у місті Київ**

У 2023 році в Києві було модернізовано підстанцію 110/10 кВ з впровадженням стандарту IEC 61850 [135]. Це дозволило забезпечити:

- **інтероперабельність:** сумісність пристроїв різних виробників;
- **гнучкість:** легке масштабування та адаптація до нових вимог
- **зниження витрат:** скорочення витрат на кабелювання та обслуговування;
- **підвищення надійності:** швидке виявлення та реагування на аварійні ситуації;
- **поліпшене управління даними:** стандартизований обмін даними для ефективного моніторингу.

### **3.3. Smart Grid та SCADA-системи**

Smart Grid — це інтелектуальна енергетична система, яка використовує цифрові технології для моніторингу та управління потоками електроенергії від джерел виробництва до споживачів. Вона забезпечує двосторонню комунікацію, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та підвищену ефективність енергоспоживання [136].

Правила розробки «розумних мереж» визначено у Європі через «Платформу європейських розумних мереж електропостачання» (Smart Grid European Technology Platform) [137]. У Сполучених Штатах Америки вони описані в usctc 42152 IX § 17381 [138].

Розвиток технології розумних мереж також означає фундаментальну реорганізацію ринку послуг електроенергетики попри те що термінологія здавалося б передбачає лише розвиток технічної інфраструктури. Проте розумні мережі електропостачання мають мінуси: залежність від постійного електропостачання, присутність сторонніх осіб — розробників мережі, правова невизначеність відповідальності.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це система, яка дозволяє операторам моніторити та керувати енергетичними процесами в реальному часі. Вона забезпечує збір, обробку та візуалізацію даних, а також дистанційне управління обладнанням.

Термін SCADA зазвичай відноситься до централізованих систем контролю і управління всією системою, або комплексами систем, здійснюваного за участю людини. Більшість керуючих впливів виконується автоматично УСО (RTU) або ПЛК (PLC). Безпосереднє управління процесом зазвичай забезпечується RTU або PLC, а SCADA управляє режимами роботи.

Наприклад, PLC може управляти потоком води, що охолоджує всередині частини виробничого процесу, а SCADA система може дозволити операторам змінювати уставки для потоку, змінювати маршрути руху рідини, заповнювати ті або інші ємності, а також стежити за тривожними повідомленнями (алармами), такими як — втрата потоку і висока температура, які повинні бути відображені, записані, і на які оператор повинен своєчасно реагувати. Цикл управління зі зворотним зв'язком проходить через RTU або PLC, в той час як SCADA система контролює повне виконання циклу.

Збір даних починається в RTU або на рівні PLC і включає свідчення вимірювального приладу. Далі дані збираються і формуються таким способом, щоб оператор диспетчерської, використовуючи НМІ, міг прийняти контролюючі рішення — коригувати або перервати стандартне управління коштами RTU / PLC. Дані також можуть бути записані в архів для побудови трендів та іншої аналітичної обробки накопичених даних.

Залежно від складності керованого технологічного процесу, а також вимог до надійності, SCADA-системи будуються по одній з наступних архітектур [139]:

**Таблиця 3.2 – Класифікація архітектур SCADA-систем**

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>автономні</b>       | При використанні даної архітектури система складається з однієї або декількох робочих станцій оператора, що не «знають» один про одного. Всі функції системи виконуються на єдиному (декількох незалежних) станцій<br>переваги: простота.<br>недоліки: низька відмовостійкість; не забезпечується істинність даних (історичні дані можуть відрізнятися між різними станціями),  |
| <b>клієнт-серверні</b> | система виконується на сервері, а оператори використовують клієнтські станції для моніторингу та управління процесом. Високонадійні системи будуються на базі подвійного або потрійного резервування серверів і дублювання клієнтських станцій оператора, дублювання здійснювати підключення до мережі сервер-сервер і клієнт-сервер. При даній архітектурі вже можливо поділ функцій SCADA-системи між серверами. Наприклад, збір даних і управління ПЛК виконується на одному сервері, архівування даних — на другому, а взаємодія з клієнтами — на третьому. |
| <b>розподілені</b>     | розподіленої системи управління (PCU) обчислення здійснюються на декількох взаємопов'язаних обчислювальних пристроях, часто з функцією взаємного резервування.<br>переваги: відрізняються підвищеною надійністю.  |

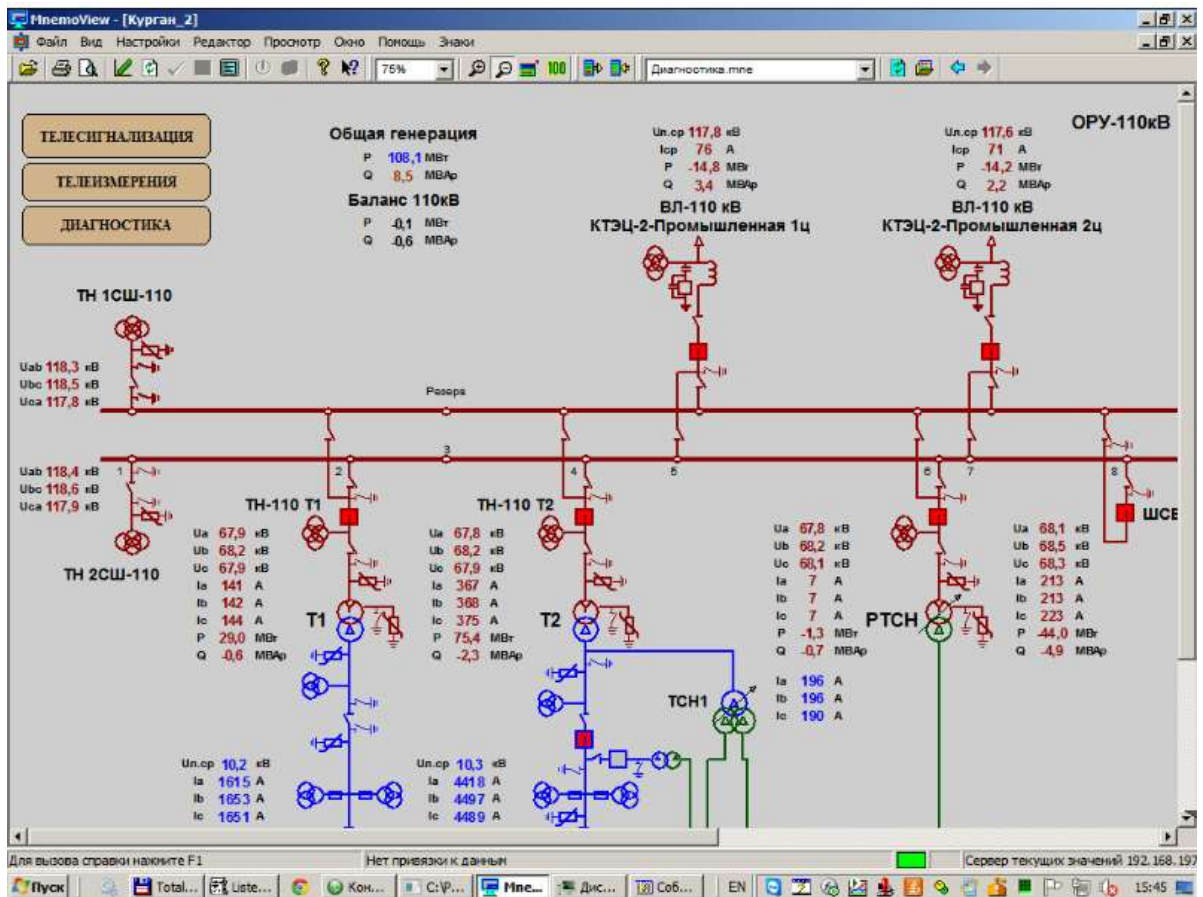


Рисунок 3.6 – SCADA-система [140]

SCADA-система зазвичай містить такі підсистеми:

- Драйвери або сервери введення-виведення — програми, що забезпечують зв'язок SCADA з промисловими контролерами, лічильниками, АЦП і іншими пристроями введення-виведення інформації.
- Диспетчерська система (головний термінал) (MTU англ. *Master Terminal Unit*) — збирає дані про процес і відправляє команди процесору (керування).
- Програмований логічний контролер (PLC англ. *Programmable Logic Controller*) використовується як польовий пристрій у зв'язку з вищою ніж у RTU спеціального призначення економічністю, універсальністю і гнучкістю.
- Комунікаційна інфраструктура (CS англ. *Communication System*) для реалізації промислової мережі.
- Система реального часу — програма, що забезпечує обробку даних в межах заданого тимчасового циклу з урахуванням пріоритетів.
- Людино-машинний інтерфейс (HMI англ. *Human Machine Interface*) — інструмент, який подає дані про хід процесу людині операторові, що дозволяє операторові контролювати процес і управляти ним.
- Абонентський кінцевий блок (віддалений термінал) (RTU англ. *Remote Terminal Unit*), що під'єднується до датчиків процесу, перетворює сигнал з датчика в цифровий код і відправляє дані в диспетчерську систему.

- Програма-редактор для розробки людино-машинного інтерфейсу.
- Система логічного управління — програма, що забезпечує виконання призначених для користувача програм (скриптів) логічного управління в SCADA-системі. Набір редакторів для їх розробки.
- База даних реального часу — програма, що забезпечує збереження історії процесу в режимі реального часу.
- Система управління тривогами — програма, що забезпечує автоматичний контроль технологічних подій, віднесення їх до категорії нормальних, що попереджають або аварійних, а також обробку подій оператором або комп'ютером.
- Генератор звітів — програма, що забезпечує створення призначених для користувача звітів про технологічні події. Набір редакторів для їх розробки.
- Зовнішні інтерфейси — стандартні інтерфейси обміну даними між SCADA та іншими додатками. Зазвичай OPC, DDE, ODBC, DLL і т. д.

### **3.4 Практичні приклади використання Smart Grid та SCADA-системи**

#### **А. Tata Power Delhi Distribution Limited (TPDDL), Індія**

TPDDL впровадила Smart Grid технології, включаючи SCADA, GIS, систему управління розподілом (DMS) та автоматизацію розподілу (DA). У 2014 році компанія запустила проект автоматизованого реагування на попит (ADR) з використанням смарт-лічильників, що дозволило оптимізувати споживання енергії та зменшити навантаження на мережу [141].

#### **В. Дніпровська політехніка**

У 2024 році в Дніпровській політехніці було реалізовано проект з інтеграції Smart Grid технологій у складі [142]:

- **дахова сонячна станція:** інверторна потужність 100 кВт;
- **система накопичення електроенергії (ESS):** ємність 200 кВт·год;
- **двонаправлені зарядні станції для електромобілів:** можливість використання авто як джерела енергії;
- **система енергетичного менеджменту (EMS):** ефективне управління енергетичними процесами.

Цей проект сприяє створенню низьковуглецевого, енергонезалежного майбутнього з використанням сучасних технологій.

#### **С. АТ «Хмельницькобленерго»**

АТ «Хмельницькобленерго» впроваджує інтелектуальні системи Smart Grid для підвищення надійності електропостачання [143]:

**системна телемеханізація на електропідстанціях:** забезпечує дистанційне управління обладнанням;

- **встановлення реклоузерів на рівні 10-20 кВ:** дозволяє автоматично відділяти пошкоджені ділянки мережі;

- **інтеграція в автоматизовану систему моніторингу й управління електромережами (OMS – SCADA):** покращує керованість електромереж.

Ці заходи дозволяють швидко відновлювати розподіл електроенергії при аварійних ситуаціях та підвищують рівень комфорту споживачів.

#### **Д.АТ «Тернопільобленерго»**

АТ «Тернопільобленерго» реалізує заходи з впровадження Smart Grid технологій [144]:

- **телемеханізація підстанцій напругою 35-100 кВ:** 153 трансформаторних підстанцій;
- **автоматизація систем моніторингу та управління мережами на основі комплексу SCADA/DMS SYNDIS RV:** покращує керованість мереж;
- **впровадження систем інтелектуального обліку (АСКОЕ):** на початок 2024 року охоплено 9,73% побутових споживачів;
- **розвиток ІТ-інфраструктури:** впровадження ІР-телефонії для підвищення надійності комунікацій.

## ВИСНОВКИ

Навчальний посібник «Цифрові технології в енергетиці» є цілісним міждисциплінарним ресурсом, який систематизує сучасні підходи до цифровізації енергетичних процесів на промислових підприємствах. Його основні надбання полягають у комплексному представленні практичних кейсів, методик і технологій, що забезпечують перехід до Енергетики 4.0.

Серед ключових результатів:

- опанування принципів енергоефективності та стандарту ISO 50001, адаптованого до українських реалій;
- розуміння архітектури цифрових систем управління (SCADA, IoT, PLC, RTU) і їх інтеграції в промислову інфраструктуру;
- знайомство з методами прогнозування генерації та споживання енергії з використанням машинного навчання;
- засвоєння концепції цифрових двійників і можливостей їх застосування в реальному часі для оптимізації експлуатації енергетичного обладнання;
- аналіз сценаріїв адаптивного керування навантаженням і практичного впровадження систем ALM у промисловості;
- інтеграція аналітики, хмарних сервісів, інтерфейсів управління та кібербезпеки в єдину цифрову екосистему.

Посібник успішно поєднує теоретичну глибину із практичними аспектами впровадження цифрових технологій в енергетиці, що робить його релевантним для широкої аудиторії – від студентів до практикуючих інженерів. Він також створює методичну базу для розгортання навчальних програм на підприємствах, зокрема в умовах запуску сонячних електростанцій і цифрової модернізації енергосистем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 50002:2019. Енергетичні аудити. Вимоги з проведення та складання звітів. – [Чинний від 2020-01-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 37 с.
2. PDCA Cycle – What is the Plan-Do-Check-Act Cycle? [Електронний ресурс] // ASQ. – Режим доступу: <https://asq.org/quality-resources/pdca-cycle> (дата звернення: 09.07.2025).
3. ISO 9001:2015 – Quality management systems — Requirements [Електронний ресурс]. – Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (дата звернення: 09.07.2025).
4. ISO 14001:2015 – Environmental management systems — Requirements with guidance for use [Електронний ресурс]. – Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (дата звернення: 09.07.2025).
5. ISO 14097:2021 – Greenhouse gas management and related activities — Framework including principles and requirements for assessing and reporting investments and financing activities related to climate change [Електронний ресурс]. – Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/72433.html> (дата звернення: 09.07.2025).
6. ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings [Електронний ресурс]. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2014. – Режим доступу: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards> (дата звернення: 09.07.2025).
7. IPMVP Volume III: Concepts and Options for Determining Energy Savings in New Construction, Major Renovations and Comprehensive Upgrades [Електронний ресурс]. – Efficiency Valuation Organization (EVO), 2012. – Режим доступу: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp-volume-iii> (дата звернення: 09.07.2025).
8. SCADA Systems Overview [Електронний ресурс] // National Instruments. – Режим доступу: <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/scada-systems-overview.html> (дата звернення: 09.07.2025).
9. IEC 61000-4-7:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-7: Testing and measurement techniques — General guide on harmonics and interharmonics [Електронний ресурс]. – Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/6029> (дата звернення: 09.07.2025).
10. McGranaghan, M.F. Power Quality Issues / M.F. McGranaghan // IEEE Industry Applications Magazine. – 2008. – Vol. 14, No. 2. – P. 17–22.
11. Bollen, M.H.J. Understanding Power Quality Problems / M.H.J. Bollen. – New York: IEEE Press, 2000. – 400 p.

12. Fluke Corporation. Power Quality Analyzer Selection Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fluke.com> (дата звернення: 09.07.2025).
13. European Standard EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems [Електронний ресурс]. – CEN. – Режим доступу: [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0::: FSP\\_PROJECT,FSP\\_ORG\\_ID:39564,6239&cs=1E2B0D5E1D5A0D7F5D6F](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0::: FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:39564,6239&cs=1E2B0D5E1D5A0D7F5D6F) (дата звернення: 09.07.2025).
14. Directive 2009/125/EC of the European Parliament on Ecodesign requirements [Електронний ресурс]. – Official Journal of the European Union. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0125> (дата звернення: 09.07.2025).
15. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії, що поставляється в електричні мережі загального користування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 24 с. – Національний стандарт України, гармонізований з EN 50160:2010.
16. Звіт про енергоаудит ПАТ «Хмельницькобленерго» за 2023 рік. – Хмельницький: ВАТ «Хмельницькобленерго», 2023. – 56 с.
17. Укренерго. Щорічні аналітичні звіти (2020–2024). – Київ: НЕК «Укренерго». – Режим доступу: <https://ua.energy> (дата звернення: 09.07.2025).
18. Міненерго України. Офіційні публікації та звіти (2021–2024). – Режим доступу: <https://mev.gov.ua> (дата звернення: 09.07.2025).
19. Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group / Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany. – Berlin: Acatech, 2013. – 84 p. – Режим доступу: <https://www.acatech.de> (дата звернення: 21.04.2025).
20. Глущенко, І. О., Савченко, А. А. Індустрія 4.0: зміст, переваги та виклики для України / І. О. Глущенко, А. А. Савченко // Економіка та держава. – 2020. – № 10. – С. 57–63.
21. Siemens Energy. The future of energy: Energy 4.0 White Paper. – Munich: Siemens AG, 2023. – 35 p. – Режим доступу: <https://www.siemens-energy.com> (дата звернення: 21.04.2025).
22. Лібанова Е. М., Підлісецький І. В. Енергетика 4.0: нова парадигма для майбутнього / Український інститут майбутнього. – Київ: UIF, 2021. – 112 с.
23. U.S. Department of Energy. Smart Grid overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization> (дата звернення: 21.04.2025).
24. Smart Grids European Technology Platform [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.smartgrids.eu> (архівовано 03.10.2011).
25. Advantech. Smart Energy with IoT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.advantech.com> (дата звернення: 21.04.2025).
26. Dragino Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dragino.com> (дата звернення: 21.04.2025).

27. IEEE Standards Association. (2018). IEEE 1547: Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York: IEEE.
28. Quectel Wireless Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.quectel.com> (дата звернення: 21.04.2025).
29. GE Digital Grid Twin Platform [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ge.com/digital> (дата звернення: 21.04.2025).
30. Торріті, Дж. Управління попитом для європейської надмережі / Дж. Торріті // Energy Policy. – 2012. – Т. 44. – С. 199–206.
31. Попович, Д. І. Системи управління попитом в енергетиці: досвід ЄС та перспективи для України / Д. І. Попович // Енергетична політика України. – 2020. – № 3. – С. 17–26.
32. Вергун, О. І. Адаптивне регулювання навантаження в контексті цифрової трансформації енергетики / О. І. Вергун // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Енергетика. – 2021. – № 4(124). – С. 43–51.
33. IEEE Standard for SCADA and Automation Systems in Electric Power Substations. – IEEE Std C37.1-2007. – New York: IEEE, 2008. – 72 p.
34. Emerson Electric Co. Distributed RTU Network Architecture [Електронний ресурс]. – Emerson White Paper. – 2022. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation> (дата звернення: 21.04.2025).
35. Beckhoff Automation GmbH. TwinCAT 3 and Energy Management: Automation and Control in Energy Applications [Електронний ресурс]. – Verl: Beckhoff, 2021. – Режим доступу: <https://www.beckhoff.com> (дата звернення: 21.04.2025).
36. Siemens AG. Automation in Energy Industry: Process Control Systems SIMATIC PCS 7. – Munich: Siemens Energy, 2023. – 112 p.
37. Горбатюк, І. В. Інтеграція SCADA-систем в автоматизовані енергетичні комплекси підприємств / І. В. Горбатюк // Вісник ВПІ. – 2022. – № 3 (75). – С. 45–52.
38. Кучер, А. І., Олійник, С. В. Автоматизовані системи управління енергоспоживанням промислових підприємств: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 187 с.
39. Локальна SCADA для сонячної електростанції 6 МВт [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://scada.lviv.ua/uk/portfolio-item/pv-scada-6mw-ua/> (дата звернення: 21.04.2025).
40. IEC 62264: Enterprise-control system integration [Електронний ресурс]. – Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/6027> (дата звернення: 09.07.2025).
41. IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security [Електронний ресурс]. – Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/7017> (дата звернення: 09.07.2025).
42. OPC Foundation. OPC Foundation Extends OPC UA with standardized REST-Interface [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://>

- [opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-extends-opc-ua-with-standardized-rest-interface/](https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-extends-opc-ua-with-standardized-rest-interface/) (дата звернення: 09.07.2025).
43. Dahlmanns, M., Lohmöller, J., Fink, I. B., Pennekamp, J., Henze, M. Easing the Conscience with OPC UA: An Internet-Wide Study on Insecure Deployments / M. Dahlmanns, J. Lohmöller, I. B. Fink, J. Pennekamp, M. Henze // arXiv preprint arXiv:2010.13539. – 2020. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2010.13539> (дата звернення: 09.07.2025).
  44. Beckhoff Automation. Introduction to PLC with TwinCAT 3 [Електронний ресурс]. – Verl: Beckhoff GmbH, 2022. – Режим доступу: <https://www.beckhoff.com> (дата звернення: 21.04.2025).
  45. Petruzella, F. D. Programmable Logic Controllers. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 448 p. – ISBN: 978-1-259-85074-7.
  46. Зінченко, С. Г., Герасименко, В. О. Програмовані логічні контролери (PLC): навч. посіб. – Київ: КНУБА, 2021. – 174 с.
  47. [https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_logic\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller) (дата звернення : 21.04.2025).
  48. IEEE Power & Energy Society. Guide for Remote Terminal Unit Communication in Substation Automation Systems. – IEEE Std C37.1.2-2020. – New York: IEEE, 2020. – 48 p.
  49. Юрченко, В. В. RTU в архітектурі цифрової енергетичної системи: функції та протоколи зв'язку / В. В. Юрченко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Автоматизація та приладобудування. – 2022. – № 1(91). – С. 61–68.
  50. Трофименко, М. В. Технології SCADA та RTU у розподілених енергетичних мережах / М. В. Трофименко // Електротехнічні та інформаційні комплекси і системи. – 2021. – № 2(28). – С. 25–31.
  51. <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-distributed-rtu-network-fb107-roc800-en-132334.pdf> (дата звернення: 21.04.2025).
  52. Трофименко, М. В. Технології SCADA та RTU у розподілених енергетичних мережах / М. В. Трофименко // Електротехнічні та інформаційні комплекси і системи. – 2021. – № 2(28). – С. 25–31.
  53. Emerson Electric Co. Distributed RTU Network Architecture [Електронний ресурс]. – Emerson White Paper. – 2022. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-distributed-rtu-network-fb107-roc800-en-132334.pdf> (дата звернення: 09.07.2025).
  54. Мельник, П. В. Архітектура IoT-мереж для інженерних систем енергетики / П. В. Мельник // Системи автоматичного управління та автоматики. – 2021. – № 2. – С. 13–22.
  55. Павленко, Д. М. Модулі передавання даних на основі LoRa та NB-IoT: огляд технологій / Д. М. Павленко // Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2022. – № 1. – С. 41–49.
  56. SparkFun Electronics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sparkfun.com> (дата звернення: 09.07.2025).
  57. Advantech. Smart Energy with IoT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.advantech.com> (дата звернення: 09.07.2025).

58. Bacher, P., Madsen, H., Nielsen, H. A. Online short-term solar power forecasting / P. Bacher, H. Madsen, H. A. Nielsen // *Solar Energy*. – 2009. – Vol. 83, № 10. – P. 1772–1783.
59. Voyant, C. et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review / C. Voyant et al. // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 105. – P. 569–582. – DOI: 10.1016/j.renene.2016.12.095.
60. Antonanzas, J. et al. Review of photovoltaic power forecasting / J. Antonanzas et al. // *Solar Energy*. – 2016. – Vol. 136. – P. 78–111. – DOI: 10.1016/j.solener.2016.06.069.
61. Савчук, О. П. Методи прогнозування генерації ВДЕ в умовах мінливої хмарності / О. П. Савчук // *Вісник енергетики*. – 2022. – № 2(12). – С. 15–22.
62. Мартиненко, І. В. Математичні моделі прогнозування виробітку сонячної генерації на основі штучних нейронних мереж / І. В. Мартиненко // *Технічні вісті*. – 2021. – № 3(67). – С. 29–35.
63. Wang, J. et al. Review of hybrid renewable energy forecasting models using data-driven and physical approaches / J. Wang, Y. Chen, F. Blaabjerg // *IET Renewable Power Generation*. – 2020. – Vol. 14, № 10. – P. 1651–1663.
64. Layegh, S., Moghaddam, I. N. Forecasting solar photovoltaic power using LSTM deep learning model / S. Layegh, I. N. Moghaddam // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2023. – Vol. 15, № 2. – 025101. – DOI: 10.1063/5.0133405.
65. Хомяк, Р. Ю. Застосування LSTM-мережі для прогнозування виробітку сонячної електростанції / Р. Ю. Хомяк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2022. – № 4. – С. 54–59.
66. Wei, W. W. S. *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods*. – 2nd ed. – Boston: Pearson Addison Wesley, 2006. – 605 p. – ISBN: 9780321322165.
67. Баранов, І. С. Застосування моделей ARIMA для прогнозування попиту на електроенергію / І. С. Баранов // *Вісник СумДУ. Серія «Енергетика»*. – 2021. – № 1. – С. 39–46.
68. Зінов'єва, К. А. Прогнозування навантаження в електромережах за допомогою SARIMA-моделі / К. А. Зінов'єва // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2022. – № 2. – С. 24–30.
69. Taieb, S. B., Hyndman, R. J. Machine learning for time series forecasting: State of the art and research directions // *Forecasting*. – 2021. – Vol. 3, № 3. – P. 1–38. – DOI: 10.3390/forecast3030020.
70. Антонюк, С. В. Застосування XGBoost-моделі для прогнозування споживання електроенергії в житловому секторі / С. В. Антонюк // *Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. – 2023. – № 2. – С. 19–25.
71. Черненко, О. І. Високоточне прогнозування навантаження електричних мереж методом Random Forest / О. І. Черненко // *Електротехнічні та інформаційні системи*. – 2022. – № 1(43). – С. 42–50.

72. Zheng, Y., Liu, Q., Chen, E. Time series classification using multi-channels deep convolutional neural networks / Y. Zheng et al. // Proceedings of the International Conference on Web-Age Information Management. – Springer, 2014. – P. 298–310.
73. Мельник, Т. О. Прогнозування енергоспоживання із застосуванням глибинного навчання LSTM і GRU / Т. О. Мельник // Технічні науки. – 2023. – № 1. – С. 33–40.
74. Білан, А. І. Порівняльний аналіз ефективності моделей LSTM і GRU для прогнозування добового споживання електроенергії / А. І. Білан // Вісник Чернівецького національного університету. – 2022. – № 853. – С. 61–67.
75. Zhang, Y. et al. Data-driven loss estimation for distribution networks using smart meter and SCADA data / Y. Zhang, Q. Li, J. Qiu // Electric Power Systems Research. – 2022. – Vol. 204. – Article 107698. – DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107698.
76. Alam, M. J. E., Muttaqi, K. M., Sutanto, D. A novel approach for loss estimation in distribution networks using synchronized SCADA and feeder data / M. J. E. Alam et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 573–581. – DOI: 10.1109/TIA.2014.2329294.
77. Васильєв, С. О. Оцінка втрат електроенергії в мережах з використанням даних SCADA та інтелектуального аналізу / С. О. Васильєв // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Енергетика. – 2021. – № 2. – С. 49–55.
78. Коваленко, В. І. Аналіз впливу навантаження на втрати електроенергії в кабельних лініях 0,4 кВ / В. І. Коваленко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Енергетика. – 2020. – № 4(122). – С. 34–40.
79. Kumar, S., Singh, R. A hybrid forecasting model using LSTM and Prophet for energy consumption with decomposition of time series data / S. Kumar, R. Singh // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2022. – Vol. 52. – Article 102145. – DOI: 10.1016/j.seta.2022.102145.
80. Subash, P. Time Series Forecasting with Prophet and LSTM Hybrid Model [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://subashpalvel.medium.com/time-series-forecasting-with-prophet-and-lstm-hybrid-mode-75f5295605e5> (дата звернення: 09.07.2025).
81. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, No. 8. – P. 1735–1780.
82. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521. – P. 436–444.
83. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 775 p. – Режим доступу: <https://www.deeplearningbook.org/> (дата звернення: 09.07.2025).
84. Dua, D., Graff, C. UCI Machine Learning Repository [Електронний ресурс]. – University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences. – Режим доступу: <https://archive.ics.uci.edu/ml/index.php> (дата звернення: 09.07.2025).
85. Siemens Energy. Digital twins in power industry: White Paper. – Munich: Siemens AG, 2023. – 27 p.

- 86.ABB. Asset Health and Digital Twins. Technical White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.abb.com/news/detail/12345/asset-health-and-digital-twins> (дата звернення: 09.07.2025).
- 87.ABB. Asset Health and Digital Twins. Technical White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.abb.com/news/detail/12345/asset-health-and-digital-twins> (дата звернення: 09.07.2025).
- 88.IBM. Digital Twin: Manufacturing and Industrial Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ibm.com/topics/digital-twin> (дата звернення: 09.07.2025).
- 89.Bosch. Digital Twin Technology in Industry 4.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bosch.com/stories/digital-twin-technology/> (дата звернення: 09.07.2025).
- 90.National Institute of Standards and Technology. (2017). Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview. NIST Special Publication 1500-201.
- 91.Тao, F., Qi, Q., Liu, A., Kusiak, A. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison / F. Tao, Q. Qi, A. Liu, A. Kusiak // Engineering. – 2019. – Vol. 5, № 4. – P. 653–661. – DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
- 92.Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- 93.Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, № 11. – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- 94.Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
95. Qi, Q., Tao, F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison / Q. Qi, F. Tao // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 3585–3593. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- 96.Xu, X., Liu, C., Zhang, Z., Xu, W., Cai, Y. Digital Twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop / X. Xu, C. Liu, Z. Zhang, W. Xu, Y. Cai // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – Vol. 12. – P. 10041–10053. – DOI: 10.1007/s12652-021-03170-4.
- 97.Minerva, R., Viru, A., Rotondi, D. Towards a Definition of the Internet of Things (IoT) [Электронный ресурс]. – IEEE Internet Initiative, 2015. – Режим доступа: <https://iot.ieee.org/definition.html> (дата звернення: 09.07.2025).
- 98.Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. The Internet of Things: A survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, № 15. – P. 2787–2805. – DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

99. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29, № 7. – P. 1645–1660. – DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
100. Cisco. The Internet of Things Reference Model [Електронний ресурс]. – Cisco White Paper, 2014. – Режим доступу: <https://www.cisco.com/c/en/us/about/press/internet-protocol-journal/blogs/201404.html> (дата звернення: 09.07.2025).
101. International Energy Agency (IEA). Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ukraine-real-time-electricity-data-explorer> (дата звернення: 12.07.2025).
102. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. John Wiley & Sons, 2011.
103. Iskra-energy.com. Проектування сонячних електростанцій (типовий проект). [Електронний ресурс]. URL: <https://iskra-energy.com/proektuvannya-sonyachnih-elektrostantsij-tipovij-proekt/> (дата звернення: 20.05.2024).
104. Кузаченко, Є. Р. Система прогнозованого керування відбором енергії від сонячної електростанції. Магістерська дисертація. НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018. [Електронний ресурс]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323530049.pdf> (дата звернення: 20.05.2024).
105. Кривенко, О.В., Сингаївська, О.І. Оптимізація процесу проектування висотних будівель з інтегрованими геліосистемами. Містобудування та територіальне планування. 2022. №81. С. 208-218. [Електронний ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/684b/561990b249d1d1f69861b2567a3ac5f08e6f.pdf> (дата звернення: 20.05.2024).
106. RENECO. Побудова тривимірної моделі об'єкта в PVsyst. [Відео]. YouTube. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0YIugFuycIs> (дата звернення: 20.05.2024).
107. BIMobject. Revit Електричні - Solar Panels. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.bimobject.com/uk/categories/electrical/solar-panels?software=revit> (дата звернення: 20.05.2024).
108. Eclipse Foundation. Eclipse Ditto Documentation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eclipse.org/ditto/>
109. FIWARE Foundation. FIWARE for Smart Industry. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fiware.org/>
110. BuildingSMART International. IFC Overview. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.buildingsmart.org/>
111. Balaji, B., et al. Brick: Towards a Unified Metadata Schema for Buildings. Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments, 2016.
112. International Telecommunication Union. ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of things [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу:

- <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en> (дата звернення: 09.07.2025).
113. European Commission. Digital Single Market: Internet of Things [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/internet-things> (дата звернення: 09.07.2025).
  114. Gartner. Hype Cycle for the Internet of Things [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.gartner.com/en/documents/4000003/hype-cycle-for-the-internet-of-things-2023> (дата звернення: 09.07.2025).
  115. IEEE Standard for Smart Energy Profile Application Protocol, IEEE Std 2030.5-2018.
  116. ДСТУ EN 61850-7-420:2013. Інтеграція розподілених енергоресурсів у Smart Grid.
  117. Statista. Number of connected devices worldwide 2015–2025 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (дата звернення: 09.07.2025).
  118. McKinsey & Company. The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world> (дата звернення: 09.07.2025).
  119. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) – Reference architecture [Електронний ресурс]. – Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/65695.html> (дата звернення: 09.07.2025).
  120. MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01. OASIS Standard.
  121. Mahmud, K., et al. (2018). Fog Computing for Smart Grid Systems: State-of-the-Art and Research Directions. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(10), 4674–4685.
  122. ISO/IEC 20924:2018. Information technology – Internet of Things (IoT) – Vocabulary [Електронний ресурс]. – Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/69470.html> (дата звернення: 09.07.2025).
  123. LoRa Alliance. What is LoRaWAN? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/> (дата звернення: 09.07.2025).
  124. Sigfox. Sigfox Technology Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview> (дата звернення: 09.07.2025).
  125. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61850 Communication networks and systems for power utility automation. — Geneva : IEC, 2013–2022. — (Parts 1–10). — ISSN 1683-6656.
  126. Мальцев Д. В. Цифрові підстанції на базі стандарту IEC 61850 / Д. В. Мальцев, І. М. Соколов // Електротехніка і електромеханіка. — 2021. — № 3. — С. 34–39. — ISSN 1607-7970.
  127. Ковальчук О. Ю. Інформаційні протоколи в цифрових підстанціях: реалізація IEC 61850 / О. Ю. Ковальчук // Вісник Кременчуцького

- національного університету ім. М. Остроградського. — 2022. — № 1/2022 (132). — С. 57–64. — ISSN 2072-8263.
128. Селютін А. А. ІЕС 61850 – цифрова модель підстанцій майбутнього / А. А. Селютін, В. О. Павлов // Технічна електродинаміка. — 2020. — № 5. — С. 45–52. — DOI: 10.15407/techned2020.05.045
129. International Electrotechnical Commission. (2020). ІЕС 62351: Power systems management and associated information exchange – Data and communications security. Geneva: ІЕС.
130. Міжнародний стандарт ІЕС 62351-9:2023 «Управління енергосистемами та пов'язаний з ними обмін інформацією. Безпека даних і комунікацій. Частина 9. Управління ключами кібербезпеки обладнання енергосистем» // Введено в дію в Україні. — Київ, 2023. — 296 с.
131. Міжнародний стандарт ІЕЕЕ 1547:2018 «Взаємозв'язок та взаємодія розподілених енергоресурсів з відповідними інтерфейсами електроенергетичних систем» — 2018. — [електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html> (дата звернення: 12.07.2025).
132. Національний інститут стандартів і технологій (NIST). Платформа кібербезпеки критично важливих інфраструктур (CPS Framework). Версія 1.1. — 16 квітня 2018. — [електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.04162018uk> (дата звернення: 12.07.2025).
133. ПАТ «Укргідроенерго». Пілотна мікромережа: комплексна система Smart Grid на базі ІЕС 61850 із захистом ІЕС 62351 (2024) // Офіційний сайт ПАТ «Укргідроенерго». — Київ, 2024. — [електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/novyny/ihor-syrota-pershe-pivrichchya-2024-ho-ukrhydroenerho-proyshlo-z-seryoznuyu](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/ihor-syrota-pershe-pivrichchya-2024-ho-ukrhydroenerho-proyshlo-z-seryoznuyu) (дата звернення: 12.07.2025).
134. Mosquera A., Proaño R., Vallejo C., Gamboa S., Rodas A. Retrofit to IEC 61850 of a Line-Bay in Transmission Substation. Case Study: INGA1/SE Pomasqui // Applied Technologies. ICAT 2019. Communications in Computer and Information Science. — Cham : Springer, 2020. — Vol. 1195. — P. 153–165. — DOI: 10.1007/978-3-030-42531-9\_13.
135. Про затвердження титулу будови "Реконструкція зовнішнього електропостачання (підстанція 110/10 кВ, кабельні мережі 110 кВ)" державного підприємства "Міжнародний аеропорт "Бориспіль" : розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 червня 2010 р. № 1278-р. — Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/243535646> (дата звернення: 21.04.2025).
136. J. Torriti, Demand Side Management for the European Supergrid Архивная копия от 21 января 2016 на Wayback Machine Energy Policy, vol. 44, pp. 199–206, 2012.
137. Smart Grids European Technology Platform [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.smartgrids.eu> (останнє оновлення: 2011). — Дата звернення: 11 жовтня 2011. — Архівовано 3 жовтня 2011 року.

138. U.S. Department of Energy. Smart Grid / Department of Energy [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid> (дата звернення: 18 червня 2012). — Архівовано 15 червня 2012 року.
139. Архітектура та типи систем SCADA з додатками [Електронний ресурс] / FMUSER. — 2021. — Режим доступу: <https://uk.fmuser.net/content/?15407.html> (дата звернення: 12.07.2025).
140. SCADA для енергетики [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/scada-dlya-energetiki> (дата звернення: 12.07.2025).
141. GE Power. GE Power Launches 1st of its kind Solution to Support Tata Power-DDL's Efforts to Modernize Delhi's Electric Grid [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.governova.com/grid-solutions/press/gepress/ge-solution-modernize-delhi-elec-grid.htm> (дата звернення: 21.04.2025).
142. Інноваційна реконструкція електросистем з інтеграцією Smart Grid та відновлюваної енергетики у Дніпровській політехніці [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://eds-engineering.com/novosti/nnovaczjna-rekonstrukczyaelektrosis-tem-z-ntegraczyu-smart-grid-ta-vdnovlyuvano-energetiki-u-dnprovskj-poltexncz?utm\\_source](https://eds-engineering.com/novosti/nnovaczjna-rekonstrukczyaelektrosis-tem-z-ntegraczyu-smart-grid-ta-vdnovlyuvano-energetiki-u-dnprovskj-poltexncz?utm_source) (дата звернення: 12.07.2025).
143. Впровадження інтелектуальних систем Smart Grid є критично необхідним — В. О. генерального директора АТ «Хмельницькобленерго» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://e-b.com.ua/vprovadzennya-intelektualnix-sistem-smart-grid-je-kriticno-neobxidnimi-vo-generalnogo-direktora-at-xmelnickoblenergo-6449?utm\\_source](https://e-b.com.ua/vprovadzennya-intelektualnix-sistem-smart-grid-je-kriticno-neobxidnimi-vo-generalnogo-direktora-at-xmelnickoblenergo-6449?utm_source) (дата звернення: 12.07.2025).
144. Концепція Smart Grid та поточний стан впровадження в Україні [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://expro.com.ua/statti/white-paper-konceptsa-smart-grid-ta-potoch-niy-stan-vprovadjennya-v-ukran?utm\\_source](https://expro.com.ua/statti/white-paper-konceptsa-smart-grid-ta-potoch-niy-stan-vprovadjennya-v-ukran?utm_source) (дата звернення: 12.07.2025).