

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

**Дослідження впливу інтегрованої системи теплозабезпечення та
сонячної генерації на енергетичну автономність навчального
закладу**

**Research on the impact of an integrated heat supply and solar
generation system on the energy autonomy of an educational
institution**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-24М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр ПУСТОВИЙ
« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
« ____ » _____ 2025 р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Пleshков П.Г.

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ Пустового Олександра Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження впливу інтегрованої системи теплозабезпечення та сонячної генерації на енергетичну автономність навчального закладу *Research on the impact of an integrated heat supply and solar generation system on the energy autonomy of an educational institution*

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 10.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Метою роботи є підвищення рівня енергетичної автономності навчального закладу шляхом обґрунтування та розробки інтегрованої системи, що складається з дахової сонячної електростанції (СЕС) та фотогальванічної системи гарячого водопостачання. Для досягнення мети поставлено такі задачі: Проаналізувати існуючий стан енергоспоживання об'єкта на основі даних енергетичного аудиту. Обґрунтувати параметри та конфігурацію трьох дахових сонячних станцій сумарною потужністю 90 кВт. Здійснити моделювання енергетичного балансу та оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих рішень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>10.10.25</i>	
2	<i>Аналіз сучасного стану енергозабезпечення навчальних закладів та перспективи використання відновлюваних джерел енергії</i>	<i>16.10.25</i>	
3	<i>Енергетичний аудит та дослідження режимів споживання об'єкта</i>	<i>20.10.25</i>	
4	<i>Розробка та розрахунок інтегрованої системи енергозабезпечення навчального закладу</i>	<i>06.11.25</i>	
5	<i>Дослідження ефективності та моделювання режимів роботи системи</i>	<i>15.11.25</i>	
6	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>20.11.25</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>22.11.25</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	<i>08.12.25</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Пустовий О.О. Дослідження впливу інтегрованої системи теплозабезпечення та сонячної генерації на енергетичну автономність навчального закладу

Research on the impact of an integrated heat supply and solar generation system on the energy autonomy of an educational institution.

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Енергетичний менеджмент». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2025 р.

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення енергетичної автономності та енергоефективності громадських будівель в умовах нестабільності енергосистеми України. Об'єктом дослідження є система енергозабезпечення основного корпусу комунального закладу «НВО ЗНЗ I-III ступенів № 16» у м. Кропивницький.

В роботі проаналізовано добові та сезонні графіки електричного навантаження закладу, виявлено пікові періоди споживання та оцінено потенціал сонячної генерації регіону. Обґрунтовано впровадження гібридної сонячної електростанції (СЕС) загальною потужністю 90 кВт, побудованої за топологією DC-coupled на базі трьох гібридних інверторів.

Для підвищення коефіцієнта власного споживання та забезпечення безперебійного живлення розроблено комбіновану систему акумуляції, яка включає електрохімічний накопичувач (BESS) на основі літій-залізо-фосфатних батарей ємністю 40,96 кВт·год та систему фотоелектричного нагріву води (PV-heating) з баками-акумуляторами об'ємом 600 л.

За результатами моделювання встановлено, що запропонована система здатна генерувати 114,1 МВт·год електроенергії на рік,

забезпечуючи середньорічний рівень енергетичної автономності (SSR) на рівні 70–75%. Система гарантує автономну роботу критичних споживачів (насоси ІТП, серверна, укриття) протягом мінімум 4,4 годин під час аварійних відключень. Розрахунковий термін окупності проекту становить 6,6 року, а зниження викидів CO_2 — 16,5 тонн/рік.

ЕНЕРГЕТИЧНА АВТОНОМНІСТЬ, ГІБРИДНА СЕС,
АКУМУЛЯЦІЯ ЕНЕРГІЇ, BESS, PV-HEATING, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ,
НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД.

ABSTRACT

Pustovoy O. Research on the impact of an integrated heat supply and solar generation system on the energy autonomy of an educational institution.

Дослідження впливу інтегрованої системи теплозабезпечення та сонячної генерації на енергетичну автономність навчального закладу

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP " Energy Management ". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2025.

The Master's thesis is devoted to solving the urgent problem of increasing the energy autonomy and energy efficiency of public buildings in the conditions of instability of the Ukrainian energy system. The object of the study is the power supply system of the main building of the communal institution "Educational Complex Secondary School I-III degrees No. 16" in Kropyvnytskyi.

The daily and seasonal electrical load profiles of the institution were analyzed, peak consumption periods were identified, and the solar generation potential of the region was assessed. The implementation of a hybrid solar power plant (PV) with a total capacity of 90 kW, built on a DC-coupled topology based on three hybrid inverters, is substantiated.

To increase the self-consumption ratio and ensure uninterrupted power supply, a combined storage system has been developed, which includes a Battery Energy Storage System (BESS) based on LiFePO₄ batteries with a capacity of 40.96 kWh and a photovoltaic water heating system (PV-heating) with storage tanks of 600 liters volume.

According to the simulation results, the proposed system is capable of generating 114.1 MWh of electricity per year, providing an average annual level of energy autonomy (SSR) at the level of 70–75%. The system guarantees autonomous operation of critical loads (heating pumps, server room, shelter) for at least 4.4 hours during blackouts. The estimated payback period of the project is 6.6 years, and the reduction of \$CO_2\$ emissions is 16.5 tons/year.

KEYWORDS: ENERGY AUTONOMY, HYBRID PV SYSTEM, ENERGY STORAGE, BESS, PV-HEATING, ENERGY EFFICIENCY, EDUCATIONAL INSTITUTION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	13
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	16
1.1 Характеристика типових схем енергопостачання навчальних закладів та структура енергоспоживання	16
1.2 Аналіз потенціалу сонячної енергетики в регіоні розташування об'єкту	19
1.3 Огляд існуючих інтегрованих систем	22
1.4 Поняття енергетичної автономності та система критеріїв її оцінювання.....	24
1.4.1. Показники енергетичного балансу	24
1.4.2. Показники надійності електропостачання.....	25
1.4.3. Критерії взаємодії з мережею	26
1.4.4. Техніко-економічні та екологічні критерії	26
1.5 Постановка задач дослідження	27
Висновки до розділу 1.....	28
2. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТА.....	30
2.1 Загальна технічна характеристика основного корпусу навчального закладу	30
2.1.2. Характеристика огорожувальних конструкцій та теплотехнічний стан.....	32
2.1.3. Кліматичні умови майданчика будівництва.....	33
2.1.4. Інженерні мережі та категорійність електропостачання.....	34
2.2 Аналіз структури встановленої електричної потужності та категорійності електроприймачів	35

2.2.1. Категорійність електропостачання та групи надійності	35
2.2.2. Структура встановленої потужності	36
2.2.3. Коефіцієнт попиту та розрахункова потужність.....	38
2.3 Побудова та аналіз добових графіків електричного навантаження	39
2.3.1. Робота закладу в опалювальний період	39
2.3.2. Робота закладу весняно-осінній період.....	40
2.3.3. Робота закладу в літній період.....	41
2.3.4. Аналіз розрахункових навантажень	41
2.4 Характеристика системи теплозабезпечення та режимів споживання гарячої води	42
2.4.1. Аналіз існуючого стану системи теплозабезпечення	42
2.4.2. Розрахунок профілю споживання гарячої води	43
2.4.3. Графік навантаження на систему ГВП.....	44
2.5.1. Порівняльний аналіз спеціалізованого програмного забезпечення.....	46
2.5.2. Математичні моделі енергетичних процесів	47
Висновки до розділу 2.....	49
3. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ	50
3.1 Обґрунтування структурної схеми гібридної системи енергопостачання	50
3.1.1. Вибір топології системи	50
3.1.2. Опис функціональної схеми.....	51
3.1.3. Алгоритми роботи системи	52
3.2. Розрахунок та вибір основного обладнання сонячної електростанції.....	53
3.2.1. Вибір фотоелектричних модулів та моделювання їх розміщення на покрівлі	53
3.2.2. Вибір інверторного обладнання та конфігурація стрінгів	55

3.2 Розрахунок параметрів системи накопичення електричної енергії.....	57
3.4. Розробка системи фотоелектричного нагріву води.....	59
3.5. Розробка принципової електричної схеми підключення та вибір захисно-комутаційної апаратури.....	60
3.6. Організація системи моніторингу та керування потоками енергії..	61
Висновки до розділу 3.....	63
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	64
4.1 Моделювання енергетичного балансу «Генерація – Споживання».....	64
4.1.1. Прогноз генерації фотоелектричної системи.....	64
4.1.2. Баланс потужності по сезонах.....	65
4.2 Оцінка рівня енергетичної автономності закладу.....	65
4.3 Техніко-економічне обґрунтування проєкту.....	66
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	69
5.1. Ідентифікація та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.....	69
5.2. Заходи електробезпеки.....	70
5.3. Розрахунок та влаштування блискавкозахисту.....	71
5.4. Організація безпеки робіт на висоті.....	74
5.5. Пожежна безпека та дії у надзвичайних ситуаціях.....	75
Висновки до розділу 5.....	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АКБ — Акумуляторна батарея
- АСКОЕ — Автоматизована система комерційного обліку електроенергії
- ВДЕ — Відновлювані джерела енергії
- ВРП — Ввідно-розподільчий пристрій
- ГЗШ — Головна заземлювальна шина
- ГВП — Гаряче водопостачання
- ДБН — Державні будівельні норми
- ДСТУ — Державний стандарт України
- ЗНЗ — Загальноосвітній навчальний заклад
- ІТП — Індивідуальний тепловий пункт
- ККД — Коефіцієнт корисної дії
- НПАОП — Нормативно-правовий акт з охорони праці
- ПЗВ — Пристрій захисного відключення
- ПЗІП — Пристрій захисту від імпульсних перенапруг
- ПУЕ — Правила улаштування електроустановок
- СБЗ — Система блискавкозахисту
- СЕС — Сонячна електростанція
- ТЕН — Трубчастий електронагрівник
- ФЕМ — Фотоелектричний модуль
- AC (Alternating Current) — Змінний струм
- BESS (Battery Energy Storage System) — Система накопичення електричної енергії
- CAPEX (Capital Expenditure) — Капітальні витрати
- DC (Direct Current) — Постійний струм
- DOD (Depth of Discharge) — Глибина розряду акумулятора
- EMS (Energy Management System) — Система енергетичного менеджменту
- HV (High Voltage) — Висока напруга
- LCOE (Levelized Cost of Energy) — Нормована вартість електроенергії

LFP (Lithium Iron Phosphate) — Літій-залізо-фосфатний (тип хімії акумулятора)

LPSP (Loss of Power Supply Probability) — Ймовірність втрати енергопостачання

MPPT (Maximum Power Point Tracking) — Технологія відстеження точки максимальної потужності

NPV (Net Present Value) — Чиста приведена вартість

PV (Photovoltaic) — Фотоелектричний

PV-heating — Технологія нагріву води за допомогою фотоелектричної енергії

SCR (Self-Consumption Ratio) — Коефіцієнт власного споживання

SPD (Surge Protection Device) — Пристрій захисту від перенапруг

SSR (Self-Sufficiency Ratio) — Коефіцієнт самозабезпечення (автономності)

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення енергетичної автономності та підвищення енергоефективності громадських будівель, зокрема навчальних закладів, є критично важливим завданням в умовах нестабільності енергоринку України та зростання тарифів на енергоносії. Сучасні тенденції розвитку енергетики передбачають перехід до розподіленої генерації та інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в існуючі інженерні мережі будівель.

Для навчальних закладів, режим роботи яких характеризується чітким графіком споживання, використання сонячної енергії є найбільш перспективним напрямком. Однак, простого встановлення сонячних панелей недостатньо — необхідний комплексний підхід, що поєднує генерацію електричної енергії та модернізацію систем теплозабезпечення і гарячого водопостачання (ГВП).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконується в рамках національної стратегії енергоефективності та відповідає заходам, рекомендованим у звіті з енергетичного аудиту об'єкта дослідження щодо заміни електричних водопідігрівачів на системи сонячних колекторів та модернізації системи електропостачання.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення рівня енергетичної автономності навчального закладу шляхом обґрунтування та розробки інтегрованої системи, що складається з дахової сонячної електростанції (СЕС) та фотогальванічної системи гарячого водопостачання.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

Проаналізувати існуючий стан енергоспоживання об'єкта на основі даних енергетичного аудиту.

Обґрунтувати параметри та конфігурацію трьох дахових сонячних станцій сумарною потужністю 90 кВт.

Розробити схему заміни існуючих електричних бойлерів на фотогальванічні системи нагріву води загальним об'ємом 600 л.

Здійснити моделювання енергетичного балансу та оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження. Процеси енергоспоживання та генерації енергії в системі електро- та теплопостачання комунального закладу «Навчально-виховне об'єднання «ЗНЗ I-III ступенів № 16 – дитячий юнацький центр «Лідер»» (м. Кропивницький). Заклад складається з основного корпусу (побудованого у 1973 р.) та корпусу початкової школи (1993 р.).

Предмет дослідження. Вплив інтегрованої системи сонячної генерації та акумуляції тепла на показники енергоефективності та автономності навчального закладу.

Аналіз графіків електроспоживання за 2023-2025 роки демонструє виражену сезонність із піками у зимові місяці до 6000-7500 кВт·год/міс та спадом у літній період до 500-1000 кВт·год/міс. Значну частку в силовому навантаженні становить технологічне обладнання харчоблоку.

Система гарячого водопостачання (ГВП) закладу наразі є децентралізованою та енерговитратною: приготування гарячої води здійснюється за допомогою електричних бойлерів (загальна кількість — 3 шт. в основному корпусі). У звіті рекомендовано заміну цих приладів на системи сонячних колекторів, що підтверджує доцільність впровадження запропонованої в роботі фотогальванічної системи нагріву води об'ємом 600 л.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці алгоритму керування перетоками енергії в інтегрованій системі «СЕС – ГВП – Мережа» для навчальних закладів з врахуванням нерівномірності

графіків навантаження (канікули, вихідні) та пріоритетності власного споживання.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані технічні рішення дозволять замістити значну частину споживання електроенергії з мережі власною генерацією (90 кВт встановленої потужності), забезпечити заклад гарячою водою в міжопалювальний період за рахунок сонця та підвищити клас енергоефективності будівлі, який для основного корпусу наразі визначено як «В», а для початкової школи — «F».

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Кваліфікаційна магістерська робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та переліку використаних інформаційних джерел (20 найменувань). Загальний обсяг дослідження становить 82 сторінку, включаючи 5 ілюстративних матеріалів та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

1.1 Характеристика типових схем енергопостачання навчальних закладів та структура енергоспоживання

Більшість навчальних закладів України, що експлуатуються на сьогодні, були спроектовані та збудовані в період 1960–1990 років за нормативами, які не передбачали жорстких вимог до енергоефективності. Типовою схемою енергозабезпечення таких об'єктів є повна залежність від централізованих мереж: теплопостачання здійснюється від міських ТЕЦ або районних котелень, а електропостачання — від зовнішніх трансформаторних підстанцій.

Об'єкт дослідження — комунальний заклад «Навчально-виховне об'єднання «ЗНЗ I-III ступенів № 16 – дитячий юнацький центр «Лідер»» у м. Кропивницький, є характерним представником такої забудови. Основний корпус школи введено в експлуатацію у 1973 році. Аналіз інженерних систем закладу дозволяє виділити наступні характеристики, типові для сектору:

Система теплопостачання: Будівля підключена до централізованих теплових мереж (постачальник КП «Теплоенергетик»). Внутрішня система опалення — двотрубна, з використанням чавунних радіаторів М-140, без засобів автоматичного регулювання. Це призводить до інерційності системи: неможливість оперативно зменшувати подачу тепла у сонячні дні або вихідні спричиняє «перетопи» та нераціональні втрати енергії. Середнє річне споживання теплової енергії основним корпусом становить 428,44 Гкал.

Система електропостачання: Здійснюється від мережі 0,4 кВ і належить до II категорії надійності. Це означає, що при аварійних відключеннях заклад залишається без напруги, що критично для роботи насосної групи індивідуального теплового пункту (ІТП), систем безпеки та навчального процесу.

Система гарячого водопостачання (ГВП): Централізоване ГВП відсутнє. Нагрів води здійснюється локально за допомогою трьох електричних бойлерів, що значно збільшує навантаження на електричну мережу.

Структура енергоспоживання навчального закладу має яскраво виражену сезонність та добову нерівномірність. Лівову частку в енергетичному балансі (близько 75-80%) складає тепла енергія для опалення, споживання якої припадає на період з жовтня по квітень. Електрична енергія використовується для освітлення, роботи технологічного обладнання їдальні, комп'ютерної техніки та нагріву води.

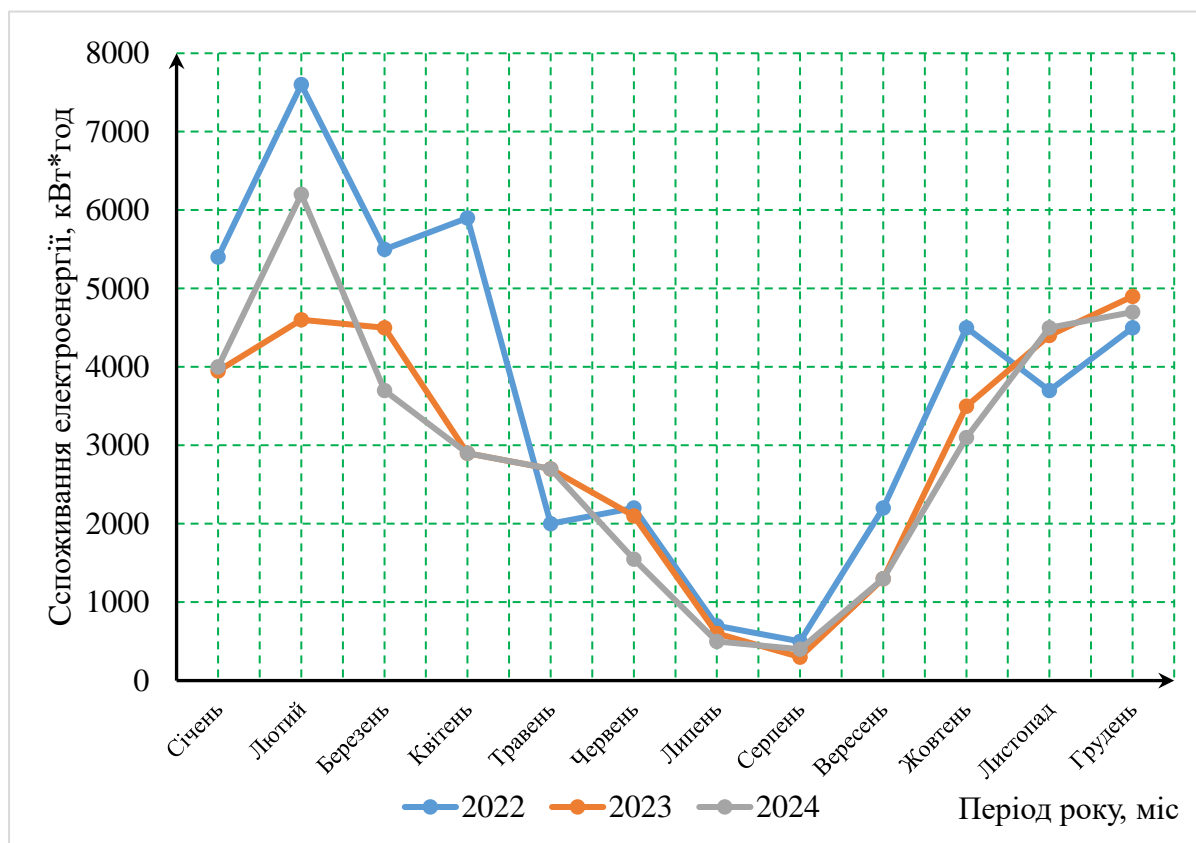


Рис. 1.1. – Споживання електричної енергії в закладі по роках

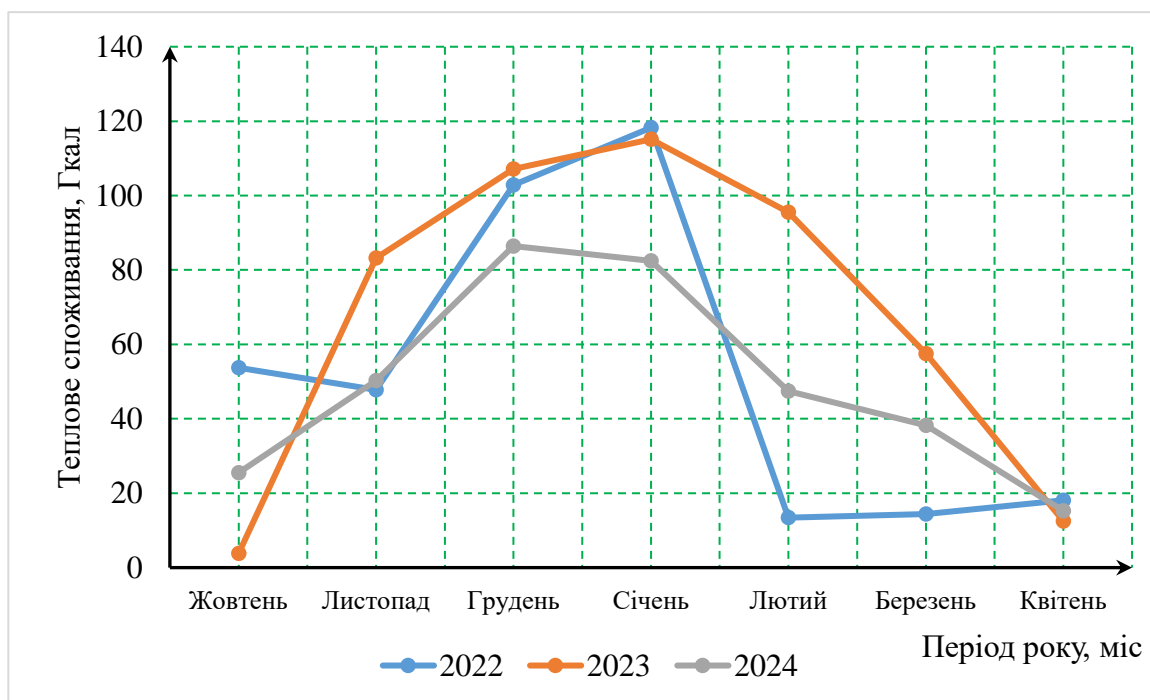


Рис. 1.2. – Споживання теплової енергії в закладі по роках

Аналіз графіків споживання, наведених на рис. 1.1-1.3 показує:

Зимовий максимум: Споживання електроенергії сягає пікових значень (6000–7500 кВт·год/міс) у грудні-січні через коротку тривалість світлового дня (максимальне використання освітлення) та інтенсивну роботу харчоблоку. Літній мінімум: У липні-серпні споживання падає до 500–1000 кВт·год/міс, обмежуючись роботою чергового освітлення та холодильного обладнання.

Важливою особливістю є добовий графік навантаження. У робочі дні спостерігається пікове навантаження з 08:00 до 12:00, зумовлене одночасною роботою електроплит харчоблоку (встановлена потужність 24 кВт), освітлення (~20 кВт) та комп'ютерної техніки (~27 кВт). Після 16:00 та у вихідні дні споживання знижується до мінімуму (чергове освітлення, сервери, холодильники). Така нерівномірність створює виклик для інтеграції сонячних станцій: пік генерації СЕС (літо, полудень) часто не співпадає з графіком споживання школи (зима, ранок).

1.2 Аналіз потенціалу сонячної енергетики в регіоні розташування об'єкту

Ефективність впровадження систем відновлюваної енергетики прямо залежить від кліматичних умов регіону. Місто Кропивницький (Кіровоградська область) розташоване в центральній частині України, яка характеризується сприятливим рівнем інсоляції для розвитку сонячної енергетики.

Згідно з даними метеорологічних спостережень та баз даних (наприклад, PVGIS, NASA Power), середньорічна сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню в регіоні становить близько 1180–1250 кВт·год/м². Розподіл сонячної енергії протягом року є нерівномірним:

Літній період (травень–серпень): Характеризується максимальною генерацією. Середньоденна інсоляція досягає 5–6 кВт·год/м². У цей час сонячна станція працює з максимальною віддачею, часто перевищуючи власні потреби об'єкта.

Зимовий період (листопад–січень): Рівень інсоляції знижується до 0,8–1,5 кВт·год/м² на добу. Це зумовлено короткою тривалістю світлового дня, низьким кутом стояння сонця та високою хмарністю. У цей період генерація СЕС може падати в 5–10 разів порівняно з літніми показниками.

Для навчального закладу, основний період активності якого припадає саме на осінньо-зимово-весняний сезон, критично важливим є оптимізація кута нахилу фотоелектричних модулів (ФЕМ). Для цілорічної генерації оптимальним кутом для Кропивницького вважається 30–35°. Основний корпус школи №16 має скатний дах, вкритий металочерепицею, з орієнтацією скатів, що дозволяє розмістити панелі на південній стороні під кутом близько 35°. Це є близьким до ідеального значення для максимізації річного виробітку.

Факторами, що можуть обмежувати потенціал генерації на

конкретному об'єкті, є затінення від інженерних конструкцій. На даху школи наявні вентиляційні канали та слухові вікна, які створюють локальні зони затінення. При проектуванні СЕС необхідно враховувати ці перешкоди, використовуючи оптимізатори потужності або грамотне розташування стрінгів, щоб уникнути суттєвого падіння генерації всієї системи.

Для оцінки сонячного потенціалу м. Кропивницький використано середньобагаторічні кліматичні дані для центральної частини України.

Річна глобальна горизонтальна інсоляція приймається:

$$H_{\text{річ}} = 1150 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$$

Коефіцієнт втрат у фотоелектричній системі $P_R = 0,75$

Річна генерація електроенергії від сонячної електростанції, приведена до 1 кВт встановленої потужності, визначається за формулою:

$$E_{\text{річ,1кВт}} = H_{\text{річ}} \cdot P_R$$

де, $E_{\text{річ,1кВт}}$ – річний виробіток електроенергії з 1 кВт встановленої потужності, кВт·год/рік; $H_{\text{річ}}$ – річна інсоляція на площину фотомодулів, кВт·год/м²·рік; P_R – коефіцієнт урахування втрат у фотоелектричній системі.

Підставляючи значення, отримаємо:

$$E_{\text{річ,1кВт}} = 1150 \cdot 0,75 = 862,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$$

3. Розподіл річної генерації за місяцями

Місячна генерація електроенергії визначається за формулою:

$$E_{\text{м}} = E_{\text{річ,1кВт}} \cdot f_{\text{м}} / 100$$

де, E_m – генерація електроенергії у m -му місяці, кВт·год; f_m – частка місячної генерації від річної, %.

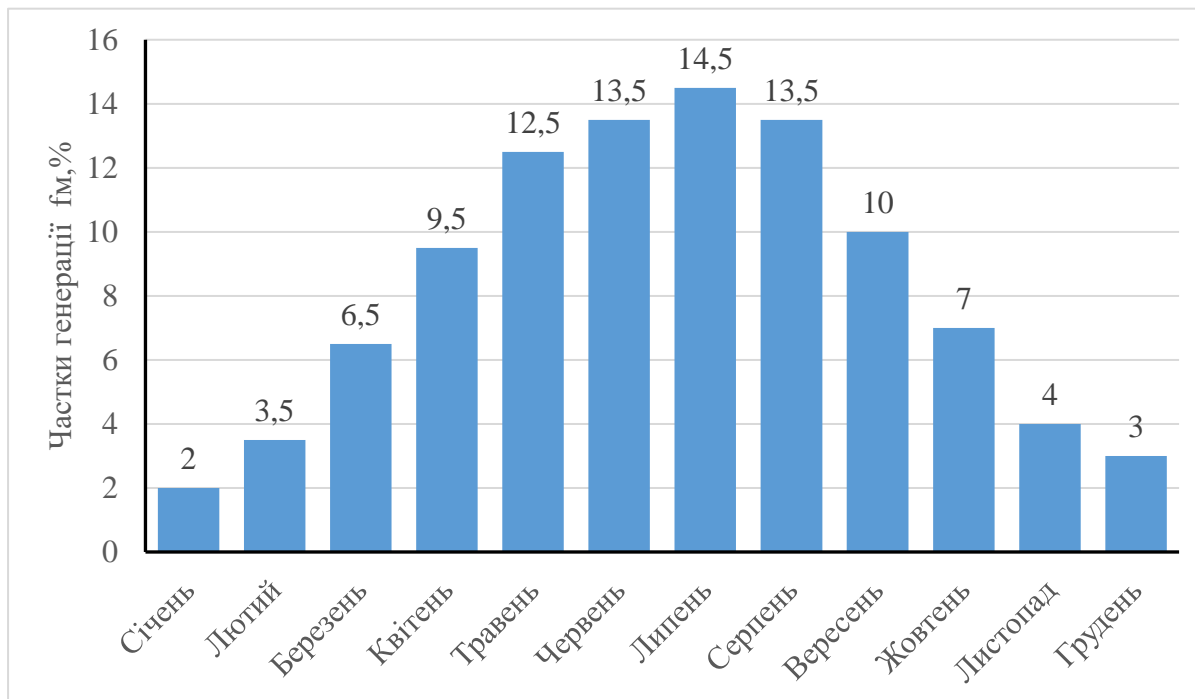


Рис. 1.3 - Прийняті середньомісячні частки генерації для умов центрального регіону України:

Для сонячної електростанції з установленою потужністю $P_{\text{СЕС}}$ місячна генерація визначається:

$$E_{m,\text{СЕС}} = E_m \cdot P_{\text{СЕС}}$$

де, $P_{\text{СЕС}}$ – встановлена потужність сонячної електростанції, кВт.

Для СЕС потужністю 90 кВт у липні:

$$E_{\text{липень}} = 125,0 \cdot 90 = 11\,250 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Середньодобова генерація у m -му місяці визначається за формулою:

$$E_{\text{доба}} = E_m / N_m$$

де, N_m – кількість днів у відповідному місяці.

Звідки, для липня (31 доба) середньодобова генерація:

$E_{\text{доба}} = 125,0 / 31 \approx 4,03$ кВт·год/добу на 1 кВт встановленої потужності

Результати прогнозу генерації від 1 кВт встановленої потужності сонячної панелі наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Прогноз генерації від 1 кВт встановленої потужності сонячної панелі

Місяць	f_m , %	(E_{min}), кВт·год	(E_{max}), кВт·год
Січень	2,0	17.3	19.5
Лютий	3,5	30.2	34.1
Березень	6,5	56.0	63.4
Квітень	9,5	81.9	92.6
Травень	12,5	107.8	121.9
Червень	13,5	116.4	131.6
Липень	14,5	125.0	141.4
Серпень	13,5	116.4	131.6
Вересень	10,0	86.3	97.5
Жовтень	7,0	60.4	68.3
Листопад	4,0	34.5	39.0
Грудень	3,0	25.9	29.3
Разом/рік	100	862.5	975.0

1.3 Огляд існуючих інтегрованих систем

В умовах, коли пік генерації сонячної енергії (літо) співпадає з періодом мінімального споживання електроенергії школою (канікули), виникає проблема надлишкової генерації. Традиційні шляхи її вирішення — продаж у мережу (за «Зеленим тарифом» або механізмом Net Billing) або акумулювання в хімічних джерелах струму (АКБ). Проте, продаж енергії має бюрократичні обмеження для бюджетних установ, а вартість АКБ

великої ємності є високою.

Альтернативним та економічно доцільним рішенням є концепція Power-to-Heat (P2H) — перетворення надлишкової електричної енергії в теплову, яка може бути акумульована та використана пізніше. Для навчальних закладів найбільш актуальним застосуванням P2H є системи гарячого водопостачання (ГВП).

Існує дві основні технології використання сонячної енергії для нагріву води:

Сонячні колектори нагрівають теплоносій безпосередньо від сонячного випромінювання. Мають високий ККД (до 80% влітку), але складні в монтажі (потребують трубопроводів, насосних станцій) та обслуговуванні (проблема закипання влітку та замерзання взимку).

Фотоелектричні системи нагріву води (PV-heating) використовують електроенергію від сонячних панелей для живлення ТЕНів у баках-накопичувачах.

Для умов школи №16, де система ГВП децентралізована і базується на електричних бойлерах, технологія PV-heating є пріоритетною. Вона має ряд переваг:

Не потрібно прокладати труби з теплоносієм через всю будівлю, достатньо електричного кабелю. Можна використовувати існуючі баки, замінивши або доповнивши ТЕНи спеціальними контролерами.

Фотоелектричні панелі працюють навіть при мінусових температурах, тоді як ефективність геліоколекторів взимку різко падає через тепловтрати.

Влітку, коли школа зачинена і розбору води немає, система просто припиняє нагрів (розмикає коло), тоді як геліоколектори можуть перегрітися і вийти з ладу.

Інтегрована система передбачає пріоритезацію потоків енергії: спочатку енергія від СЕС йде на покриття поточних потреб (освітлення, комп'ютери), а надлишки спрямовуються на нагрів води в акумулюючих

баках. Лише після нагріву води до заданої температури енергія може бути спрямована на заряд АКБ. Це дозволяє використовувати бойлери як «теплові акумулятори», вартість зберігання енергії в яких значно нижча, ніж у літєвих батареях.

1.4 Поняття енергетичної автономності та система критеріїв її оцінювання

В сучасній енергетиці під енергетичною автономністю розуміють здатність локальної системи енергопостачання (Microgrid) задовольняти попит споживачів на енергію за рахунок внутрішніх джерел генерації та систем накопичення, мінімізуючи або повністю виключаючи споживання із зовнішньої мережі.

Для навчального закладу, що інтегрує сонячну генерацію та системи акумуляції, поняття автономності доцільно розглядати у трьох вимірах:

1. Енергетичний баланс: Співвідношення між виробленою та спожитою енергією на інтервалі часу (доба, місяць, рік).
2. Режимна надійність: Здатність системи покривати пікові навантаження та пускові струми без просадок напруги, особливо в режимі «острівної» роботи (Islanding).
3. Часова доступність: Тривалість роботи критично важливого обладнання (насоси ІТП, сервери, аварійне освітлення) за відсутності зовнішнього живлення.

Для комплексної оцінки ефективності проєктованої системи пропонується використовувати наступну систему критеріїв.

1.4.1. Показники енергетичного балансу

Базовими індикаторами ефективності використання ВДЕ є коефіцієнти самозабезпечення та власного споживання.

Коефіцієнт самозабезпечення (SSR) визначає частку електроенергії, спожитої навантаженням безпосередньо від сонячної станції або акумуляторів, відносно загального споживання об'єкта:

$$SSR = \frac{E_{PV \rightarrow Load} + E_{bat \rightarrow Load}}{E_{Total_Load}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $E_{PV \rightarrow Load}$ — енергія від СЕС, спожита миттєво; $E_{bat \rightarrow Load}$ — енергія, спожита з акумуляторів; E_{Total_Load} — повне споживання закладу.

Для шкіл цей показник сильно варіюється залежно від сезону (високий влітку, низький взимку).

Коефіцієнт власного споживання (SCR)

Характеризує, яка частина згенерованої сонячної енергії була корисно використана всередині об'єкта (в т.ч. на заряд АКБ та нагрів води), а не віддана в мережу.

$$SCR = \frac{E_{gen} - E_{grid_export}}{E_{gen}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де E_{gen} — загальна генерація СЕС; E_{grid_export} — енергія, продана/віддана в зовнішню мережу.

Оптимізація за показником SCR є пріоритетною задачею при неможливості продажу надлишків за «Зеленим тарифом».

1.4.2. Показники надійності електропостачання

Оскільки проєктована система містить акумуляторні батареї та передбачає роботу в аварійних режимах, необхідно оцінювати ймовірність дефіциту потужності.

Статистичний критерій, що показує ймовірність того, що гібридна система не зможе покрити навантаження у певний момент часу t .

Ймовірність втрати енергопостачання (Loss of Power Supply Probability, LPSP):

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{load}(t) - P_{gen}(t) - P_{bat_dis}(t))}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)}, \quad (1.3)$$

де чисельник сумує дефіцит енергії лише для тих годин, коли генерації та заряду батарей недостатньо. Для об'єктів II категорії надійності, яким є школа, цільове значення LPSP в автономному режимі має наближатися до 0.

Еквівалентна кількість годин відключення характеризує кількість годин на рік, коли внутрішня генерація не здатна забезпечити живлення критичної групи споживачів (насоси ІТП, зв'язок).

1.4.3. Критерії взаємодії з мережею

Впровадження СЕС потужністю 90 кВт суттєво змінює профіль взаємодії закладу із зовнішньою мережею.

Коефіцієнт зрізання піків (PSE), за яким оцінюється здатність системи зменшувати максимальне споживання потужності з мережі у години пікових навантажень (для школи це 08:00–10:00) за рахунок розряду АКБ.

$$PSE = \frac{P_{grid_max}^{base} - P_{grid_max}^{hybrid}}{P_{grid_max}^{base}} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

де $P_{grid_max}^{base}$ — пікова потужність без СЕС, $P_{grid_max}^{hybrid}$ — з СЕС та АКБ. Зниження пікового навантаження дозволяє зменшити рахунки за потужність (при відповідному тарифі) та розвантажити ввідний трансформатор.

1.4.4. Техніко-економічні та екологічні критерії

Нормована вартість електроенергії (LCOE)

Вартість однієї кВт·год енергії, отриманої від власної гібридної системи, враховуючи капітальні вкладення (CAPEX) на інвертори, панелі, АКБ та експлуатаційні витрати (OPEX) протягом життєвого циклу.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

Система вважається ефективною, якщо $LCOE_{system} < Tariff_{grid}$ (тариф мережі).

Скорочення викидів CO_2 розраховується як різниця між викидами при споживанні енергії з мережі (вугільна/атомна генерація) та нульовими викидами СЕС:

$$M_{CO_2} = E_{gen,self} \cdot k_{emission},$$

де $k_{emission}$ — коефіцієнт емісії для об'єднаної енергосистеми України, приймається на рівні $\approx 0.36 - 0.4$ кг/ CO_2 /кВт·год.

Таким чином, у даній роботі під час моделювання режимів роботи системи «СЕС – Накопичувач – Школа» оптимізація буде проводитись за критерієм максимізації **SSR** та мінімізації **LPSP** для критичних навантажень.

1.5 Постановка задач дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження впливу інтегрованої системи, що складається з дахової сонячної електростанції та системи акумуляції (електричної та теплової), на енергетичну автономність навчального закладу.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

Проаналізувати добові та сезонні графіки електричного навантаження основного корпусу ЗНЗ №16, визначити пікові навантаження та базовий профіль споживання для різних режимів роботи (навчальний процес, канікули).

Обґрунтувати конфігурацію та параметри фотоелектричної системи загальною потужністю 90 кВт, враховуючи геометрію дахів (південні схили, кут 35°) та наявні обмеження.

Розробити технічне рішення щодо інтеграції фотогальванічної системи нагріву води об'ємом 600 л для заміщення існуючих електричних бойлерів, що дозволить підвищити коефіцієнт власного споживання сонячної енергії.

Змоделювати енергетичний баланс об'єкта та розрахувати показники автономності для критичних сценаріїв (зимовий період, відключення мережі).

Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих рішень,

розрахувавши терміни окупності та екологічний ефект від заміщення споживання електроенергії з мережі.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що існуюча система енергозабезпечення основного корпусу ЗНЗ №16 базується на повному споживанні ресурсів із зовнішніх мереж, що робить заклад вразливим до зростання тарифів та аварійних відключень. У структурі енергобалансу домінує теплова енергія (близько 80%), проте електричне навантаження має критичне значення для забезпечення навчального процесу. Виявлено значну нерівномірність електроспоживання: добові піки (08:00–12:00) та сезонні спади (літні канікули), що потребує специфічних підходів при інтеграції СЕС.

2. Регіон розташування об'єкта (м. Кропивницький) має високий рівень інсоляції (1180–1250 кВт·год/м² на рік), що підтверджує доцільність впровадження фотоелектричних систем. Геометричні параметри даху основного корпусу (орієнтація на південь, кут нахилу 35°) є сприятливими для розміщення СЕС потужністю 60 кВт, а дах спортзалу дозволяє розмістити додаткові 30 кВт. Головним викликом є «сезонні ножиці»: дисбаланс між піком генерації влітку та піком споживання взимку.

3. Обґрунтовано, що для підвищення коефіцієнта власного споживання (SCR) в умовах школи найефективнішим рішенням є комбінація електрохімічного накопичення (BESS) для критичних груп споживачів та теплового накопичення (Power-to-Heat) для системи ГВП. Технологія PV-heating (фотоелектричний нагрів води) визначена як пріоритетна для заміни існуючих електричних бойлерів через її простоту, надійність у зимовий період та відсутність проблем стагнації влітку.

4. Сформовано методологічну базу для оцінки проєктних рішень. Енергетичну автономність навчального закладу запропоновано розглядати у двох аспектах: фізична автономність (здатність працювати під час

блекаутів, оцінюється через показник LPSP) та економічна автономність (частка заміщення мережевої енергії, оцінюється через SSR).

На основі аналізу визначено, що просте встановлення мережевої СЕС без системи керування перетоками та акумуляції буде неефективним через неможливість повної утилізації енергії у вихідні дні та канікули. Тому подальші дослідження у роботі будуть спрямовані на розробку гібридної схеми, яка поєднує генерацію (90 кВт), резервне живлення та утилізацію надлишків на потреби ГВП (600 л).

РОЗДІЛ 2

2. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТА

2.1 Загальна технічна характеристика основного корпусу навчального закладу

Об'єктом дослідження в даній магістерській роботі є система енергозабезпечення основного навчального корпусу комунального закладу «Навчально-виховне об'єднання «ЗНЗ I-III ступенів № 16 – дитячий юнацький центр «Лідер»», що розташований у місті Кропивницький. Вибір даного об'єкта обумовлений його типовістю для освітньої інфраструктури України та значним потенціалом для впровадження енергоефективних заходів і відновлюваних джерел енергії.

2.1.1. Архітектурно-планувальні рішення та геометричні параметри

Будівля основного корпусу школи була введена в експлуатацію у 1973 році¹. Проектне рішення відповідає стандартам будівництва громадських споруд 70-х років минулого століття (серії типових проєктів 2-02-хх або аналогів), для яких характерні значні площі скління та використання повнотілої силікатної цегли без додаткового утеплення.

Архітектурно будівля являє собою складну в плані споруду, що складається з двох функціонально поєднаних блоків (див. рис. 2.1):

На рисунку 2.1 наведено план забудови будівлі, яка містить 2-поверхове Т-подібне приміщення під спільним дахом та прибудований до них 4-хповерховий корпус.

1. Чотириповерховий блок: Основний навчальний корпус, де розташовані класні кімнати, адміністративні приміщення та лабораторії.

2. Двоповерховий блок: Т-подібна прибудова, що включає спортивну залу, актову залу та харчоблок².

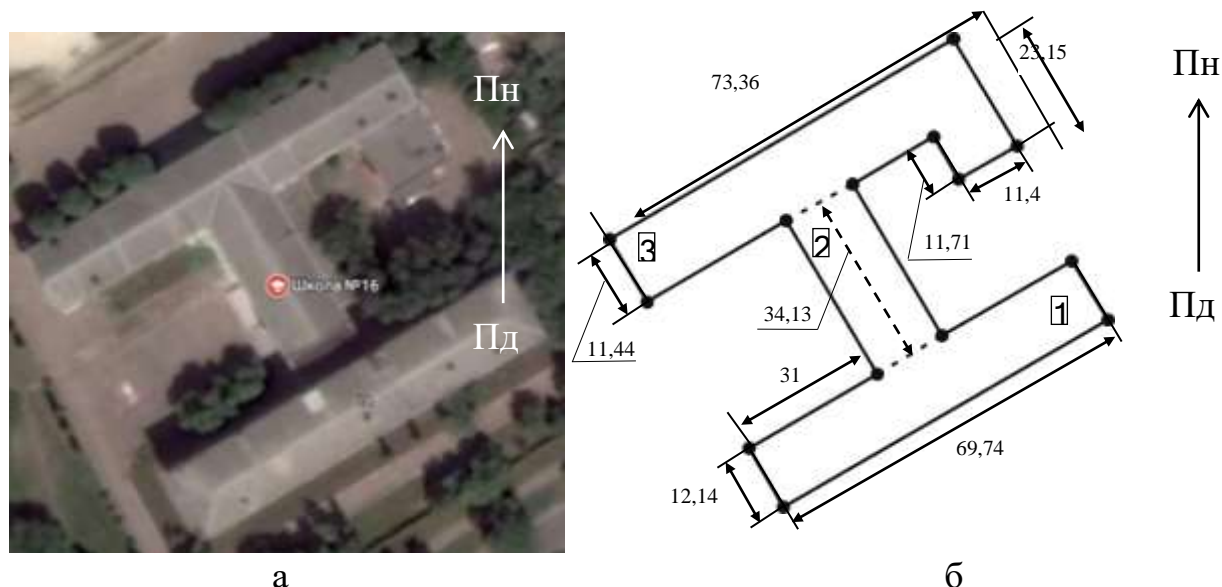


Рисунок 2.1. План забудови основного корпусу школи:
а – фото супутника; б – план будівлі
(1, 2 – двоповерхові, 3 – чотириповерховий.)

Загальна кількість учнів (5–11 класи), що навчаються в корпусі, становить близько 600 осіб, педагогічний та обслуговуючий персонал — 71 особа³. Таке антропогенне навантаження формує специфічний мікрокліматичний режим та графік споживання ресурсів.

Основні геометричні та об'ємно-планувальні показники будівлі, які є вихідними даними для теплотехнічних розрахунків та оцінки потенціалу дахових СЕС, зведено в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Геометричні параметри основного корпусу школи

Найменування показника	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Рік забудови	-	рік	1973
Поверховість	-	пов.	2 та 4
Площа забудови	$A_{\text{заб}}$	м ²	2233,7
Опалювальна площа	$A_{\text{опал}}$	м ²	5661
Розрахункова площа	$A_{\text{р}}$	м ²	3585,5
Опалюваний об'єм	$V_{\text{опал}}$	м ³	20754
Висота приміщень (чиста)	h	м	3,3
Коефіцієнт компактності будівлі	$\Lambda_{\text{комп}}$	м ⁻¹	0,40

Показник компактності будівлі $\Lambda_{\text{комп}} = 0,40 \text{ м}^{-1}$ вказує на відносно розгалужену форму споруди, що збільшує площу зовнішніх огорожувальних конструкцій ($A_{\Sigma} = 8278 \text{ м}^2$) і, як наслідок, теплові втрати. Проте, з точки зору розміщення фотоелектричних систем, велика площа забудови ($2233,7 \text{ м}^2$) є позитивним фактором, оскільки забезпечує достатній простір на покрівлі.

2.1.2. Характеристика огорожувальних конструкцій та теплотехнічний стан

Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій безпосередньо впливають на клас енергоефективності будівлі та визначають базовий рівень енергоспоживання, який планується компенсувати за рахунок власної генерації.

Зовнішні стіни. Виконані з силікатної цегли товщиною 510 мм із внутрішнім шаром штукатурки (20 мм). Загальна товщина конструкції становить 530 мм. Фактичний опір теплопередачі стін складає $R_{\text{стін}} = 1,168 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Це значення є критично низьким у порівнянні з сучасними нормативними вимогами ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» (де $R_{\text{qmin}} \geq 4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для I температурної зони), що свідчить про значні трансмісійні втрати тепла.

Світлопрозорі конструкції. Будівля характеризується високим коефіцієнтом скління фасадів — 0,297 (майже 30% площі стін займають вікна)⁹. Загальна площа вікон становить 1140 м². На момент проведення аудиту близько 60% дерев'яних віконних блоків було замінено на металопластикові склопакети. Високий рівень природного освітлення є позитивним фактором для зменшення навантаження на систему електричного освітлення в денний час, що важливо враховувати при побудові добових графіків споживання.

Покрівля та потенціал для розміщення СЕС. Характеристика даху є ключовим параметром для проектування сонячної електростанції. Будівля має комбіновану покрівлю:

1. Над 4-поверховим корпусом: Скатний дах, вкритий металочерепицею¹². Конструктивно це холодне горище з утепленням перекриттям (шар скловати 150 мм).

2. Над 2-поверховим блоком (спортзал): Скатний дах, вкритий шифером¹⁴.

Для розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) найбільш придатним є дах 4-поверхового корпусу завдяки покриттю з металочерепиці, що спрощує монтаж кріпильних систем, та наявності скатів з орієнтацією, придатною для генерації. Згідно з вихідними даними для проектування, ми розглядаємо південні схили з кутом нахилу 35° . Це значення є близьким до оптимального кута для цілорічної генерації в широтах України (близько 48° пн. ш.), що дозволяє ефективно використовувати сонячну радіацію як влітку, так і в перехідні періоди.

Наявність на даху вентиляційних шахт та слухових вікон створює зони локального затінення, що вимагає застосування спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, PVSOL або Helioscope) для детального моделювання розміщення стрінгів панелей у Розділі 3.

2.1.3. Кліматичні умови майданчика будівництва

Ефективність роботи фотоелектричних систем та теплові навантаження будівлі визначаються кліматологічними параметрами місцевості. Згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія», місто Кропивницький належить до I температурної зони України (II архітектурно-будівельний кліматичний район).

Температурний режим:

- Розрахункова температура зовнішнього повітря найхолоднішої п'ятиденки (забезпеченістю 0,92): -22°C .
- Середня температура опалювального періоду: $+0,5^{\circ}\text{C}$.
- Тривалість опалювального періоду: 192 доби.

Ці дані вказують на тривалий період низької сонячної активності взимку, що корелює з максимальною потребою в енергії. Це підтверджує необхідність гібридизації системи енергопостачання.

Кіровоградська область має один із найвищих рівнів інсоляції в Україні. Середньорічна сумарна сонячна радіація, що надходить на горизонтальну поверхню, становить 1180–1250 кВт·год/м².

Для похилої поверхні 35° , з орієнтацією на Південь, яка розглядається в проєкті, очікувана річна інсоляція зростає на 10–15% порівняно з горизонтальною площиною. Проте, сезонний розподіл є нерівномірним: Травень–Серпень: Середньоденна сума радіації досягає 5,5–6,5 кВт·год/м²; Листопад–Січень: Показник падає до 0,8–1,5 кВт·год/м², що вимагає значного запасу встановленої потужності СЕС для покриття базових потреб школи взимку.

2.1.4. Інженерні мережі та категорійність електропостачання

Централізоване теплопостачання, введення здійснюється через ІТП, обладнаний комерційним вузлом обліку тепла (теплочильник СВТУ-10М).

Централізоване водопостачання, холодне. Гаряче водопостачання забезпечується локально електричними бойлерами, що є енерговитратним рішенням.

Електропостачання: Здійснюється від трансформаторної підстанції ПАТ «Кіровоградобленерго» напругою 0,4 кВ. За ступенем надійності електропостачання об'єкт належить до II категорії.

Згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), для споживачів II категорії перерва в електропостачанні дозволяється лише на час, необхідний для включення резервного живлення діями чергового персоналу або виїзної оперативної бригади. Однак в умовах воєнного стану та віялових відключень фактична надійність зовнішньої мережі значно знизилася. Це обґрунтовує доцільність впровадження системи власної генерації (СЕС) з акумуляторним резервом, що фактично підвищить категорію надійності до рівня I категорії (автоматичне введення резерву).

Ввідно-розподільчий пристрій (ВРП) 0,4 кВ розташований у щитовій на першому поверсі. Наявність вільного простору в щитовій та технічного підпілля спрощує прокладання кабельних трас від дахових інверторів до точки приєднання.

2.2 Аналіз структури встановленої електричної потужності та категорійності електроприймачів

Для коректного розрахунку параметрів гібридної сонячної електростанції та вибору ємності акумуляторних батарей необхідно детально проаналізувати структуру електричних навантажень об'єкта. Це дозволить визначити не лише загальну потребу в енергії, але й характер навантаження (активне/індуктивне), пускові струми та пріоритетність живлення.

2.2.1. Категорійність електропостачання та групи надійності

Відповідно до ДБН В.2.5-23:2010 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення», основний корпус навчального закладу належить до споживачів II категорії надійності електропостачання. Однак, в умовах впровадження системи енергетичної автономності, доцільно

провести внутрішню класифікацію електроприймачів школи за ступенем важливості для забезпечення життєдіяльності закладу:

1. Критична група: Споживачі, що вимагають безперебійного живлення. Відключення призводить до зупинки систем життєзабезпечення або створює загрозу безпеці.

- Склад: Циркуляційні насоси ІТП, система пожежної сигналізації, сервери та мережеве обладнання, аварійне (чергове) освітлення, холодильне обладнання харчоблоку.

- Вимога до СЕС: Мають жититися від акумуляторів у першу чергу при зникненні напруги в мережі.

2. Основна група: Споживачі, необхідні для ведення навчального процесу.

- Склад: Робоче освітлення класів, комп'ютерна техніка в кабінетах інформатики, мультимедійне обладнання.

- Вимога до СЕС: Живлення підтримується за наявності достатньої генерації або заряду АКБ, можливе короткочасне відключення.

3. Допоміжна група: Потужні споживачі, роботу яких можна тимчасово призупинити під час дефіциту потужності.

- Склад: Електроплити харчоблоку (частково), бойлери ГВП, вентиляційні установки (якщо не задіяні в протидимному захисті).

2.2.2. Структура встановленої потужності

На основі інвентаризації електрообладнання, проведеної в рамках аудиту та уточнених вихідних даних, сформовано баланс встановленої потужності основного корпусу школи наведений в таблиці Таблиця 2.2.

Аналіз структури навантаження:

Силове навантаження харчоблоку (27%): Становить значну частку (\$24\$ кВт). Особливістю є те, що це навантаження є суто активним (резистивним), що є сприятливим для роботи інверторів (відсутність

пускових струмів). Однак, режим роботи харчоблоку (07:30–12:00) формує ранковий пік споживання, який взимку не може бути покритий сонячною генерацією.

Таблиця 2.2. Баланс встановленої електричної потужності

№ з/п	Група споживачів	Характеристика обладнання	Кі-сть, шт.	Потужність одиниці, кВт	Загальна вст. Потужність (Рвст), кВт	Тип навантаження / cos φ
1	Харчоблок	Промислові електроплити, жарочні шафи	-	-	24,0	Активне (ТЕНи) / ~1.0
2	Комп'ютерна техніка	ПК у комп'ютерних класах та адміністрації	60	0,45	27,0	Нелінійне (імпульсні БЖ) / ~0.9
3	Освітлення	Світильники (світлодіодні + люмінесцентні)	-	-	20,0	Активно-ємнісне / ~0.95
4	Оргтехніка	Принтери, проектори, ксерокси	15	0,70	10,5	Нелінійне / ~0.85
5	Насосна група ІТП	Циркуляційні насоси опалення	2	2,00	4,0	Індуктивне (двигуни) / ~0.8
6	ГВП	Електричні бойлери (існуючі)	3	1,00	3,0	Активне / 1.0
					88,5 кВт	

Комп'ютерна та оргтехніка (42%): Сумарно це найбільша група споживачів ($\$27 + 10,5 = 37,5\$$ кВт). Це обладнання має імпульсні блоки живлення, що генерують вищі гармоніки в мережу. При виборі інверторів необхідно враховувати коефіцієнт нелінійних спотворень. Крім того, розрахункова потужність 450 Вт на один ПК є піковою; в реальному режимі навчання середнє споживання становить 150–200 Вт, що дає значний резерв при розрахунку автономності.

Освітлення (23%): Навантаження 20 кВт є стабільним протягом навчального дня взимку. Модернізація системи освітлення (перехід на світлодіодні лампи) вже частково виконана, що враховано в потужності.

Двигуни та насоси (4,5%): Потужність насосної групи відносно невелика (4 кВт), але це навантаження є критичним і має індуктивний характер. Пускові струми асинхронних двигунів насосів можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів. Хоча сумарна потужність мала, при проектуванні системи безперебійного живлення необхідно перевірити здатність інверторів витримувати короткочасні перевантаження до 20–25 кВт для запуску насосів.

2.2.3. Коефіцієнт попиту та розрахункова потужність

Встановлена потужність $P_{\text{вст}} = 88,5$ кВт не дорівнює реальному споживанню в кожен момент часу, оскільки не всі прилади вмикаються одночасно. Для визначення реального навантаження на інвертори застосовується коефіцієнт попиту (K_p).

Для навчальних закладів такого типу розрахунковий коефіцієнт попиту зазвичай приймається на рівні 0,6–0,7 (згідно з ДБН В.2.5-23:2010).

$$P_{\text{розр}} = P_{\text{вст}} \times K_c = 88,5 \times 0,7 \approx 62 \text{ кВт.}$$

Це значення ($P_{\text{розр}} = 62$ кВт) використовується для вибору номінальної потужності інверторного обладнання. Запропонована у завданні сумарна потужність СЕС у 90 кВт повністю перекриває розрахункове пікове навантаження школи, створюючи запас потужності близько 45% ($90/62 \approx 1,45$). Це важливо для забезпечення заряду акумуляторних батарей одночасно із живленням споживачів у сонячні дні.

2.3 Побудова та аналіз добових графіків електричного навантаження

Для вибору ємності системи накопичення енергії та оцінки балансу потужності в реальному часі недостатньо оперувати лише місячними обсягами споживання. Необхідно проаналізувати добовий розподіл навантаження $P(t)$, який для навчальних закладів має специфічний переривчастий характер.

Оскільки автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) з похвилинною фіксацією даних на об'єкті відсутня, у роботі застосовано метод побудови синтетичних профілів навантаження. Розрахунок базується на встановленій потужності електроприймачів (визначеній у п. 2.2), коефіцієнтах попиту та регламенті роботи школи.

Розглянуто три характерні сценарії роботи закладу, що визначають граничні умови для проектування СЕС.

2.3.1. Робота закладу в опалювальний період

Цей режим (сценарій А) є найбільш напруженим з точки зору енергоспоживання. Характеризується максимальною тривалістю роботи системи освітлення, роботою циркуляційних насосів опалення (24/7) та повним завантаженням харчоблоку.

Характеристика добового графіка (Робочий день):

- 00:00 – 07:00 (Нічний мінімум / Базис): Працюють лише критичні споживачі: циркуляційні насоси ІТП (44 кВт), чергове освітлення, охоронна сигналізація, холодильне обладнання харчоблоку, серверна. Рівень навантаження: $\approx 6-8$ кВт.

- 07:30 – 08:00 (Ранковий підйом): Початок роботи персоналу харчоблоку (вмикання електроплит на розігрів), вмикання освітлення в коридорах та класах. Різке зростання споживання.
- 08:00 – 10:00 (Ранковий пік): Одночасна робота всіх груп споживачів:
 - 1) Харчоблок: активна фаза приготування їжі ($\approx 18 - 20$ кВт).
 - 2) Освітлення: включено на 100% через відсутність достатньої природної інсоляції (≈ 18 кВт).
 - 3) Комп'ютерні класи та оргтехніка: початок уроків $\approx 15 - 20$ кВт).
 - 4) Сумарне навантаження: $\approx 55 - 62$ кВт.
- 11:00 – 16:00 (Денний напівпік): Зниження навантаження харчоблоку (перехід у режим підтримки страв або миття посуду). Часткове відключення освітлення в класах, що виходять на південну сторону. Рівень навантаження: $\approx 35 - 45$ кВт.
- 16:00 – 24:00 (Вечірній спад): Завершення навчального процесу, прибирання, перехід на черговий режим.

Проблема роботи в опалювальному періоді наявність ранкового піку (08:00–10:00), що не співпадає з піком сонячної генерації взимку (11:00–13:00). Це означає, що покриття ранкового максимуму можливе лише за рахунок зовнішньої мережі або енергії, накопиченої в акумуляторах за попередній день.

2.3.2. Робота закладу весняно-осінній період

Режим роботи Весняно-осінній період (Сценарій Б) характеризується відсутністю навантаження від насосів опалення (після завершення або до початку опалювального сезону) та меншим використанням штучного освітлення завдяки довшому світловому дню.

Характеристика добового графіка 08:00 – 09:00 (Ранковий пік): Основне навантаження створює харчоблок та запуск навчального

обладнання. Освітлення використовується частково. Рівень навантаження: $\approx 40 - 45$ кВт.

- 10:00 – 16:00 (Стабілізація): Рівномірне споживання на рівні 25–30 кВт. У сонячні дні це навантаження може бути повністю компенсоване даховою СЕС потужністю 90 кВт.
- Вихідні дні: Споживання мінімальне (черговий режим), що створює значний надлишок сонячної енергії. Саме в цей період доцільно використовувати нагрів води в баках-акумуляторах на наступний тиждень.

2.3.3. Робота закладу в літній період

Специфічний режим роботи (Сценарій В), коли школа функціонує в форматі літнього табору (червень) або перебуває на профілактиці (липень-серпень).

Характеристика добового графіка з 09:00 – 12:00 (Активна фаза): Робота шкільного табору. Задіяні холодильники, частково харчоблок, вентиляція (за потреби), мультимедіа. Рівень навантаження: $\approx 15 - 25$ кВт.

В інший час споживання на рівні базового мінімуму (2–3 кВт).

Це сценарій з найбільшим дисбалансом: генерація СЕС максимальна (до 400–500 кВт·год/добу), а споживання мінімальне. Без системи акумуляції або нагріву води коефіцієнт власного споживання (SCR) влітку буде прагнути до нуля.

2.3.4. Аналіз розрахункових навантажень

На основі змодельованих сценаріїв сформовано погодинну відомість споживання потужності $P_{load}(t)$ наведені в таблиці 2.3, яка буде використана в Розділі 3 для моделювання енергетичного балансу.

Таблиця 2.3. Розрахункова активна потужність споживання (кВт) у робочі дні

Часовий інтервал	Зима	Весна/Осінь	Літо
00:00 – 07:00	7,0	3,0	2,0
07:00 – 08:00	35,0	25,0	5,0
08:00 – 09:00	62,0 (max)	45,0 (max)	10,0
09:00 – 10:00	58,0	35,0	18,0
10:00 – 11:00	50,0	30,0	22,0
11:00 – 12:00	48,0	30,0	25,0 (max)
12:00 – 14:00	40,0	28,0	10,0
14:00 – 16:00	35,0	20,0	5,0
16:00 – 18:00	15,0	8,0	3,0
18:00 – 24:00	7,0	3,0	2,0

Отримані профілі демонструють, що пікове навантаження 62 кВт є короткочасним (1-2 години на добу взимку). Це дозволяє розглядати варіант використання інверторів, номінальна потужність яких трохи менша за пікову, за умови їх здатності витримувати перевантаження, або покриття піків за допомогою гібридної роботи (додавання потужності від АКБ до мережевої).

2.4 Характеристика системи теплозабезпечення та режимів споживання гарячої води

Аналіз теплового режиму навчального закладу є невід’ємною частиною проєктування гібридної СЕС, оскільки саме переведення частини теплових навантажень (ГВП) на електричний нагрів від сонця (технологія PV-heating) є ключовим механізмом підвищення енергоефективності.

2.4.1. Аналіз існуючого стану системи теплозабезпечення

Теплопостачання основного корпусу школи здійснюється централізовано від міських теплових мереж. Введення теплоносія

відбувається через індивідуальний тепловий пункт (ІТП), розташований у підвальному приміщенні.

Згідно з даними енергетичного аудиту, централізоване гаряче водопостачання (ГВП) у будівлі відсутнє¹. Забезпечення санітарно-гігієнічних потреб здійснюється за децентралізованою схемою:

- 1) Джерело нагріву: 3 електричні бойлери накопичувального типу.
- 2) Потужність: Кожен водонагрівач має ТЕН потужністю 1,0 кВт (сумарно 3,0 кВт).
- 3) Локалізація: Харчоблок та санітарні кімнати.

Недоліки існуючої схеми:

1) Сумарна потужність 3 кВт не здатна забезпечити швидке відновлення об'єму гарячої води під час пікових навантажень (обідня перерва, миття посуду).

2) Нагрів води здійснюється за комерційним тарифом електроенергії з зовнішньої мережі, збільшуючи експлуатаційні витрати закладу.

3) Віддалені споживачі (наприклад, душові спортзалу) можуть не мати достатнього забезпечення гарячою водою через обмежений об'єм існуючих баків.

2.4.2. Розрахунок профілю споживання гарячої води

Для проєктування системи нагріву води на 600 л необхідно визначити добовий графік потреби у гарячій воді. Основними споживачами є:

1. Харчоблок: Миття посуду, технологічні потреби. Режим роботи: інтенсивний розбір води з 11:30 до 14:00.

2. Спортивна зала: 4 душові сітки. Режим роботи: епізодичний розбір води після уроків фізкультури (в інтервалі 10:00–15:00).

3. Санітарні вузли: Рукомийники (періодичне короткочасне використання).

Розрахунковий об'єм баків-акумуляторів прийнято на рівні $V_{\text{ГВП}} = 600$ л. Це рішення дозволяє створити буферний запас гарячої води, який накопичується протягом світлового дня за рахунок сонячної енергії та використовується у години пікового розбору.

Кількість теплової енергії $Q_{\text{ГВП}}$, необхідної для нагріву добового запасу води, визначається за формулою термодинаміки:

$$Q_{\text{ГВП}} = c \cdot m \cdot (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) \cdot k_{\text{loss}}, \quad (2.1)$$

де, c — питома теплоємність води $1,163 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; m — маса води (600 кг, що відповідає об'єму 600 л); t_{out} — нормативна температура гарячої води 55°C згідно з санітарними нормами; t_{in} — температура холодної води на вході, приймаємо середню 10°C ; k_{loss} — коефіцієнт, що враховує тепловтрати в баку та трубопроводах 1,05.

$$Q_{\text{ГВП}} = 1,163 \cdot 600 \cdot (55 - 10) \cdot 1,05 \approx 33 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, для повного нагріву 600 літрів води системі необхідно щоденно витратити близько 33 кВт·год електроенергії.

2.4.3. Графік навантаження на систему ГВП

Специфіка школи полягає в тому, що споживання гарячої води є прогнозованим і прив'язаним до розкладу дзвінків та роботи їдальні.

Графік роботи навчального закладу є ідеальним для сонячної генерації. Основний розбір (11:00–14:00) співпадає з піком сонячної активності, в цей час відбувається пряме заміщення: вода нагрівається і одразу споживається, що зменшує вимоги до теплоізоляції баків. У першій половині дня (08:00–11:00) та після 14:00 надлишки генерації можуть бути

спрямовані на «догрів» води до максимальної температури $70-75^{\circ}\text{C}$, перетворюючи бак на тепловий акумулятор на наступний ранок.

Таблиця 2.4. Орієнтовний баланс розбору гарячої води

Часовий інтервал	Споживач	Характер навантаження	Відсоток від добового об'єму
08:00 – 11:00	Кухня (приготування), Спортзал	Помірний	20%
11:00 – 14:00	Кухня (миття посуду), Спортзал	Максимальний	60%
14:00 – 16:00	Прибирання приміщень	Середній	20%
16:00 – 08:00	-	Відсутній (нагрів/акумуляція)	0%

Існуючі бойлери сумарною потужністю 3 кВт потребували б для нагріву такого об'єму 33 кВт·год/3 кВт близько 11 годин безперервної роботи, що фізично неможливо в межах робочого дня.

Впровадження фотогальванічної системи нагріву дозволить використовувати значно більшу потужність (наприклад, виділити 5–10 кВт з доступних 90 кВт генерації СЕС), скоротивши час нагріву повного бака до 3–4 годин. Це забезпечить комфортні умови для учнів та персоналу і дозволить повністю відмовитись від споживання мережевої електроенергії для потреб ГВП у період з березня по жовтень.

2.5 Обґрунтування вибору програмного забезпечення та методів математичного моделювання

Проектування інтегрованої системи енергозабезпечення, що поєднує фотоелектричну генерацію, електрохімічну акумуляцію та теплові

навантаження, вимагає врахування великої кількості стохастичних факторів (погодні умови, нерівномірність споживання). Використання спрощених інженерних розрахунків не дозволяє отримати достовірну картину роботи системи в динаміці, тому в роботі застосовано методи комп'ютерного моделювання.

2.5.1. Порівняльний аналіз спеціалізованого програмного забезпечення

Для вирішення задач проектування СЕС на ринку представлено ряд програмних продуктів. Було проведено порівняльний аналіз найбільш поширених комплексів стосовно їх придатності для об'єкта дослідження наведений в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Порівняння функціональних можливостей ПЗ для моделювання СЕС

Критерій порівняння	PVsyst (Швейцарія)	PVSOL Premium (Німеччина)	RETScreen (Канада)	Helioscope (США)
3D-моделювання об'єкта	Базове	Детальне (імпорт 3D-моделей)	Відсутнє	Детальне
Аналіз затінення	Так	Так (з візуалізацією)	Ні	Так
Моделювання акумуляторів	Так	Так (детальні профілі заряду)	Базове	Ні
Власне споживання	Так	Гнучке налаштування профілів	Узагальнене	Ні
Фінансовий аналіз	Базовий	Розширений	Глибокий	Базовий

Для моделювання системи енергозабезпечення школи №16 обрано програмний комплекс PVSOL Дані з енергоаудиту вказують на наявність вентиляційних шахт, слухових вікон та парпетів на даху школи. PVSOL дозволяє створити детальну 3D-модель будівлі та розрахувати втрати від затінення для кожного окремого модуля, що є критичним для коректної

оцінки генерації взимку. Програма має розширені можливості для симуляції систем з акумуляторами (BESS), дозволяючи задавати стратегії керування зарядом/розрядом. Можливість імпорту погодинних графіків споживання (створених у п. 2.3), що дозволяє точно розрахувати коефіцієнти самозабезпечення (SSR) та власного споживання (SCR).

2.5.2. Математичні моделі енергетичних процесів

Для розрахунку балансу потужності в роботі використовуються наступні математичні залежності.

Модель генерації фотоелектричної системи: Миттєва потужність СЕС $P_{PV}(t)$ розраховується з урахуванням температурної корекції:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \cdot \frac{G(t)}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{mod}(t) - 25)], \quad (2.2)$$

де, P_{STC} — номінальна потужність масиву панелей за стандартних тестових умов (90 кВт); $G(t)$ — інтенсивність сонячної радіації в площині масиву в момент часу t , Вт/м²; G_{STC} — стандартна інтенсивність (1000 Вт/м²); γ — температурний коефіцієнт потужності модуля (зазвичай 0.3...-0.4 °С); $T_{mod}(t)$ — робоча температура модуля.

Енергетичний баланс розраховується для кожної години року ($t = 1 \dots 8760$) та перевіряється умова балансу потужності:

$$P_{load}(t) + P_{loss}(t) = P_{PV}(t) + P_{grid}(t) + P_{batt_disch}(t) - P_{batt_ch}(t) - P_{dump}(t), \quad (2.3)$$

де, $P_{load}(t)$ — електричне навантаження школи (включаючи PV-нагрів води); $P_{grid}(t)$ — потужність, що споживається з мережі (якщо $P_{grid} > 0$) або

віддається в мережу (якщо $P_{grid} < 0$); $P_{batt_disch} / P_{batt_ch}$ — потужність розряду/заряду АКБ; $P_{dump}(t)$ — невикористана енергія (втрати через повний заряд АКБ та відсутність попиту).

Модель системи геліосистеми в якій енергія, що спрямовується на нагрів води $E_{heat}(t)$, визначається як функція від надлишкової потужності:

$$E_{heat}(t) = \min \left(P_{PV}(t) - P_{base_load}(t); \frac{c \cdot m \cdot (T_{max} - T_{cur}(t))}{\eta_{heat}} \right), \quad (2.4)$$

де система автоматично перенаправляє енергію на ТЕНи лише за умови $P_{PV} > P_{base_load}$ (базове навантаження школи), але не більше, ніж потрібно для досягнення температури $T_{max} = 75^\circ \text{C}$.

Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз об'єкта підтвердив технічну можливість встановлення дахової СЕС на основному корпусі школи.
2. Визначено встановлену потужність електроприймачів (88,5 кВт) та розроблено синтетичні профілі добового навантаження для різних сезонів, що виявили значний дисбаланс між генерацією та споживанням.
3. Обґрунтовано необхідність акумуляції енергії: електрохімічної — для критичних споживачів (насоси, сервери) та теплової (у вигляді гарячої води) — для утилізації піків генерації.
4. В якості інструменту моделювання обрано PVSOL Premium, що дозволить врахувати складну геометрію даху та змоделювати роботу гібридної системи в динаміці.

РОЗДІЛ 3

3. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

3.1 Обґрунтування структурної схеми гібридної системи енергопостачання

Враховуючи результати аналізу енергоспоживання в розділі 2, які виявили необхідність покриття пікових навантажень взимку та утилізації надлишків генерації влітку, для основного корпусу школи №16 обрано впровадження гібридної системи електропостачання з функцією накопичення енергії.

Традиційні мережеві СЕС не можуть забезпечити автономність об'єкта під час відключень мережі, а повністю автономні системи є економічно недоцільними за наявності підключення до централізованої мережі. Тому обрана гібридна архітектура є оптимальним компромісом, що забезпечує гнучкість, надійність та енергоефективність.

3.1.1. Вибір топології системи

При інтеграції систем накопичення енергії розрізняють дві основні топології зв'язку: з'єднання на стороні змінного струму та на стороні постійного струму.

Для умов навчального закладу обрано топологію зв'язок по постійному струму на базі гібридних інверторів.

Енергоефективність: У DC-системі енергія від сонячних панелей заряджає акумулятор безпосередньо через MPPT-контролер, минаючи

подвійне перетворення (DC/AC » AC/DC), характерне для AC-систем. Це підвищує ККД циклу заряду на 3–5%.

Спрощення схеми: Використання гібридних інверторів дозволяє об'єднати функції мережевого інвертора, зарядного пристрою та контролера батареї в одному пристрої, що зменшує кількість точок відмови та займану площу в щитовій.

Перевантажувальна здатність: Гібридні інвертори здатні короткочасно додавати потужність від АКБ до потужності мережі, що критично важливо для покриття ранкових піків споживання школи (08:00–09:00), коли потужності мережі та сонця може бути недостатньо.

3.1.2. Опис функціональної схеми

Пропонована система складається з наступних функціональних блоків, взаємодія яких забезпечує енергетичний баланс об'єкта. Генераційний блок має сумарну потужність 90 кВт, розподілену на два поля. Поле 1 (Основний дах): 60 кВт, підключено до групи інверторів №1. Поле 2 (Спортзал): 30 кВт, підключено до інвертора №2. Такий поділ підвищує живучість системи: при виході з ладу одного сегмента, інший продовжує працювати.

Блок перетворення та керування складається з групи трифазних гібридних інверторів, що працюють паралельно. Вони синхронізуються із зовнішньою мережею 0,4 кВ та керують потоками енергії.

Блок накопичення енергії представляє собою літій-залізо-фосфатні (LFP) акумуляторні батареї високої напруги. Вибір високовольної архітектури обумовлений необхідністю зниження струмів комутації при значній потужності (90 кВт) та підвищенням загального ККД системи.

Блок теплової акумуляції складається з контролерів нагріву та ТЕНів у баках ГВП (600 л). Вона інтегрується в загальну схему як «кероване навантаження». Контролер відслідковує надлишки генерації в режимі реального часу і плавно (методом ШІМ або фазового регулювання) подає

напругу на ТЕНи, запобігаючи експорту енергії в мережу до моменту повного нагріву води.

Для розподілу навантажень споживачі школи розділені на дві шини у ввідно-розподільчому щиті. До шини гарантованого живлення підключені Насоси ІТП, сервери, аварійне освітлення. Живляться через окремий вихід інвертора і працюють навіть при повному знеструмленні міста. Від загальної шини отримують живлення система освітлення, харчоблок, розетки класів. Живляться від інвертора транзитом. При зникненні мережі інвертор автоматично відключає цю шину, щоб не перевантажити акумулятори.

3.1.3. Алгоритми роботи системи

Ефективність системи визначається логікою пріоритетів, закладеною в контролер керування (EMS). Для школи №16 пропонується наступний алгоритм розподілу енергії від СЕС:

Вся згенерована енергія першочергово йде на покриття поточних потреб школи (освітлення, комп'ютери). Якщо генерація перевищує споживання, надлишок спрямовується на заряд BESS до досягнення 100% ємності (підготовка до вечірнього періоду або можливого відключення). Коли акумулятори заряджені, а генерація продовжується (типова ситуація влітку або у вихідні дні), система активує контур PV-heating. Енергія йде на нагрів води в баках 600 л. Це дозволяє акумулювати близько 30–40 кВт·год енергії у тепловій формі. Лише після задоволення всіх внутрішніх потреб (електричних та теплових) залишок може обмежений інвертором (Zero Export), якщо договір відсутній.

Режими роботи:

- Режим «День»: СЕС + Мережа живлять навантаження.
- Режим «Пік»: СЕС + АКБ компенсують ранковий пік харчоблоку, зменшуючи споживання з мережі.

- Режим «Блекаут»: Зовнішня мережа відсутня. Інвертор розмикає ввідний контактор і переходить у режим джерела напруги (V-source), живлячи критичну групу виключно від Сонця та АКБ.

Запропонована схема забезпечує максимальну гнучкість та дозволяє досягти високих показників автономності, використовуючи бойлери як дешеву альтернативу розширенню ємності дороговартісних літєвих батарей.

3.2. Розрахунок та вибір основного обладнання сонячної електростанції

Ефективність роботи сонячної електростанції визначається коректним підбором генеруючого обладнання (фотоелектричних модулів) та перетворювального обладнання (інверторів), а також їх взаємною узгодженістю за електричними параметрами.

3.2.1. Вибір фотоелектричних модулів та моделювання їх розміщення на покрівлі

При виборі фотоелектричних модулів для навчального закладу пріоритетними задачами максимальне використання доступної площі даху. Оскільки на даху школи наявні вентиляційні канали та парапети, доцільно використовувати модулі з технологією різаних комірок. Така конструкція дозволяє модулю продовжувати генерацію (хоча б на 50% потужності), навіть якщо нижня частина панелі затінена, здатність ефективно працювати при нагріванні влітку.

Для проекту обрано монокристалічні модулі номінальною потужністю 550 Вт. Це сучасний стандарт, що забезпечує оптимальне співвідношення ціни та потужності.

Технічні характеристики обраного модуля:

- Номінальна потужність: 550 Вт.
- Технологія: Monocrystalline, Half-Cell, PERC.
- Коефіцієнт корисної дії модуля: 21,3%.
- Напруга холостого ходу: 49,90 В.
- Струм короткого замикання: 14,00 А.
- Напруга в точці максимальної потужності: 41,96 В.
- Струм в точці максимальної потужності: 13,11 А.
- Температурний коефіцієнт потужності: -0,35 %/°С.
- Габаритні розміри: 2279 × 1134 × 35 мм.
- Площа одного модуля: 2,58 м².

Загальна проектна потужність станції становить 90 кВт, то необхідна кількість модулів:

$$N_{\text{заг}} = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{мод}}} = \frac{90000}{550} \approx 164 \text{ шт.}$$

Відповідно до архітектурних особливостей будівлі розподіл модулів по покрівлі розділений на дві підсистеми:

1. Основний корпус (підсистема №1):

- Виділена потужність: 60 кВт.
- Кількість модулів: 60000 / 550 ≈ 110 шт.
- Необхідна площа: 110 × 2,58 = 283,8 м².

Південний скат металочерепичного даху. Кут нахилу 35° відповідає нахилу покрівлі, що спрощує монтаж (використовується система алюмінієвих профілів, що кріпляться паралельно скату).

2. Спортивна зала (підсистема №2):

- Виділена потужність: 30 кВт.
- Кількість модулів: 30000 / 550 ≈ 54 шт. (приймаємо 54 шт. для симетрії стрінгів).

- Фактична потужність поля: $54 \times 550 = 29,7$ кВт.
- Необхідна площа: $54 \times 2,58 = 139,3$ м².

Дах над спортзалом. Оскільки покриття шиферне, рекомендовано використання спеціалізованих кріплень-шпильок або перекладання частини покрівлі під профнастил для надійності. Орієнтація — Південь.

Сумарна фактична потужність фотоелектричного поля складе:

$$P_{\text{факт}} = (110 + 54) \times 550 = 90200 \text{ Вт} = 90,2 \text{ кВт.}$$

3.2.2. Вибір інверторного обладнання та конфігурація стрінгів

Для реалізації гібридної схеми живлення та забезпечення заряду високовольтних акумуляторних батарей необхідно обрати трифазні гібридні інвертори.

Виходячи з потужності полів (60 кВт та 30 кВт), оптимальним рішенням є використання уніфікованого обладнання — трьох гібридних інверторів номінальною потужністю 30 кВт кожен.

Технічні характеристики обраного інвертора (на прикладі типового обладнання Deue або аналогів):

- Номінальна вихідна потужність змінного струму: 30 кВт.
- Максимальна вхідна потужність постійного струму: 39 кВт (допускається перевантаження по входу до 30%).
- Кількість трекерів точки максимальної потужності: 3 шт.
- Діапазон напруги роботи трекера: 200–850 В.
- Максимальний вхідний струм на трекер: 26 А + 26 А + 26 А.
- Тип підтримуваних акумуляторів: Літій-іонні / Літій-залізо-фосфатні (високовольтні, 160–800 В).

Конфігурація стрінгів (ланцюжків модулів):

Перед підключенням необхідно перевірити допустимість напруги стрінга при екстремально низьких температурах (для м. Кропивницький розрахункова температура -22°C).

Напруга холостого ходу модуля:

$$U_{xx}^{-22} = U_{xx}^{STC} \cdot (1 + |\beta| \cdot (25 - (-22))) = 49,9 \cdot (1 + 0,0027 \cdot 47) \approx 56,2 \text{ В.}$$

Максимальна вхідна напруга інвертора становить 1000 В. Максимальна кількість модулів у послідовному ланцюзі:

$$N_{max} = 1000 / 56,2 = 17,7 \rightarrow 17 \text{ шт.}$$

Оптимальна робоча напруга (близько 600–700 В) досягається при з'єднанні 14–16 модулів.

Схема комутації:

Інвертор №1 (Основний дах, частина 1, 30 кВт) підключено 54 модулі (29,7 кВт). Трекер А: 18 модулів (1 стрінг). Трекер В: 18 модулів (1 стрінг). Трекер С: 18 модулів (1 стрінг).

Інвертор №2 (Основний дах, частина 2, 30 кВт) підключено 56 модулів (30,8 кВт). Трекер А: 20 модулів (розділені на 2 паралельні підстрінги по 10 шт., або послідовно, якщо дозволяє напруга; оптимально — 2 стрінги по 14 шт. на різні входи, тут приймаємо конфігурацію 18+19+19). Для рівномірного завантаження: Трекер А — 18 шт., Трекер В — 19 шт., Трекер С — 19 шт.

Інвертор №3 (Спортзал, 30 кВт) підключено 54 модулі (29,7 кВт). Трекер А: 18 модулів. Трекер В: 18 модулів. Трекер С: 18 модулів.

Така конфігурація забезпечує рівномірне завантаження інверторів, знаходження робочої напруги в оптимальному діапазоні ефективності (близько 600–700 В) та дозволяє незалежно керувати різними частинами

сонячного поля, мінімізуючи вплив можливого часткового затінення від конструкцій даху. Всі три інвертори об'єднуються по стороні змінного струму в паралельну роботу і підключаються до головного розподільчого щита школи.

3.2 Розрахунок параметрів системи накопичення електричної енергії

Система накопичення енергії в навчальному закладі виконує дві функції: забезпечення автономності критичних споживачів під час аварійних відключень (блекаутів) та згладжування піків споживання для зменшення навантаження на мережу.

Визначення розрахункового навантаження:

Згідно з аналізом у п. 2.2, до групи гарантованого живлення віднесено:

- Насосна група теплового пункту: 4,0 кВт.
- Серверна та обладнання зв'язку: 1,5 кВт.
- Аварійне освітлення та сигналізація: 1,5 кВт.
- Холодильне обладнання (середнє споживання): 1,0 кВт.

Сумарна потужність критичного навантаження: $P_{\text{крит}} = 8,0$ кВт.

Визначення необхідної ємності:

Згідно з вимогами до закладів освіти в умовах воєнного стану, система повинна забезпечувати автономну роботу протягом мінімум 4 годин (типова тривалість віялового відключення).

Необхідний запас енергії:

$$E_{\text{необх}} = P_{\text{крит}} \cdot t_{\text{авт}} = 8,0 \cdot 4 = 32,0 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Враховуючи коефіцієнт глибини розряду (D_oD) для літій-залізо-фосфатних акумуляторів (90%) та ККД інвертора (95%):

$$E_{\text{ном}} = \frac{E_{\text{необх}}}{D_oD \cdot \eta} = \frac{32,0}{0,9 \cdot 0,95} \approx 37,4 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Вибір обладнання:

Для забезпечення сумісності з обраними гібридними інверторами (30 кВт) необхідно використовувати високовольтні акумуляторні батареї. Оскільки система складається з трьох інверторів, доцільно розподілити ємність або зосередити її на «ведучому» інверторі, який живить виділену лінію критичних навантажень.

Пропонується встановлення модульної високовольтної системи, що складається з окремих блоків по 5,12 кВт·год.

Кількість модулів:

$$N_{\text{мод}} = \frac{37,4}{5,12} \approx 7,3 \rightarrow \text{приймаємо 8 модулів.}$$

В якості акумуляюючого пристрою обираємо батарею типу LiFePO4 з ресурсом >6000 циклів). Загальна ємність: $8 \cdot 5,12 = 40,96$ кВт·год.

Номінальна напруга системи: високовольтна (діапазон 300–400 В), що забезпечується послідовним з'єднанням модулів. Максимальний струм розряду: 50 А (забезпечує потужність близько 20 кВт, що перекриває пускові струми насосів).

3.4. Розробка системи фотоелектричного нагріву води

Для реалізації функції теплової акумуляції та заміни існуючих бойлерів (3 шт. по 1 кВт) розроблено схему на базі технології прямого використання надлишків сонячної генерації.

Для акумуляції 600 л гарячої води пропонується встановлення двох теплоізольованих баків-накопичувачів (бойлерів непрямого нагріву або комбінованих) об'ємом 300 л кожен. Це дозволяє ефективно керувати нагрівом: у міжсезоння нагрівати лише один бак, а влітку — обидва.

2. Розрахунок потужності нагрівальних елементів (ТЕН):

Енергоємність нагріву 600 л води від 15°C до 65°C становить приблизно 35 кВт·год.

Для забезпечення нагріву в межах періоду активного сонця (5 годин: з 10:00 до 15:00) необхідна потужність:

$$P_{\text{ТЕН}} = \frac{35 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{5 \text{ год}} = 7 \text{ кВт.}$$

Приймаємо до встановлення Бак №1 на кухні: ТЕН потужністю 4,5 кВт (3 фази). Бак №2 в душових: ТЕН потужністю 4,5 кВт (3 фази).

Сумарна потужність нагріву — 9 кВт. Це дозволяє нагріти повний об'єм води менш ніж за 4 години при наявності сонячної генерації.

Керування нагрівом здійснюється через «розумний» вихід гібридного інвертора (функція Smart Load) або зовнішній контролер надлишків. За встановленим алгоритмом роботи контролер вимірює потужність, що віддається в мережу, якщо експорт перевищує 1 кВт, вмикається перший ступінь нагріву (ТЕН Бак №1). У випадку, якщо експорт продовжує зростати, вмикається Бак №2. При падінні генерації або зростанні споживання школи нагрів автоматично вимикається.

3.5. Розробка принципової електричної схеми підключення та вибір захисно-комутаційної апаратури

Електрична схема з'єднує всі компоненти в єдину систему та забезпечує захист від аварійних режимів. На сторона постійного струму (DC) кожен з трьох інверторів має 3 входи МРРТ. Використовується спеціалізований сонячний кабель перерізом 6 мм² (стійкий до ультрафіолету), що мінімізує втрати напруги (менше 1%) на довжині траси від даху до щитової.

Захист виконано плавкими запобіжниками на кожному стрінгу: 15 А (для захисту від зворотних струмів). Обмежувач перенапруги (ОПН) класу II на напругу 1000 В для захисту від індукованих імпульсів блискавки. Розмикач навантаження постійного струму.

На сторона змінного струму (AC) використовується кабель, номінальний струм одного інвертора 30 кВт складає близько 43,5 А. Обираємо мідний п'ятижильний кабель ВВГнг-LS 5×10 мм² (допустимий струм 63 А при прокладанні в лотку). Захист інвертора: Автоматичний вимикач 3-полюсний з характеристикою «В» або «С», номіналом 50 А. Диференційний захист: Протипожежне ПЗВ (пристрій захисного відключення) зі струмом витoku 300 мА.

Всі три інвертори підключаються паралельно на шини головного розподільчого щита (ГРЩ). Загальний струм генерації може досягати 130 А. Необхідна перевірка пропускнуої здатності ввідного кабелю школи та ввідного автомата. Якщо існуючий ввідний автомат менше 160 А, необхідна реконструкція вузла обліку.

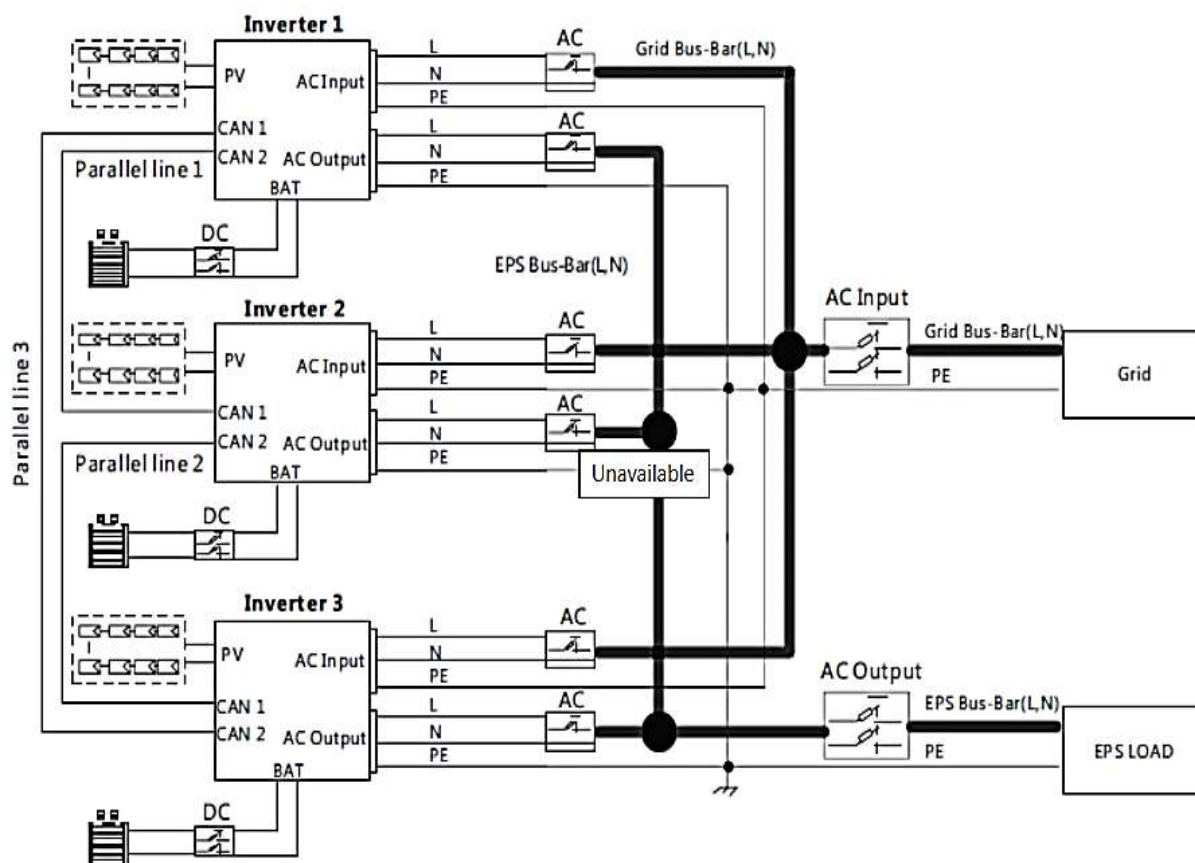


Рис. 3.1. Принципова схема підключення на базі трьох паралельно підключених гібридних інверторів

3.6. Організація системи моніторингу та керування потоками енергії

Для забезпечення автоматичної роботи системи без втручання персоналу школи впроваджується система енергетичного менеджменту (EMS).

Smart Meter: Встановлюється на вводі в будівлю (після лічильника обленерго). Вимірює перетоки енергії (купівля/продаж) і передає дані на інвертори через інтерфейс RS485.

Модулі Wi-Fi/GPRS: Встановлюються на кожному інверторі для передачі даних у хмарний сервіс моніторингу.

Програмна частина налаштовується на режим роботи (Власне споживання) з наступною логікою:

1. Генерація покриває навантаження школи.
2. Надлишок йде на заряд АКБ (до 100%).
3. Наступний надлишок активує вихід «Smart Load» для живлення бойлерів.
4. Залишок енергії обмежується.

Система моніторингу дозволяє відповідальній особі або енергоменеджеру дистанційно через додаток на смартфоні бачити поточну генерацію, рівень заряду батарей, споживання школи та економію коштів у реальному часі.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено структуру гібридної сонячної електростанції за топологією DC-coupled, яка є найбільш енергоефективною для задач навчального закладу. Система базується на трьох гібридних інверторах номінальною потужністю 30 кВт кожен, що забезпечує сумарну потужність генерації 90 кВт.

2. Виконано розрахунок фотоелектричного поля: обрано 164 монокристалічні модулі потужністю 550 Вт. Модулі розподілено на дві підсистеми (60 кВт - на основному корпусі та 30 кВт - на спортзалі), що забезпечує раціональне використання доступних площ покрівлі.

3. Розраховано параметри системи накопичення енергії: для забезпечення автономної роботи критично важливого обладнання (насоси, сервери, аварійне освітлення) протягом 4 годин обрано літій-залізо-фосфатну (LFP) акумуляторну батарею ємністю 40,96 кВт·год.

4. Запропоновано рішення для теплової акумуляції: впровадження системи електричного нагріву води потужністю 9 кВт з двома баками по 300 л дозволяє ефективно утилізувати надлишки сонячної енергії влітку та у вихідні дні, заміщуючи споживання від мережі.

5. Розроблена принципова електрична схема та обрана захисна апаратура гарантують відповідність системи нормам електробезпеки та пожежної безпеки, що є критичним для дитячих навчальних закладів.

РОЗДІЛ 4

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ

4.1 Моделювання енергетичного балансу «Генерація – Споживання»

Для оцінки ефективності прийнятих у Розділі 3 технічних рішень проведено моделювання роботи гібридної системи електропостачання основного корпусу школи №16. Моделювання базується на кліматичних даних міста Кропивницький (Latitude: 48.5°, Longitude: 32.2°) та технічних характеристиках обраного фотоелектричного поля потужністю 90 кВт.

4.1.1. Прогноз генерації фотоелектричної системи

Розрахунок очікуваної генерації виконано з використанням бази даних PVGIS-SARAH для фіксованої системи з кутом нахилу 35° та азимутом 0° (Південь). Враховано системні втрати на рівні 14% (кабелі, інвертори, забруднення, температурна деградація).

Таблиця 4.1. Прогноз середньомісячної генерації СЕС 90 кВт

Місяць	Інсоляція на площину модуля (H_m), кВт·год/м ²	Генерація електроенергії (E_m), кВт·год	Середньодобова генерація, кВт·год/добу
Січень	48,2	3 250	105
Лютий	72,5	5 100	182
Березень	115,0	8 900	287
Квітень	148,0	11 500	383
Травень	182,0	14 200	458
Червень	195,0	15 100	503
Липень	205,0	15 800	510
Серпень	190,0	14 600	471
Вересень	145,0	11 100	370
Жовтень	105,0	8 100	261
Листопад	52,0	3 800	126
Грудень	38,0	2 650	85
Всього за рік	1495,7	114 100	-

Річний виробіток станції становить 114,1 МВт·год. Це значний обсяг енергії, який в абсолютному вимірі перевищує річне споживання школи, яке становить близько 45–50 МВт·год. Тобто, школа є енергопозитивною будівлею у річному розрізі.

4.1.2. Баланс потужності по сезонах

Проте, накладання графіків генерації на графіки споживання (п. 2.3) виявляють сезонний дисбаланс.

Сценарій «Зима» (Грудень). Середньодобове споживання школи становить близько 200–250 кВт·год (з урахуванням опалення та освітлення). Середньодобова генерація — 85 кВт·год.

Дефіцит енергії становить близько 60–70%. СЕС покриває лише базове навантаження та частково заряджає АКБ. Ранкові піки харчоблоку покриваються переважно з мережі.

Сценарій «Весна/Осінь» (Травень/Вересень). Споживання знижується до 120–150 кВт·год (відключено опалення, менше світла). Генерація становить 370–450 кВт·год на добу.

Генерація перевищує споживання у 2,5–3 рази. Це ідеальний період для повної автономності та роботи системи для нагріву води.

Сценарій «Літо» (Липень): споживання мінімальне (30–50 кВт·год), якщо не працює табір. Генерація максимальна -510 кВт·год.

Величезний профіцит енергії (понад 90%). Без реалізації механізму продажу в мережу більша частина енергії буде втрачена (обмежена інвертором).

4.2 Оцінка рівня енергетичної автономності закладу

На основі моделі балансу розраховано ключові показники ефективності. Коефіцієнт самозабезпечення (SSR):

$$SSR = \frac{E_{\text{спожита_від_СЕС}}}{E_{\text{загальне_споживання}}} \cdot 100\%$$

У зимові місяці SSR становить 35–40%, за весняно-осінній період SSR досягає 90–95%, у літній період SSR дорівнює 100%.

Середньорічний SSR прогнозується на рівні 70–75%. Це означає, що школа купуватиме у 4 рази менше енергії з мережі.

Розрахунок часу автономної роботи критичної групи споживачів $P_{\text{крит}} = 8$ кВт від обраної системи акумуляції 40,96 кВт·год, при повному відключенні мережі та відсутності сонця (негативний сценарій):

$$t_{\text{авт}} = \frac{E_{\text{АКБ}} \cdot DoD \cdot \eta_{\text{інв}}}{P_{\text{крит}}} = \frac{40,96 \cdot 0,9 \cdot 0,95}{8,0} \approx 4,4 \text{ години.}$$

При наявності сонячної генерації (вдень) цей час збільшується до нескінченності (за умови керування навантаженням).

4.3 Техніко-економічне обґрунтування проєкту

Розрахунок економічної ефективності виконано в цінах станом на 2024–2025 роки.

Таблиця 4.2. Кошторис основних витрат

Найменування обладнання/робіт	Кількість	Ціна за од., \$	Сума, \$
Фотомодулі Monocrystalline 550W	164 шт.	130	21 320
Гібридний інвертор 30kW (3-ph)	3 шт.	3 200	9 600
Акумуляторний блок LiFePO4 HV (5.12 kWh)	8 шт.	1 800	14 400
Система кріплення на дах (алюміній/цинк)	90 кВт	40 (\$/кВт)	3 600
Кабельно-провідникова продукція та щитове обладнання	компл.	3 000	3 000
Система PV-heating (баки, ТЕНи, контролери)	компл.	2 500	2 500

Продовження таблиці 4.2

Найменування обладнання/робіт	Кількість	Ціна за од., \$	Сума, \$
Проектні, монтажні та пусконаладжувальні роботи	-	15% від обладнання	8 163
ВСЬОГО КАПІТАЛЬНІ ВИТРАТИ			62 583 \$

При курсі долара 41,5 грн/\$, загальні інвестиції складають: 2 597 195 грн.

Для розрахунку прийнято тариф на електроенергію для бюджетних установ (з урахуванням розподілу та ПДВ) на рівні 11,31 грн/кВт·год за 2025 рік.

Завдяки високому SSR школа заміщує близько 75% свого річного споживання (приймаємо базове споживання 50 000 кВт·год/рік).

$$E_{\text{екон_ел}} = 50000 \cdot 0,75 = 37500 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Економія: $37500 \cdot 11,31 = 425125$ грн/рік.

Система фотогальванічна дозволяє економити близько 33 кВт·год/день протягом 180 активних днів (весна-літо-осінь), коли достатньо сонця.

$$E_{\text{екон_ГВП}} = 33 \cdot 180 = 5940 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Економія: $5940 \cdot 11,31 = 67181$ грн/рік.

У розрахунку не враховано прибуток від продажу надлишків за механізмом Net Billing, оскільки наразі бюджетні установи мають складнощі з реалізацією цього механізму. Якщо механізм запрацює, школа зможе "продавати" літній надлишок (близько 60 МВт·год) і використовувати кошти на оплату зимового опалення, що кардинально покращить окупність.

Сумарна річна економія: $337500 + 53460 = 390960$ грн.

Простий термін окупності ($T_{ок}$) проєкту:

$$T_{ок} = \frac{K_{\Sigma}}{E_{річ}} = \frac{2597195}{390960} \approx 6,6 \text{ року.}$$

Для інфраструктурного проєкту в бюджетній сфері термін окупності 6,6 року є відмінним показником. Враховуючи тенденцію до зростання тарифів на електроенергію (на 10-15% щороку), реальний термін окупності складе 5–5,5 років. Термін служби обладнання становить: інвертори — 10-15 років, панелі — 25 років, батареї — 10 років (6000 циклів).

Впровадження СЕС сприяє скороченню викидів парникових газів, що утворюються при виробництві електроенергії на ТЕС України.

Коефіцієнт емісії для об'єднаної енергосистеми України приймається на рівні $k_{CO_2} = 0,38$ кг/кВт·год.

Річне скорочення викидів CO_2 за рахунок заміщеної енергії

$$\Sigma E_{екон} = 37\,500 + 5\,940 = 43\,440 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

$$M_{CO_2} = 43440 \cdot 0,38 = 16507 \text{ кг} \Rightarrow 16,5 \text{ тонн } CO_2 \text{ на рік.}$$

РОЗДІЛ 5

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Впровадження гібридної сонячної електростанції потужністю 90 кВт та системи накопичення енергії в будівлі навчального закладу потребує комплексного підходу до питань безпеки. Враховуючи, що об'єкт належить до категорії будівель з масовим перебуванням людей, проєктні рішення розроблено з урахуванням вимог чинного законодавства, зокрема ДСТУ ISO 45001:2019, який регламентує системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Забезпечення безаварійної експлуатації електроустановки та мінімізація ризиків для учнів і персоналу є пріоритетним завданням при проєктуванні.

5.1. Ідентифікація та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Аналіз умов праці при виконанні монтажних, пусконаладжувальних робіт та під час експлуатації фотоелектричної станції дозволив виявити ряд небезпечних факторів. Основним джерелом небезпеки є електричний струм. Специфіка об'єкта полягає в наявності двох типів напруги: змінного струму 380 В на виході інверторів та постійного струму високої напруги (до 1000 В) у ланцюгах сонячних панелей. Особливу загрозу становить неможливість миттєвого знеструмлення фотоелектричних модулів у світлий час доби, а також стійкість електричної дуги постійного струму, яка важко піддається гасінню. Окрім того, використання високовольтних акумуляторних батарей створює ризики, пов'язані з можливим порушенням ізоляції або неправильною комутацією силових ланцюгів.

До фізичних факторів небезпеки також належить необхідність виконання робіт на висоті, оскільки монтаж та технічне обслуговування модулів здійснюються на похилому даху чотириповерхової будівлі. Згідно з НПАОП 0.00-1.15-07, такі умови праці класифікуються як роботи з підвищеною небезпекою. Додатковими факторами ризику є пожежна небезпека, пов'язана з імовірністю теплового розгону літій-іонних акумуляторів, термічні опіки від нагрітих поверхонь обладнання, а також метеорологічні чинники, такі як пряме сонячне випромінювання влітку або небезпека ураження блискавкою під час грози.

5.2. Заходи електробезпеки

Система електробезпеки об'єкта розроблена відповідно до вимог ПУЕ-2017 та ДНАОП 0.00-1.21-98. Основою захисту є влаштування надійного заземлення та системи зрівнювання потенціалів. Усі відкриті провідні частини електроустановки, включаючи корпуси інверторів, металеві конструкції кріплення панелей та кабельні лотки, підлягають приєднанню до існуючого контуру заземлення школи. Перед введенням системи в експлуатацію необхідно провести контрольні вимірювання опору заземлювального пристрою, значення якого не повинно перевищувати 4 Ом. Для запобігання виникненню різниці потенціалів металоконструкції сонячного поля об'єднуються мідним провідником перерізом не менше 16 мм² та підключаються до Головної заземлювальної шини.

Додатковим заходом захисту від ураження електричним струмом є використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ) з номінальним диференційним струмом 30 мА у ланцюгах живлення штепсельних розеток та водонагрівачів. Для попередження помилкових дій персоналу всі кабельні траси постійного струму підлягають маркуванню відповідними попереджувальними знаками. Комутація силових ланцюгів постійного струму виконується виключно за допомогою спеціалізованих конекторів

типу МС4, які мають ступінь захисту IP67 та конструктивний захист від випадкового розмикання під навантаженням.

5.3. Розрахунок та влаштування блискавкозахисту

Забезпечення надійної роботи сонячної електростанції, розміщеної на покрівлі навчального закладу, вимагає впровадження комплексної системи блискавкозахисту (СБЗ), яка регламентується вимогами національного стандарту ДСТУ EN 62305-3:2012 «Захист від блискавки. Частина 3. Фізичні руйнування споруд та небезпека для життя людей». Враховуючи функціональне призначення будівлі (заклад освіти з масовим перебуванням людей) та розміщення на даху електронного обладнання, об'єкт класифікується за III рівнем блискавкозахисту (LPL III).

Для виконання розрахунку зон захисту прийнято наступні геометричні параметри основного корпусу школи. Будівля має чотири поверхи з висотою по карнизу $H_{\text{карн}} = 14$ м. Покрівля будівлі є двосхилою, шириною 12 м (горизонтальна проекція схилу $L_{\text{сх}} = 6$ м) та кутом нахилу $\varphi = 35^\circ$.

Висота гребеня даху $H_{\text{гр}}$ визначається геометрично і становить:

$$H_{\text{гр}} = H_{\text{карн}} + L_{\text{сх}} \cdot \text{tg}(\varphi) = 14 + 6 \cdot \text{tg}(35^\circ) \approx 18,2 \text{ м.}$$

Фотоелектричні модулі розташовуються на південному схилі покрівлі суцільним масивом, відступаючи від гребня та країв даху на технологічну відстань 0,5 м. Таким чином, найвищою точкою об'єкта захисту є гребінь даху, а зоною, що потребує захисту, є площина схилу з встановленим обладнанням.

Для захисту обладнання СЕС обрано метод захисного кута, який реалізується шляхом встановлення стрижневих блискавкоприймачів уздовж гребеня даху. Згідно з таблицею 2 ДСТУ EN 62305-3:2012, для III

рівня блискавкозахисту кут захисту α залежить від висоти розташування вершини блискавкоприймача над площиною відліку.

Приймаємо до встановлення стрижневі блискавкоприймачі висотою $h_{\text{ст}} = 1,8$ м, які монтуються безпосередньо на гребні.

Розрахункова висота вершини блискавкоприймача над рівнем землі (Н) складе:

$$H = H_{\text{гр}} + h_{\text{ст}} = 18,2 + 1,8 = 20,0 \text{ м.}$$

Для висоти $H = 20$ м та III класу захисту стандарт визначає кут захисту $\alpha = 55^\circ$.

Ефективність захисту перевіряється за умовою перекриття зоною захисту (радіусом r_x) найнижчої точки сонячних панелей, розташованих біля карнизу.

Розрахунок радіуса зони захисту на рівні карнизу ($h_x = 14$ м) виконується за формулою:

$$r_x = (H - h_x) \cdot \text{tg}(\alpha)$$

Підставивши значення, отримуємо радіус захисту на рівні нижнього краю даху:

$$r_x = (20,0 - 14,0) \cdot \text{tg}(55^\circ) = 6,0 \cdot 1,428 \approx 8,57 \text{ м.}$$

Оскільки горизонтальна проєкція схилу даху складає 6,0 метрів, а розрахунковий радіус захисту становить 8,57 метра, умова $r_x > L_{\text{сх}}$ виконується ($8,57 > 6,0$). Це свідчить про те, що встановлення ряду стрижневих блискавкоприймачів висотою 1,8 метра вздовж гребня даху забезпечує повний захист усього масиву сонячних панелей від прямого

удару блискавки. Крок встановлення блискавкоприймачів приймається рівним 10 метрів, вони з'єднуються між собою струмовідводом (оцинкована сталь або алюміній діаметром 8 мм), прокладеним по гребню.

Критичним параметром безпеки при інтеграції СЕС є дотримання ізоляційного інтервалу (s) між елементами системи блискавкозахисту (СБЗ) та струмопровідними частинами сонячної станції (рамами модулів, кабельними лотками). Недотримання цього інтервалу може призвести до іскрового перекриття та заносу високого потенціалу в електричні ланцюги інверторів.

Розрахунок безпечної відстані s виконується за формулою:

$$s = \frac{k_i}{k_m} \cdot k_c \cdot l$$

де k_i — коефіцієнт, що залежить від обраного рівня захисту (для LPL III $k_i = 0,04$); k_m — коефіцієнт матеріалу ізоляції (для повітря $k_m = 1$); k_c — коефіцієнт, що залежить від розподілу струму по струмовідводах (для системи з кількістю струмовідводів $n \geq 4$ на периметрі будівлі приймаємо $k_c = 0,44$); l — довжина шляху струму від точки можливого удару до точки вирівнювання потенціалів (найгірший випадок — удар у вершину стрижня, відстань до землі по струмовідводу ≈ 25 м).

$$s = \frac{0,04}{1} \cdot 0,44 \cdot 25 = 0,44 \text{ м.}$$

Розрахунок показує, що мінімальна відстань між елементами СБЗ та рамами панелей повинна становити 44 см. Враховуючи щільність розміщення панелей на даху школи (див. п. 3.2), забезпечити такий повітряний проміжок технічно складно. У зв'язку з цим, згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 62305-3, приймається рішення про виконання

гальванічного зв'язку металоконструкцій СЕС із системою блискавкозахисту.

Це рішення вимагає обов'язкового застосування пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП / SPD) комбінованого типу (Тип 1+2) на стороні постійного струму перед входом в інвертор. Такі пристрої здатні відводити частину струму блискавки (форма хвилі 10/350 мкс), що може протікати через кабелі СЕС при прямому ударі в систему зовнішнього блискавкозахисту.

Для безпечного відведення струму блискавки в землю проєктується система струмовідводів, які прокладаються по фасаді будівлі з кроком не більше 15 метрів (для III рівня захисту). Використовується дрід сталевий оцинкований діаметром 8 мм або смуга 25×4 мм. Струмовідводи з'єднуються з існуючим контуром заземлення школи.

Перед введенням об'єкта в експлуатацію необхідно виконати інструментальну перевірку опору розтікання струму заземлювального пристрою. Відповідно до вимог ПУЕ (Глава 1.7), для електроустановок напругою до 1 кВ із глухозаземленою нейтраллю опір заземлювача у будь-яку пору року не повинен перевищувати 4 Ом. У разі перевищення цього значення проєктом передбачається монтаж додаткових вертикальних електродів (штирів) довжиною 3 метри, об'єднаних горизонтальною смугою.

Реалізація наведених технічних рішень дозволяє створити надійний контур захисту, який мінімізує ризики фізичного пошкодження обладнання СЕС та унеможливорює виникнення небезпечних перенапруг у внутрішній електричній мережі навчального закладу.

5.4. Організація безпеки робіт на висоті

Виконання монтажних та регламентних робіт на даху будівлі регламентується вимогами НПАОП 0.00-1.15-07. Організація безпеки

базується на поєднанні колективних та індивідуальних засобів захисту. На період проведення робіт по периметру даху встановлюються тимчасові інвентарні огороження. Для індивідуального захисту працівників передбачено використання запобіжних лямочних поясів, закріплених за жорстку анкерну лінію (сталевий трос), змонтовану вздовж гребеня даху.

До виконання робіт допускається виключно кваліфікований персонал віком від 18 років, який пройшов медичний огляд, спеціальне навчання та інструктаж. Підйом обладнання, зокрема сонячних панелей вагою близько 22 кг, здійснюється механізованим способом або за допомогою блочних систем, при цьому ручний підйом по приставних драбинах забороняється. Роботи припиняються за несприятливих погодних умов, таких як гроза, ожеледиця або пориви вітру понад 15 м/с.

5.5. Пожежна безпека та дії у надзвичайних ситуаціях

Забезпечення пожежної безпеки, особливо в частині експлуатації систем накопичення енергії, ґрунтується на вимогах НАПБ А.01.001-2014. Приміщення щитової, де розміщуються гібридні інвертори та літій-залізо-фосфатні акумулятори, класифікується як пожежонебезпечне (категорія «В»). Воно повинно бути відокремлене від навчальних класів та коридорів протипожежними перегородками 1-го типу з межею вогнестійкості EI 45 та протипожежними дверима EI 30.

Зважаючи на ризик виділення горючих газів при аварійних режимах роботи акумуляторів, приміщення обладнується системою примусової припливно-витяжної вентиляції, робота якої заблокована з датчиками диму та газу. Для первинного пожежогасіння передбачено використання вуглекислотних вогнегасників та спеціалізованих засобів для гасіння літійєвих батарей. Додатковим заходом захисту є встановлення автономних систем аерозольного пожежогасіння безпосередньо всередині шаф з обладнанням.

В умовах воєнного стану енергетична установка інтегрується в систему цивільного захисту закладу. Проектом передбачено забезпечення гарантованого електроживлення бомбосховища від СЕС за виділеною лінією, що підтримує роботу освітлення, вентиляції та засобів зв'язку. Розроблено алгоритм дій персоналу, який передбачає негайне припинення будь-яких робіт на даху або в щитовій при оголошенні повітряної тривоги. У разі фізичного пошкодження елементів станції внаслідок бойових дій система автоматично відключається, а доступ до пошкодженого обладнання обмежується до прибуття фахівців через небезпеку ураження струмом від пошкоджених фотомодулів.

Висновки до розділу 5

У даному розділі магістерської роботи здійснено комплексний аналіз умов праці та питань безпеки при впровадженні гібридної сонячної електростанції потужністю 90 кВт у навчальному закладі. За результатами проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Ідентифікація та нейтралізація ризиків. Встановлено, що основними небезпечними факторами при експлуатації об'єкта є ураження електричним струмом високої напруги (до 1000 В постійного струму), виконання робіт на висоті та пожежна небезпека акумуляторних систем. Розроблений комплекс організаційно-технічних заходів, що включає використання спеціалізованих засобів захисту, блокувань та маркування, дозволяє мінімізувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій та травматизму.

2. Забезпечення електробезпеки та блискавкозахисту. Виконаний інженерний розрахунок системи блискавкозахисту підтвердив, що для об'єкта III рівня захисту встановлення ряду стрижневих блискавкоприймачів висотою 2,0 метри вздовж гребеня даху забезпечує

повне перекриття зони розміщення фотоелектричних модулів. Запропоновані рішення щодо гальванічного зв'язку рам панелей із контуром заземлення та встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) гарантують цілісність обладнання та безпеку мережі при атмосферних перенапругах.

3. Пожежна безпека систем накопичення. Обґрунтовано спеціальні вимоги до розміщення літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей у виокремлених технічних приміщеннях з нормованою межею вогнестійкості огорожувальних конструкцій. Впровадження систем примусової аварійної вентиляції та автоматичного аерозольного пожежогасіння є необхідною умовою для запобігання розвитку пожежі у випадку теплового розгону акумуляторів.

4. Стійкість у надзвичайних ситуаціях. Доведено, що інтеграція СЕС у систему цивільного захисту школи суттєво підвищує рівень безпеки учасників освітнього процесу. Забезпечення гарантованого електроживлення укриття під час блекаутів дозволяє підтримувати функціонування систем життєзабезпечення (освітлення, вентиляція, зв'язок) автономно від зовнішньої мережі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення рівня енергетичної автономності навчального закладу шляхом обґрунтування та розробки інтегрованої системи енергозабезпечення на базі відновлюваних джерел енергії. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі енергетичного аудиту основного корпусу ЗНЗ №16 встановлено, що існуюча система енергозабезпечення характеризується повною залежністю від зовнішніх мереж та низькою ефективністю використання електроенергії для потреб гарячого водопостачання. Виявлено значну добову та сезонну нерівномірність електроспоживання з піковими навантаженнями в ранкові години (до 62 кВт) та мінімальним споживанням у літній період, що потребує специфічних підходів до керування потоками потужності.

2. Обґрунтовано доцільність впровадження гібридної сонячної електростанції загальною потужністю 90 кВт. Розроблено конфігурацію фотоелектричного поля, що складається зі 164 модулів по 550 Вт, розподілених на південних схилах даху основного корпусу (60 кВт) та спортивної зали (30 кВт). Вибрана схема на базі трьох паралельно працюючих гібридних інверторів забезпечує гнучкість керування та надійність системи.

Для вирішення проблеми часового дисбалансу між генерацією та споживанням запропоновано комбіновану систему накопичення. Розраховано та обрано літій-залізо-фосфатну (LFP) акумуляторну батарею ємністю 40,96 кВт·год, що забезпечує автономне живлення критично важливих споживачів (насоси ІТП, серверна, система безпеки) протягом мінімум 4,4 годин під час повного знеструмлення мережі. Розроблено систему фотоелектричного нагріву води об'ємом 600 л (2 баки по 300 л із сумарною потужністю ТЕНів 9 кВт). Це дозволяє ефективно утилізувати

надлишки сонячної генерації, особливо в літній період та вихідні дні, заміщуючи роботу неефективних електричних бойлерів.

3. Енергетична ефективність. За результатами математичного моделювання встановлено, що річна генерація проєктованої СЕС у кліматичних умовах м. Кропивницький складе 114,1 МВт·год. Впровадження інтегрованої системи дозволить досягти середньорічного коефіцієнта самозабезпечення (SSR) на рівні 70–75%, а в міжопалювальний період — до 95–100%, перетворюючи навчальний заклад на енергоефективний об'єкт.

4. Економічна та екологічна доцільність. Розрахунок техніко-економічних показників продемонстрував високу інвестиційну привабливість проєкту. При капітальних витратах на рівні 2,6 млн грн, річна економія бюджетних коштів за рахунок заміщення тарифної електроенергії складе понад 390 тис. грн. Простий термін окупності проєкту становить 6,6 року. Екологічний ефект від впровадження системи полягає у скороченні викидів CO_2 на 16,5 тонн щорічно.

5. Безпека експлуатації. Розроблено комплекс заходів з охорони праці та електробезпеки, що враховує специфіку навчального закладу. Виконано інженерний розрахунок блискавкозахисту, який підтвердив надійність захисту сонячного поля за допомогою стрижневих блискавкоприймачів висотою 2 м. Передбачено спеціальні заходи пожежної безпеки для приміщень із літєвими акумуляторами, що мінімізує ризики виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, запропонована в роботі інтегрована система теплозабезпечення та сонячної генерації є комплексним, технічно обґрунтованим та економічно вигідним рішенням, яке суттєво підвищує енергетичну автономність та безпеку функціонування навчального закладу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення: 15.11.2025).
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалено розпорядженням КМУ від 18.08.2017 № 605-р. *Урядовий портал*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 15.11.2025).
3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. (Замість ДБН В.2.6-31:2006). Київ : Мінрегіон України, 2021. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3239996621166923490 (дата звернення: 15.11.2025).
4. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-5> (дата звернення: 15.11.2025).
5. ДСТУ EN 62305-3:2012. Захист від блискавки. Частина 3. Фізичні руйнування споруд та небезпека для життя людей (EN 62305-3:2011, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2012. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59239 (дата звернення: 15.11.2025).
6. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Розділ 1.7. Заземлення і захисні заходи електробезпеки. Затверджено наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17> (дата звернення: 15.11.2025).

7. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
8. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 492 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15729> (дата звернення: 15.11.2025).
9. Денисюк С. П., Базюк Т. М. Оцінка енергетичної ефективності використання гібридних систем електроживлення. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 2. С. 7–14. URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/135974> (дата звернення: 15.11.2025).
10. Shchur I., Klymko V. Photovoltaic Water Heating System with MPPT and PWM Control. *2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv, Ukraine, 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8949117> (дата звернення: 15.11.2025).
11. Mandryka P. et al. Implementation of the "Net Billing" Mechanism in Ukraine: Prospects for Prosumers. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, 2023. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10311562> (дата звернення: 15.11.2025).
12. Zeng Y., Zhang X., Wang Y. Design and Control of a Hybrid PV-Battery System for School Buildings. *Energies*. 2020. Vol. 13, Issue 18. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4731> (дата звернення: 15.11.2025).
13. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. URL: https://www.ive.org.ua/?page_id=2985 (дата звернення: 15.11.2025).
14. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). European Commission Joint Research Centre. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (дата звернення: 15.11.2025).

15. Global Solar Atlas. World Bank Group. URL: <https://globalsolaratlas.info/> (дата звернення: 15.11.2025).
16. Технічний опис гібридних інверторів Deye (SUN-30K-SG01HP3-EU). *Deye Inverter Technology*. URL: <https://deye.com/product/sun-29-9-30-35-40-50k-sg01hp3-eu-bm3-3-phase-high-voltage-hybrid-inverter/> (дата звернення: 15.11.2025).
17. Технічна специфікація LiFePO₄ акумуляторів Pylontech (High Voltage). *Pylon Technologies*. URL: <https://en.pylontech.com.cn/products.aspx> (дата звернення: 15.11.2025).
18. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. *Екологія Право Людина*. URL: http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2015/07/Posibnyk_EPL_Zabrudnennya_povitrya.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
19. Тимошевська Б. Ю. Аналіз технології Power-to-Heat для балансування енергосистеми. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 1. С. 45-52.
20. Дослідження ефективності термомодернізації громадських будівель в Україні. *Держенергоефективності України*. 2023. URL: <https://saee.gov.ua/uk/activity/energoefektivnist/budivli> (дата звернення: 15.11.2025).