

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри енергетики  
та електротехнічних систем

---

доцент Чепіжний А.В.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Підвищення надійності електропостачання  
об'єктів інфраструктури Сумського державного  
педагогічного університету ім. А. С. Макаренка з  
використанням геліопанелей»

Виконав

\_\_\_\_\_ (підпис)

Марченко А. Ю.  
(прізвище, ініціали)

Група

З ЕТЕ 2301 м

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Козін В. М.  
(прізвище, ініціали)

**Суми – 2025**

**завдання** на дипломну (магістерську) роботу

## АНОТАЦІЯ

## ЗМІСТ

С.

ЗАВДАННЯ	
АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Надійність електропостачання.....	8
1.2 Методи підвищення надійності електропостачання.....	10
1.3 Переваги і недоліки сонячних електростанцій.....	13
1.4 Технології сонячних панелей.....	16
1.5 Основні відомості про об'єкт.....	21
1.6 Географічне розташування та характеристики місцевості.....	23
1.7 Висновки з розділу 1.....	32
2 ПРОЄКТУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	33
2.1 Розрахунок споживання електроенергії за укрупненими показниками.....	33
2.2 Розрахунок споживання електроенергії за уточненими показниками.....	37
2.3 Розрахунок гібридної сонячної електростанції.....	41
2.4 Висновки з розділу 2.....	64
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	65
3.1 Капітальні затрати.....	65
3.2 Експлуатаційні затрати.....	67
3.3 Річний фонд зарплатні.....	68
3.4 Затрати на техобслуговування, поточний ремонт мереж і обладнання.....	69
3.5 Інші затрати.....	69
3.6 Вартість генерації електричної енергії.....	70
3.7 Визначення річної економії від впровадження гібридної СЕС.....	71
3.8 Визначення річної економії від впровадження мережевої СЕС.....	71

3.9 Висновки з розділу 3.....	73
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	75
4.1 Вимоги безпеки під час використання сонячних батарей.....	75
4.2 Інструктаж з охорони праці, стажування (дублювання).....	79
4.3 Висновки з розділу 4.....	77
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Електропостачання будь-якого об'єкту, незалежно від його призначення, відомчої приналежності і форми власності, має бути, у першу чергу, надійним, якісним і безпечним. Багато у чому ці показники залежать від професіоналізму фахівців, які здійснюють проектування, якості обладнання, електромонтажних робіт, а також від постачальника електроенергії або автономних її джерел. Менше з тим, останні роки показали, що на якість та надійність електропостачання також впливають зовнішні чинники, незалежні ані від енергопостачальної компанії, ані від самої енергетичної системи, ані від об'єкта-електроприймача, і пов'язані вони із впливами непереборної дії, наприклад, військовими діями. У зв'язку з цим актуальним є завдання підтримання надійності електропостачання об'єктів з метою забезпечення їх ефективної діяльності.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є визначення оптимальних параметрів елементів сонячної електростанції (СЕС) як автономного резервного джерела живлення об'єктів інфраструктури Сумського державного педагогічного університету ім. А. С. Макаренка.

Для виконання поставленої мети поставлено такі задачі:

- аналіз факторів, що впливають на надійність електропостачання;
- вивчення підходів до технологій виготовлення сонячних батарей;
- аналіз потенціалу інсоляції території розміщення СЕС;
- розрахунок і проектування СЕС із підбором необхідного обладнання;
- визначення та обґрунтування економічної доцільності використання СЕС;
- аналіз вимог безпеки під час використання сонячних батарей.

**Об'єктом дослідження** є електрична мережа адміністративних будівель Сумського державного педагогічного університету ім. А. С. Макаренка.

**Предметом дослідження** є технічні заходи для забезпечення надійного електропостачання об'єктів інфраструктури навчального закладу.

**Методи дослідження.** Використовуються аналітичні методи математичного моделювання із подальшим аналізом отриманих результатів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наданні практичних рекомендацій щодо підвищення надійності електропостачання закладу освіти в умовах періодичних аварійних відключень зовнішнього електроживлення, що дозволить забезпечити безперебійну роботу закладу через впровадження СЕС як резервного джерела живлення. Застосування СЕС дозволить скоротити викиди шкідливих речовин у атмосферу.

**Апробація роботи.** Основні положення щодо сучасного стану і перспектив розвитку технологій виробництва геліопанелей доповідалися на VIII Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» 16–18 жовтня 2024 року на базі НУ «Львівська політехніка».

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури (38 найменувань).

Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки – 92 сторінки.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Надійність електропостачання

Питання надійності електростанцій, підстанцій, ліній електропередачі, мереж і систем є одними з ключових питань в енергетичній галузі.

В окремих енергосистемах кількість аварій сягає кількох десятків на рік, а річна кількість електроенергії, недоотриманої споживачами через аварії, досягає мільйонів кіловат-годин. Менше з тим, загальна потужність генераторів, що можуть одночасно не працювати через аварійні ремонти, обчислюється мільйонами кіловат. Оскільки частота відмов у системі живлення є досить високою, оцінка надійності окремих типів обладнання та установок, а також пошук шляхів підвищення надійності як у роботі, так і в конструкції стає головним пріоритетом.

З іншого боку, питання про оптимальний рівень надійності можна поставити після оцінки збитків, завданих споживачам через перебої в електропостачанні, збитків, пов'язаних із аварійним ремонтом, і витрат на покращення надійності.

Розроблення нових оригінальних машин, обладнання, ліній електропередачі, великих енергетичних об'єднань і комплексів потребує використання таких підходів до надійності, які дозволять використовувати дані досвіду експлуатації та експериментів, аналізу надійності, прогнозування надійності, катастрофічного впливу на людей і навколишнє середовище, що виключає можливість негативних наслідків аварій. Із розвитком нових енергетичних технологій питання надійності стають одними з найважливіших.

Відомо, що запровадженні нових енергетичних об'єктів, наприклад, АЕС або високовольтних ліній електропередачі, виявляють та усувають причини ненадійності обладнання та систем. Більшість цих причин пояснюється недоліками розробки конструкції, в яких недостатньо уваги приділялося аналізу та оцінці надійності.

Забезпечення надійності в електроенергетичній галузі пов'язані із практичними завданнями: проведення статистичного оцінювання та аналізу надійності поточного обладнання і систем, прогнозування рівня надійності цих елементів, встановлення стандартів надійності, здійснення тестування для виявлення надійності, а також оптимізація технічних рішень і забезпечення надійності, аналіз надійності при проектуванні, будівництві та експлуатації електроенергетичних установок і систем тощо. [2]

У загальному контексті виділяються два основні підходи до забезпечення надійності систем електропостачання. [3] По-перше, це поліпшення надійності окремих компонентів, що складають енергетичну систему. Це включає вдосконалення конструкцій і матеріалів, з яких виготовлені ці компоненти, а також підвищення їх міцності, довговічності та стійкості до несприятливих екологічних факторів. По-друге, можна використовувати стратегії побудови енергетичних систем з високим рівнем надійності шляхом резервування. Це передбачає підвищення надійності через дублювання елементів і функцій, використання надлишкової інформації в управлінні та надання додаткового часу для виконання завдань. Найкращих результатів щодо підвищення надійності системи електропостачання можливо досягти, інтегруючи обидва методи.

Електроустановки споживачів електроенергії мають свої специфічні характеристики та особливі вимоги, які включають надійність живлення, якість електроенергії, а також резервування і захист окремих компонентів. Під час проектування та експлуатації систем електропостачання для підприємств чи установ важливо здійснювати обґрунтований техніко-економічний вибір напруги, визначати електричні навантаження, обирати кількість і потужність трансформаторних підстанцій, а також види їхнього захисту і систем компенсації реактивної потужності. Важливим є також вибір методів регулювання напруги. Передача, розподіл і споживання виробленої електроенергії в установках або на підприємствах повинні виконуватися з економічною ефективністю та надійністю. Для досягнення цього створена

система розподілу електроенергії з поділом електроприймачів на категорії, що дозволяє визначити пріоритетність у забезпеченні електроенергією. Категорії електропостачання покликані формалізувати сучасні уявлення про пріоритети цивілізації та запропонувати шляхи комунікації з потенційними аварійними ситуаціями.

Відповідно до ПУЕ [4] всіх електроприймачів поділено на три основні категорії, що визначають надійність електропостачання. Заклади освіти належать до другої категорії.

## **1.2 Методи підвищення надійності електропостачання**

Надійність електропостачання в освітніх закладах є критично важливою для забезпечення безперервного функціонування навчальних процесів та роботи інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Існує кілька методів, які можуть бути використані для підвищення надійності електропостачання у таких установах:

### *1. Резервування джерел живлення*

Здійснюють за рахунок використання, наприклад, дизель-генераторів, батарейних систем зберігання енергії або інверторів та сонячних панелей.

Встановлення автономних резервних генераторів, які можуть автоматично запускатися у випадку відключення основного електропостачання.

Безперебійні джерела живлення (UPS) забезпечують негайне живлення важливих систем на короткий час (до кількох годин), поки не буде відновлено основне електропостачання або активовано резервний генератор.

Для зменшення залежності від зовнішніх постачальників електроенергії можна використовувати гібридні системи, що включають сонячні батареї та інвертори для забезпечення електроенергією в пікові періоди або під час перебоїв.

## *2. Подвійне або резервне підключення до електромережі*

Підключення закладу до двох незалежних підстанцій чи ліній електропередачі. У разі аварії на одній лінії живлення переключається на іншу, що підвищує надійність енергопостачання.

## *3. Автоматичні системи управління живленням*

Розрізняють використання автоматичних систем вводу резерву і систем моніторингу електропостачання.

Автоматичні системи вводу резерву (АВР) – це системи, які автоматично перемикаються на резервне джерело живлення у випадку аварії або відключення основного джерела.

Системи моніторингу електропостачання дозволяють стежити за станом електропостачання в режимі реального часу та передбачати можливі збої, вживаючи заходів для їх запобігання.

## *4. Планове технічне обслуговування та модернізація обладнання*

Регулярне технічне обслуговування електричних щитів, кабелів, підстанцій та іншого електрообладнання дозволяє виявляти потенційні проблеми до того, як вони призведуть до аварії.

До модернізації старого обладнання відносять: заміну застарілих трансформаторів, автоматичних вимикачів та інших елементів мережі на більш нові, надійні та енергоефективні моделі.

## *5. Зменшення навантаження на електромережу*

Впровадження новітніх енергоефективних технологій, таких як LED-освітлення, сучасні комп'ютери з низьким енергоспоживанням, дозволяє знизити навантаження на електричну мережу та зменшити ризик перевантажень.

Використання інтелектуальних систем керування енергоспоживанням дозволяє керувати піковими навантаженнями, знижуючи ризики перевантаження мережі та призводить до оптимізації роботи обладнання.

## *6. Сегментування електромережі*

Сегментація електромережі дозволяє локалізувати можливі збої в окремих частинах мережі, не впливаючи на весь заклад. Наприклад, у випадку аварії в одній частині освітнього закладу інші частини зможуть працювати безперебійно.

#### *7. Освітлення аварійних зон*

Важливим є встановлення аварійного освітлення у важливих приміщеннях (коридори, виходи, класи), яке працює від резервного джерела живлення, щоб забезпечити безпеку учнів та персоналу під час відключень.

#### *8. Інформування та навчання персоналу*

Розробка чітких інструкцій та проведення тренінгів для персоналу з метою підготовки до дій у випадку відключення електроенергії або аварії.

Планування надзвичайних ситуацій через запровадження планів дій на випадок відключення електроенергії з визначенням відповідальних осіб, шляхів евакуації та інструкцій для швидкого перемикання на резервні джерела живлення.

#### *9. Створення локальних джерел енергії*

Мікроелектростанції на базі поновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, вітряки тощо) можуть забезпечити заклад власною електроенергією і зменшити залежність від центрального постачальника.

За можливості використання альтернативних і відновлювальних джерел енергії, таких як деревні відходи, пелети, відходи сільськогосподарського виробництва (солома, соняшник тощо), можливе встановлення когенераційних установок. Вони можуть одночасно виробляти електроенергію та тепло, підвищуючи енергоефективність і надійність постачання.

#### *10. Стратегічне планування з постачальниками*

Укладення угод з постачальниками електроенергії на пріоритетне обслуговування закладу освіти, особливо у випадку аварійних ситуацій, для оперативного відновлення живлення.

Застосування цих методів комплексно може значно підвищити надійність електропостачання та забезпечити стабільну роботу освітніх установ навіть у разі виникнення позаштатних ситуацій.

Серед всього різноманіття перерахованих вище методів підвищення надійності електропостачання, у першу чергу, безперечно треба обирати ті, що не вимагають значних капітальних витрат на їх впровадження, а саме: інформування та навчання персоналу, стратегічне планування з постачальниками, освітлення аварійних зон, зменшення навантаження на електромережу, сегментування електромережі, планове технічне обслуговування та модернізацію обладнання, а також доповнювати вказані методи тими, що можуть бути виправдані техніко-економічним обґрунтуванням. Серед них, наприклад, можна виділити створення локальних джерел енергії, у першу чергу, на базі поновлюваних джерел енергії.

### **1.3 Переваги і недоліки сонячних електростанцій**

СЕС мають низку переваг і недоліків, які важливо враховувати при їх впровадженні. Розглянемо докладніше їх переваги та недоліки.

#### **Переваги сонячних електростанцій**

##### *1. Відновлюване джерело енергії*

Сонячна енергія являє собою відновлюване і невичерпне джерело енергії, що доступне в більшості регіонів світу.

##### *2. Екологічність*

СЕС не викидають шкідливих речовин до атмосфери, таких як CO<sub>2</sub> або інші парникові гази, що сприяє зменшенню впливу на зміну клімату та поліпшенню екологічної ситуації.

##### *3. Зниження витрат на електроенергію*

Після початкових інвестицій у встановлення обладнання, експлуатаційні витрати на виробництво електроенергії є мінімальними, що дозволяє значно знизити рахунки за електроенергію.

##### *4. Низькі експлуатаційні витрати*

Сонячні панелі та інші компоненти системи мають тривалий термін служби та потребують мінімального обслуговування.

#### *5. Енергетична незалежність*

СЕС дозволяють власникам зменшити залежність від зовнішніх постачальників енергії та коливань цін на енергоносії.

#### *6. Модульність і масштабованість*

СЕС можна налаштувати під різні потреби: від малих установок для приватних домогосподарств до великих промислових електростанцій.

#### *7. Можливість інтеграції з іншими джерелами енергії*

СЕС можуть працювати в комбінації з іншими джерелами енергії, такими як вітрові або батарейні системи, що підвищує їхню ефективність і надійність.

### **Недоліки сонячних електростанцій**

#### *1. Значні стартові витрати*

Встановлення геліопанелей та іншого необхідного обладнання вимагає значних інвестицій на початковому етапі. Хоча ці витрати можуть окупитися з часом, це може бути значним бар'єром для багатьох.

#### *2. Залежність від погоди*

Виробництво електроенергії безпосередньо залежить від доступності сонячного світла. Під час поганої погоди ефективність геліопанелей значно знижується.

#### *3. Нерівномірне виробництво енергії*

СЕС виробляють енергію лише вдень, і виробництво змінюється залежно від пори року. Це вимагає додаткових рішень для зберігання енергії (наприклад, акумуляторних систем) або підтримки інших джерел енергії для безперервного постачання. Менше з тим, у останній час з'являються технології, що можуть поглинати випромінювання на довжинах хвиль, характерних для ночі. Тим самим забезпечується виробництво електроенергії практично цілодобово, однак з переважанням денного виробництва.

#### *4. Займають значні площі*

Для встановлення великої сонячної електростанції потрібна значна площа, особливо якщо мова йде про промислові установки. Це може бути проблемою у міських зонах або регіонах з обмеженими земельними ресурсами. Як варіант, спрямований на подолання цього недоліку – розміщення геліопанелей на дахах будівель, що будуть забезпечуватися електроенергією. Іншим варіантом зменшення площ, що займають сонячні панелі, є використання сучасних енергоефективних сонячних панелей, а також використання сонячних концентраторів енергії.

#### *5. Зниження ефективності з часом*

Хоча сонячні панелі мають значний термін експлуатації (до 30 років), їх ефективність поступово знижується протягом років (приблизно на 0,5–1 % щорічно), що пов'язано з нестабільністю матеріалів, які застосовуються у сонячних елементах. Найбільше цей недолік виявляється для таких технологій як елементи на основі аморфного кремнію (друге покоління), органічні сонячні елементи на основі перовськіту (третє покоління) або полімерні сонячні елементи (третє покоління).

#### *6. Складність зберігання енергії*

Для забезпечення безперервного постачання електроенергії у нічний час або під час похмурих днів необхідно використовувати акумуляторні системи, що збільшує витрати на інфраструктуру. Разом з тим, вченими розглядаються можливі використання акумуляції енергії у акумуляторах тепла з робочим тілом у вигляді розплавленого натрію або олова, або гідроакумуляційні системи, якщо СЕС знаходиться безпосередньо біля водойми з наявним гідравлічним потенціалом.

#### *7. Екологічний вплив при виробництві*

Виробництво сонячних панелей вимагає використання рідкісних металів і хімічних процесів, що може мати негативний вплив на довкілля, особливо якщо утилізація панелей після закінчення терміну служби не відбувається належно.

Отже, СЕС є чудовим джерелом екологічної енергії та можуть забезпечити енергетичну незалежність протягом тривалого часу. Однак вони потребують

значних початкових інвестицій і мають деякі обмеження, пов'язані з погодними умовами та ефективністю зберігання енергії.

### 1.4 Технології сонячних панелей

Сонячні елементи (СЕ) нового або третього покоління охоплюють широкий спектр технологій, включаючи органічні, перовскітні, СЕ, що сенсibilізовані барвниками, багатоперехідні та СЕ на основі квантових точок [47]. Разом ці технології охоплюють весь спектр ефективності, цін, складності виробництва тощо (рис. 1.1) [39]. Уданий час підвищення ефективності сонячних панелей здійснюється насамперед за рахунок створення багатоперехідних, тандемних перовскітно-органічних [45] або перовскітно-кремнієвих [46] сонячних елементів, а також за рахунок застосування сонячних концентраторів.

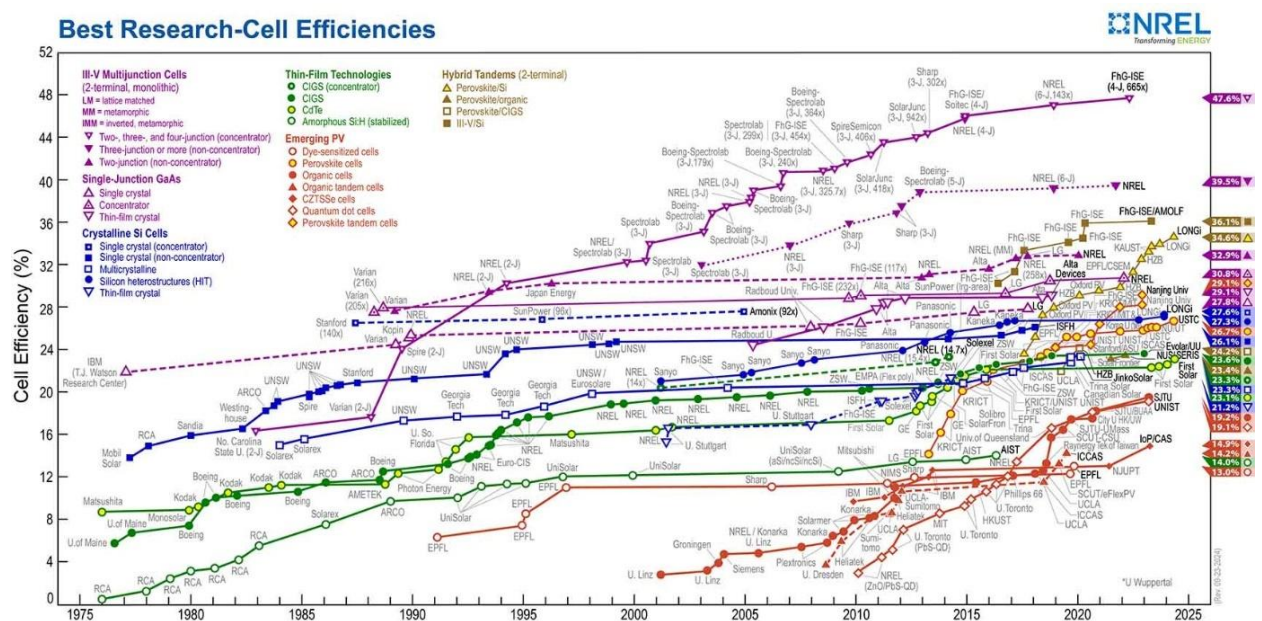


Рисунок 1.1 – Звітний графік ефективності перетворення енергії СЕ за 1976–2024 роки, складений Національною лабораторією відновлюваної енергетики (NREL)

Для СЕ історично виділяють три покоління технологій (рис. 1.2).



Монокристалічний кремній      Тонкоплівковий      Полімерний СЕ  
 (перше покоління)                      (друге покоління)      (третє покоління)

Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд СЕ першого, другого і третього покоління

СЕ першого покоління в основному базуються на кремнієвих пластинах і зазвичай демонструють ефективність близько 15–27,3 %, при чому теоретична максимальна ефективність становить 33,16 % [40, 41]. Ці типи СЕ домінують на ринку, і саме їх можна побачити на дахах будинків. Переваги цієї технології полягають в їх гарній продуктивності, а також в їх високій стабільності. Однак вони жорсткі і вимагають багато енергії для виробництва.

Сонячні елементи другого покоління засновані на таких матеріалах, як аморфний кремній, CIGS і CdTe, де типова ефективність становить 10–15 %. СЕ другого покоління визначаються як тонкоплівкові, оскільки вони використовують матеріали з прямою забороненою зоною і можуть бути набагато тоншими, ніж сонячні елементи першого покоління. СЕ другого покоління також можуть бути виготовлені так, щоб вони були певною мірою гнучкими. Однак, оскільки виробництво СЕ другого покоління все ще включає вакуумні процеси і високотемпературне оброблення, все ще існує значне споживання енергії, пов'язане із виробництвом цих СЕ. Крім того, СЕ другого покоління часто базуються на дефіцитних елементах, і це є обмежуючим фактором як для ціни, так і для їхньої можливої популярності.

Третє покоління СЕ – це суміш багатьох типів сонячних елементів. Одним з прикладів є органічні СЕ, які включають малі молекули і полімерні сонячні

елементи (отже, полімерні СЕ є підкатегорією органічних СЕ). Третє покоління також охоплює дорогі високоефективні експериментальні багатоперехідні СЕ, які є світовими рекорсменами з продуктивності, а також нові пристрої в цілому. Новий клас тонкоплівкових СЕ, які зараз досліджуються, – це перовскітні СЕ, що мають величезний потенціал з рекордною ефективністю понад 20 % на дуже малій площі.

У табл. 1.1 можна побачити огляд різних технологій сонячних елементів з їх найважливішими перевагами та недоліками. Наведено пікову лабораторну ефективність, а також ефективність модуля. [6]

Таблиця 1.1 – Порівняння різних технологій сонячних елементів [6]

Покоління	Назва технології	Рік представлення технології	ККД сонячного елемента (лабораторний)	ККД сонячної панелі	Найважливіші переваги та недоліки
Перше	Монокристалічний кремній	1977	25,3	21,0	<b>Переваги:</b> 1) дуже висока енергоефективність; 2) необмеженість ресурсів для виробництва; 3) дуже висока стабільність. <b>Недолік:</b> 1) дуже висока тривалість амортизації енергії.
	Полікристалічний кремній	1984	21,2	17,0	<b>Переваги:</b> 1) висока енергоефективність; 2) необмеженість ресурсів для виробництва; 3) дуже висока стабільність. <b>Недолік:</b> 1) висока тривалість амортизації енергії.

Продовження табл. 1.1

Покоління	Назва технології	Рік представлення технології	ККД сонячного елемента (лабораторний)	ККД сонячної панелі	Найважливіші переваги та недоліки
Перше	Полікристалічний кремній	1984	21,2	17,0	2) необмеженість ресурсів для виробництва; 3) дуже висока стабільність. <b>Недолік:</b> 1) висока тривалість амортизації енергії.
Друге	Аморфний кремній	1976	14,0	7,0	<b>Переваги:</b> 1) низька тривалість амортизації енергії. <b>Недоліки:</b> 1) низька енергоефективність; 2) низька стабільність.
	Телурид кадмію CdTe (тонкоплівкова)	1976	22,1	11,0	<b>Переваги:</b> 1) низька тривалість амортизації енергії; 2) посередня енергоефективність. <b>Недоліки:</b> 1) використання рідкісних хімічних елементів.
	Селенід міді індію галію (CIGS) (тонкоплівкова)	1977	22,6	15,0	<b>Переваги:</b> 1) низька тривалість амортизації енергії; 2) висока енергоефективність. <b>Недоліки:</b> 1) використання рідкісних хімічних елементів.
Третє	Сенсибілізуючий барвник (елемент Гратцеля) [42]	1991	11,9	—	<b>Переваги:</b> 1) низька тривалість амортизації енергії; 2) необмеженість ресурсів для виробництва. <b>Недоліки:</b> 1) низька енергоефективність;

Продовження табл. 1.1

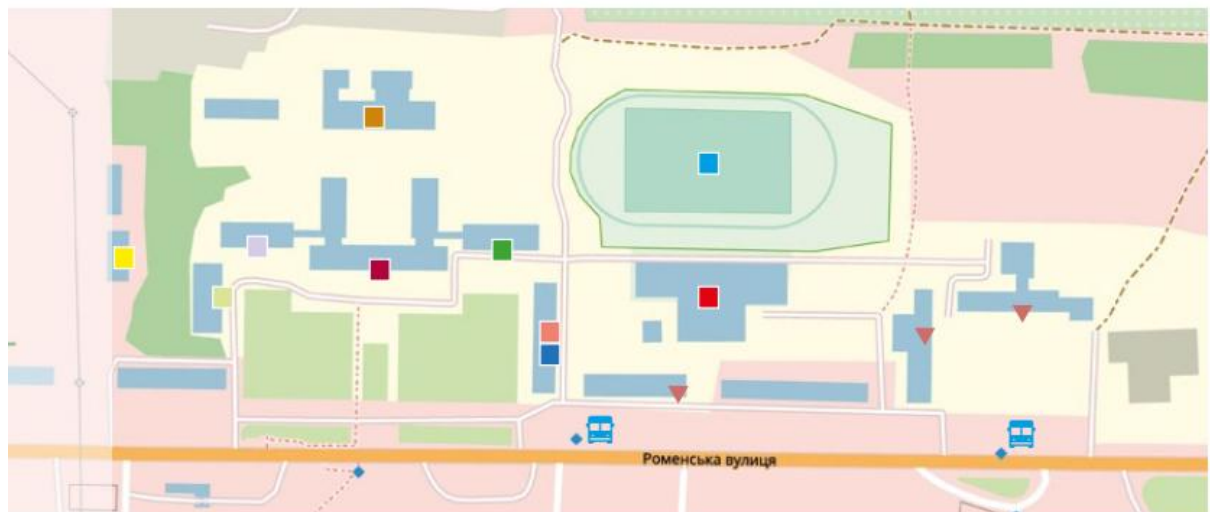
Покоління	Назва технології	Рік представлення технології	ККД сонячного елемента (лабораторний)	ККД сонячної панелі	Найважливіші переваги та недоліки
Третє					2) температурна нестабільність.
	Напівпровідники III-V типу	1983	37,7	—	<b>Переваги:</b> 1) надзвичайно висока енергоефективність. <b>Недоліки:</b> 1) використання рідкісних хімічних елементів; 2) чутливість виключно у системах з оптичними концентраторами.
	Полімерна (органічна) [43]	2001	19,9	6.0	<b>Переваги:</b> 1) надзвичайно швидкий процес виробництва; 2) надзвичайно коротка тривалість амортизації енергії; 3) необмеженість ресурсів для виробництва; 4) гнучкість елементів. <b>Недоліки:</b> 1) низька енергоефективність; 2) низька стабільність.
	Перовскітна [44]	2013	26,7	—	<b>Переваги:</b> 1) потенційно висока енергоефективність; <b>Недоліки:</b> 1) недоведена стабільність; 2) використання токсичних елементів (Pb)

## 1.5 Основні відомості про об'єкт

Сумський ДПУ ім. А.С. Макаренка (далі – університет, заклад, заклад освіти) – це провідний сучасний конкурентоспроможний заклад вищої освіти, що функціонує вже майже століття, має багатий досвід у проведенні навчальної, науково-дослідної та виховної діяльності для підготовки спеціалістів у сфері освіти північно-східного регіону нашої держави.

У даний час університет, спираючись на новітні тенденції суспільного розвитку, володіє міцним складом висококваліфікованих кадрів: 35 заслужених викладачів, 50 докторів наук і професорів та 250 кандидатів наук і доцентів. Наразі у закладі навчаються студенти із 12 країн світу, включаючи 400 іноземних здобувачів та близько 5000 громадян України. Для підтримки своєї освітньої діяльності університет має розвинену інфраструктуру.

Переважає більшість об'єктів інфраструктури розташовані у єдиному ансамблі будівель, що можна прослідкувати на мапі університету (рис. 1.3).



- |   |   |   |
|---|---|---|
| ■ – Факультет іноземної та слов'янської філології; приймальна комісія | ■ – Навчально-науковий інститут історії, права та міжнародних відносин, Фізико-математичний факультет | ■ – Навчально-науковий інститут педагогіки і психології, Навчально-науковий інститут культури і мистецтв. |
| ■ – Центральний корпус; Природничо-географічний факультет             | ■ – Навчально-науковий інститут фізичної культури   | ■ – Хореографічні класи Навчально-наукового інституту культури і мистецтв                                 |
|   | ■ – Стадіон   |   |
|   | ▲ – Гуртожитки 4, 3, 2  |   |
|   | ■ – Їдальня   |   |

Рисунок 1.3 – Мапа університету (без масштабу) [7]

З початком повномасштабної військової агресії росії проти України 24 лютого 2022 року, соціально-економічна структура країни зазнала значних ударів. Було серйозно пошкоджено інфраструктурні об'єкти та будівлі суспільного значення, серед яких велика кількість закладів освіти, з яких понад 200 зруйновано вщент. Постраждала також навчальна матеріально-технічна база та навчально-виробничі комплекси для практик.

З метою забезпечення безпеки освіти в навчальних закладах продовжили, використовуючи всі доступні форми. На територіях, що близькі до зони бойових дій, навчання відбувається онлайн із застосуванням інформаційних технологій і дистанційного доступу. Також застосовується змішаний режим навчання. [8]

Унаслідок того, що Сумщина належить до прифронтової території, тому переважаючою формою реалізації освітнього процесу тут є дистанційна форма навчання. Такий підхід дозволив забезпечити здійснення освітнього процесу, однак він вимагає цілодобового забезпечення критичної інфраструктури закладу вищої освіти електричною енергією. До критичної інфраструктури можна віднести приміщення і будівлі, де знаходиться і працює адміністрація університету та інші допоміжні служби і підрозділи (бухгалтерія, навчальний відділ, науково-дослідна частина, патентний відділ, бібліотека тощо), а також серверна як центральний цифровий вузол, що забезпечує зберігання, онлайн доступ та обробку основної інформації навчального закладу різного характеру, наприклад, забезпечується робота сайту університету, зберігається поточний розклад занять із можливістю користування всіх зацікавлених осіб зі складу професорсько-викладацького складу та здобувачів вищої освіти тощо. Без роботи всіх цих об'єктів діяльність університету стане не можливою.

Однак із динамічним розвитком воєнних дій періодично загострюється ситуація із енергопостачанням у нашій країні. Це пов'язано із постійним обстрілом енергетичної інфраструктури країни. До жовтня 2024 року ці атаки спричинили втрату приблизно 9 ГВт виробничих потужностей, що складає

половину обсягів, необхідних Україні для зимового сезону. Уже в червні 2024 року 73% теплових електростанцій країни були знеструмлені. Якщо в зимовий період 2022–2023 років атаки переважно були націлені на об'єкти передачі електроенергії, то з березня 2024 року основним фокусом стали об'єкти генерації. Згідно з даними однієї з великих енергетичних компаній, внаслідок нападів у 2024 році було пошкоджено втричі більше енергоблоків, ніж у попередню зиму 2022–2023 років [9] і ситуація продовжує загострюватися. Жахливі руйнування енергетики призвели до запровадження як аварійних відключень, так графіків чергових відключень усіх категорій електроприймачів. Це суттєво вплинуло на процеси життєдіяльності всього українського суспільства без виключення та жорстко відобразилося на роботі підприємств, установ і організацій країни. Не обійшла ця проблема й університет. Саме тому фахівцями і адміністрацією університету наразі аналізуються можливі шляхи підвищення надійності електрозабезпечення інфраструктури університету, у першу чергу, через застосування автономних резервних джерел живлення із застосуванням відновлювальної енергетики на основі використання енергії Сонця.

### **1.6 Географічне розташування та характеристики місцевості**

Україна має достатньо високий середньорічний потенціал сонячної енергії, що складає близько  $1235 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ . Це сприяє поширенню впровадження як теплових геліопанелей для виробництва теплової енергії, так і фотоелектричних для вироблення електричної енергії [10]. Таке обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом року.

Основними параметрами довкілля, що суттєво впливають на генерацію електричної енергії фотоелементами є:

- географічне розташування об'єкту;
- температура повітря;
- кількість днів з хмарністю.

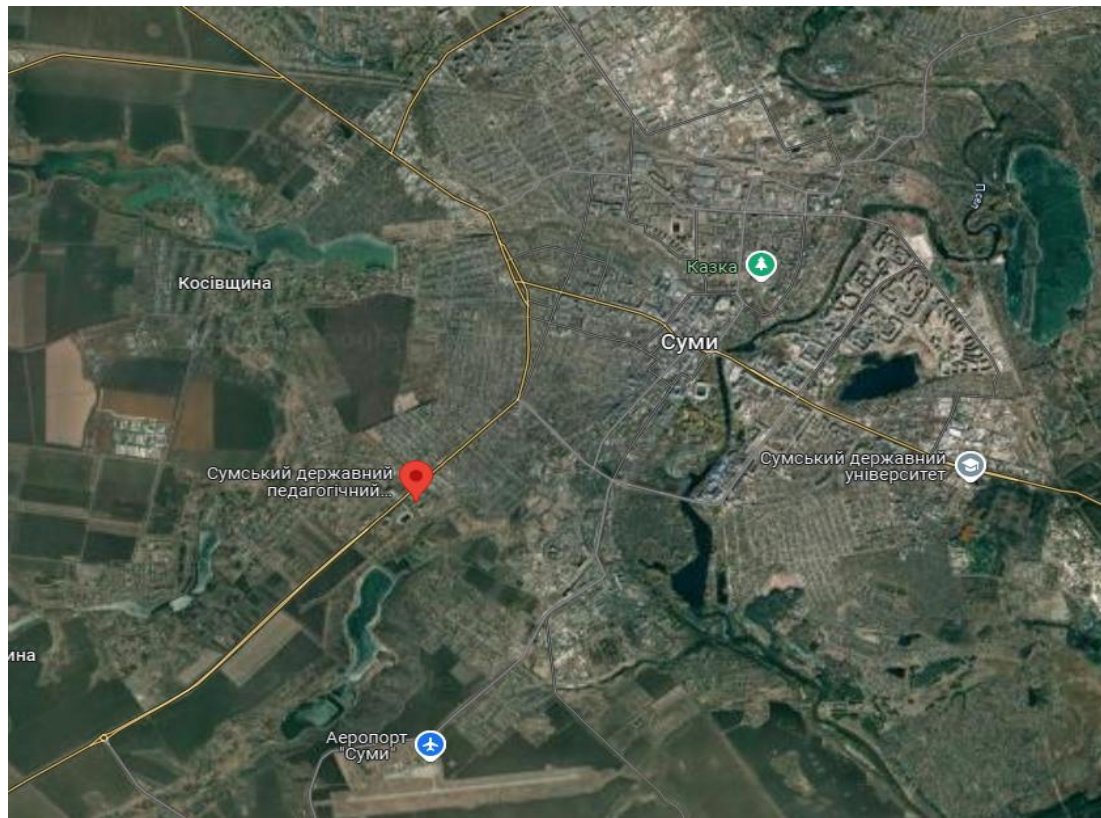


Рисунок 1.4 – Територіальне розташування об'єкту у м. Суми [11]

Заклад, на території якого планується розміщати сонячну електростанцію (СЕС), знаходиться на території м. Суми. Розташування об'єкта відображено на рис. 1.1 (позначено червоним), зображення отримані зі супутникових фотографій за допомогою застосунку Google Maps [11].

Місто Суми розташоване в північно-східному регіоні України, на берегах річки Псел поблизу місця впадіння річки Сумка, в межах височин. Сумська область характеризується лісостеповими та поліськими природними зонами. Гідрографічна система регіону, що цілком належить до басейну річки Дніпро, є досить щільною: на кожні 5 квадратних кілометрів площі припадає 1 км річок. Загальна площа лісів у лісовому фонді області становить 460,9 тисяч гектарів.

Клімат у Сумській області є помірно-континентальним і характеризується рівнинною поверхнею, яка забезпечує м'яку зиму та тепле літо. Ці кліматичні умови формуються під впливом атлантичних, арктичних і континентальних повітряних мас [12].

Нижче наведені графіки (рис. 1.5–1.8), що містять основні кліматичні характеристики м. Суми. Вони є осередненим протягом останніх п'яти років значенням кліматичних параметрів, що можуть впливати на виробництво електричної енергії СЕС.

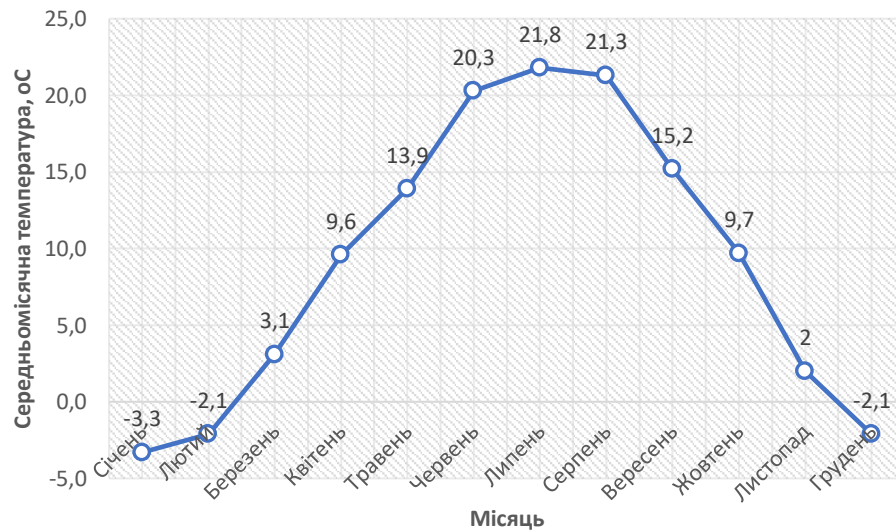


Рисунок 1.5 – Середньорічна температура для м. Суми

Геліопанелі генерують електроенергію завдяки сонячному світлу, а не теплу, тому їхня продуктивність не знижується навіть за умов низьких температур.

Геліопанелі здатні функціонувати і взимку, проте їх ефективність може значно знижуватися. Зменшення продуктивності може обумовлюватися такими факторами, як скорочення світлового дня, а також наявність снігу на їх поверхні (геліопанелі треба періодично очищати як від забруднень, так й від снігу).

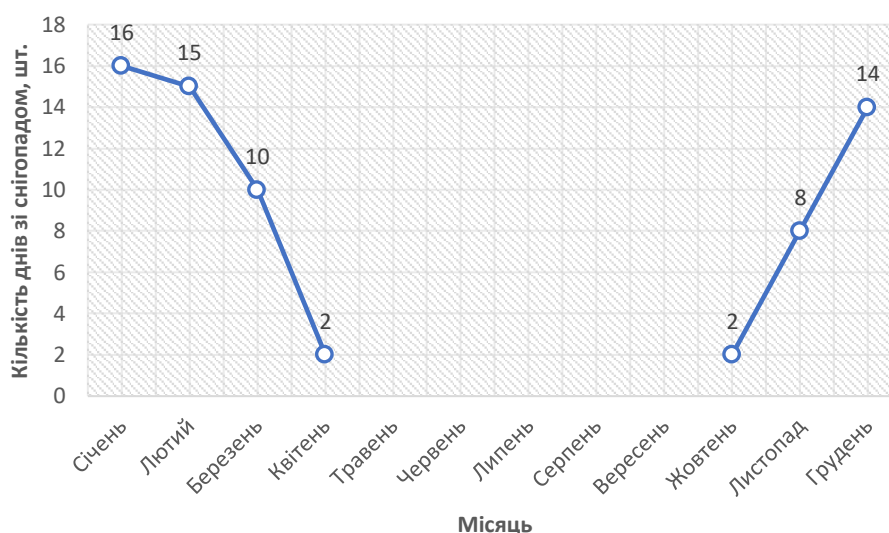


Рисунок 1.6 – Кількість днів із снігопадами впродовж року для м. Суми

Однією з переваг використання геліопанелей в зимовий період є те, що сніг навколо забезпечує високий рівень відбиття світла. Це дозволяє у сонячний сніжний день значно підвищити ефективність отримання сонячної енергії завдяки віддзеркаленню променів від снігової поверхні. У результаті зростає частка розсіяного світла, що додатково потрапить на панелі і призведе до збільшення генерації електроенергії.

Ще однією перевагою роботи СЕС узимку, тобто під час від'ємних температур є те, що зникає перегрівання панелей, як це відбувається влітку, а отже, взимку не зменшується падіння генерації електроенергії через перегрівання. Інколи взимку геліопанелі продукують електроенергії більше за їх номінальну потужність. Перегрівання панелей значно знижує їх ефективність, особливо у літній період. Це явище спостерігається, коли денна температура залишається високою, а нічна суттєво знижується. [13].

Крім того, дуже важливим впливаючим фактором є дощова погода. У цьому разі, аналогічно як і під час снігопаду, небо затягує хмарами, що суттєво зменшує кількість прямого сонячного світла. Звичайна сонячна панель за умов дощової погоди матиме низьку ефективність, що пояснюється зміною оптичних характеристик створеної системи «вода – поверхня сонячної панелі». По-перше, потрапляння крапель дощової води на панель призводить

до суттєвої зміни коефіцієнта віддзеркалення за рахунок додаткового переломлення потоку світла, спрямованого на панель. По-друге, утворена водяна плівка на поверхні панелі зумовлює відбиття частини променів. Як результат, генерація електроенергії геліопанеллю зменшується.

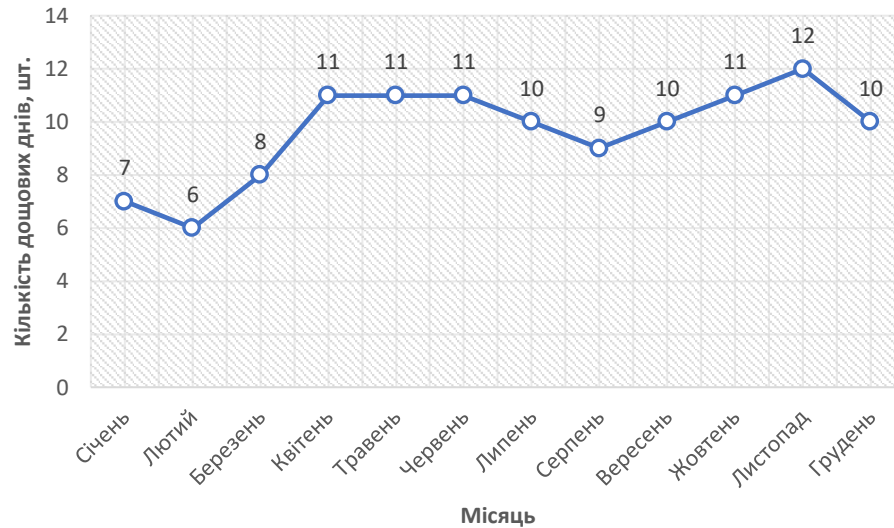


Рисунок 1.7 – Кількість дощових днів по місяцях року для м. Суми

Полікристалічні геліопанелі, завдяки своїй текстурованій зернистій структурі, демонструють підвищену здатність до поглинання розсіяного світла в умовах хмарної погоди. Це забезпечує їм перевагу у генерації більшої кількості електроенергії порівняно з іншими типами панелей. Однак монокристалічні панелі мають однорідну структуру поверхні, а значить, їх краще використовувати у випадку переважання ясної погоди за умови домінування прямого сонячного випромінювання.

Принцип дії геліопанелі під час роботи у хмарну погоду влітку є досить схожим на їх роботу взимку. Ефективність виробництва електроенергії від панелей під час похмурої погоди безпосередньо залежить від інтенсивності хмарності, її змінності та температури повітря. У присутності туману механізм дії подібний до функціонування сонячної панелі під час дощу. Конденсований водяний пар впливає на заломлення сонячного світла, що потрапляє на поверхню панелі.

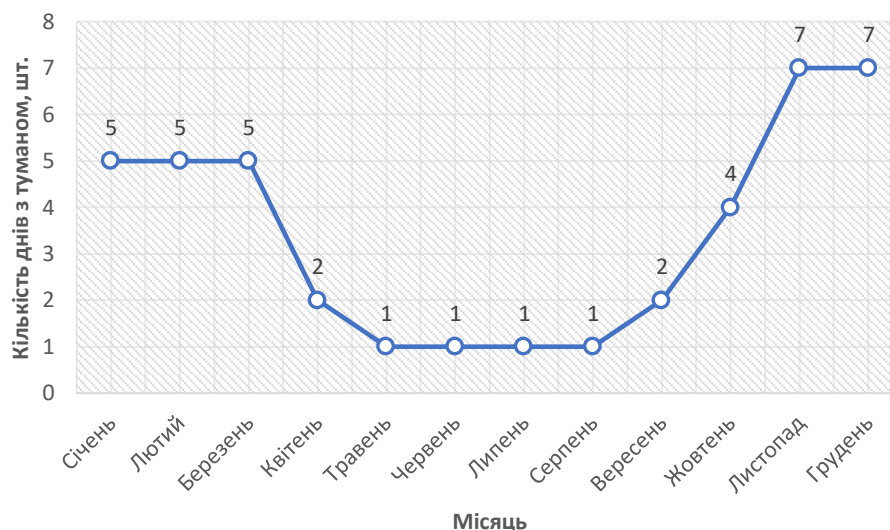


Рисунок 1.8 – Кількість днів з туманом протягом року для м. Суми

У місті Суми можливі до 30 % дощових днів протягом року (рис. 1.5–1.8.), снігопади спостерігаються протягом 7 місяців на рік, однак їх фактична місячна частка є суттєвою (30–50 % тривалості місяця) лише у 4 місяцях року. Туман у Сумах спостерігаємо періодично протягом року, однак переважно узимку (до 23 % часу).

На рис. 1.9 можемо бачити супутниковий знімок території об'єкту. На ньому видно, що об'єкт має досить велику територію з компактно розміщеними на ній будівлями головного та інших навчальних корпусів, спорткомплексу, стадіону тощо.

Всі будівлі об'єкту є багатоповерховими, а тому можуть створювати тривале періодичне затінення окремих ділянок території. Крім того, на території наявні лісо-паркові зони, що забезпечують захист території від вітру, пилу, поглинають частину викидів вихлопних газів від великої транспортної артерії – вул. Роменська.

Разом з тим, посадки дерев також створюють тінь, яка не сприяє ефективному виробництву електроенергії СЕС. Отже, єдиний варіант розміщення геліопанелей на території об'єкту, щоб на них навіть періодично не потрапляла тінь протягом року і доби, є їх розміщення на дахах будівель.

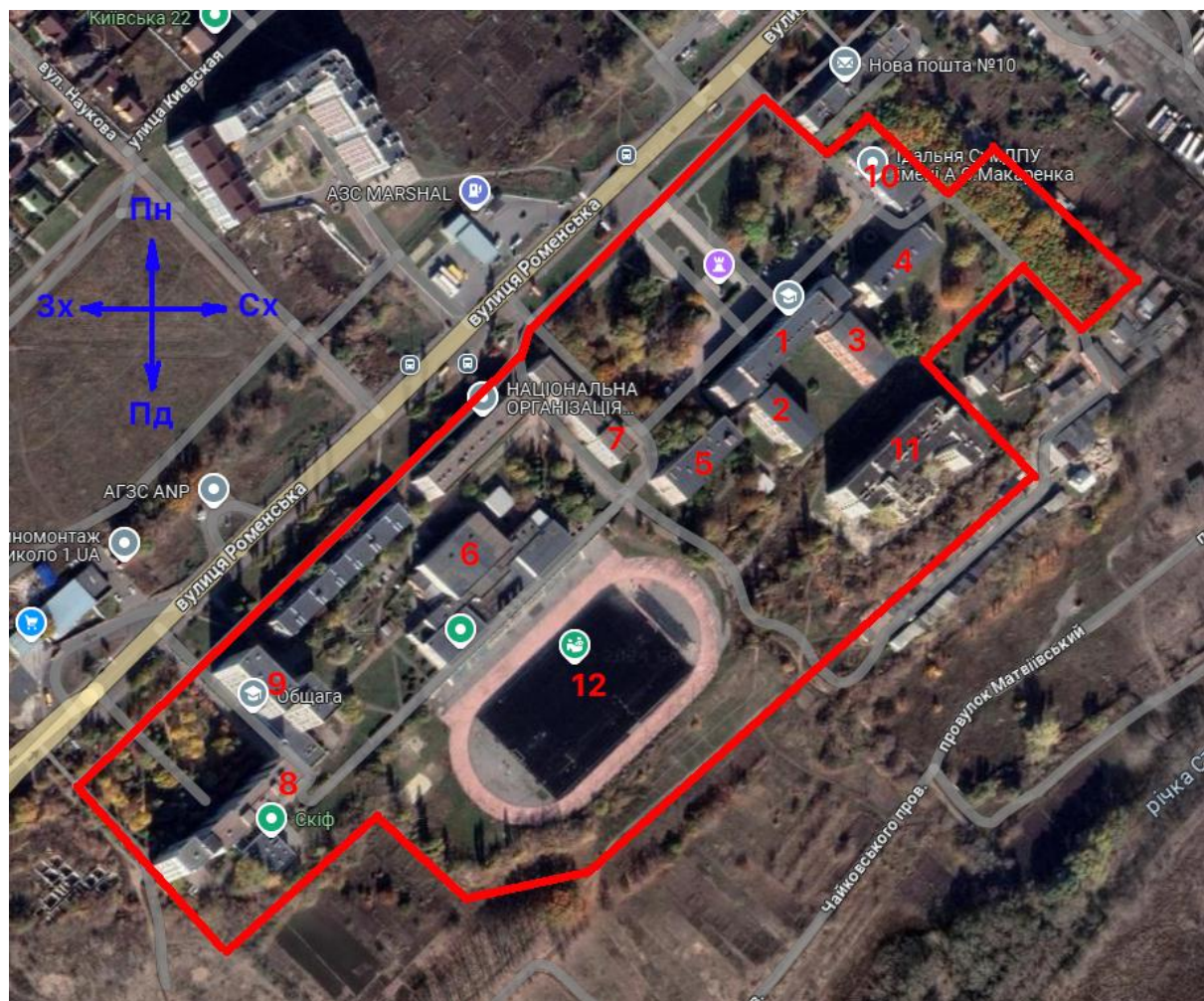


Рисунок 1.9 – Супутниковий знімок ділянки закладу [11] (червона лінія – територія об’єкту): 1 – головний учбовий корпус; 2 – спортивно-навчальний корпус (спортивна зала, навчальні кафедри); 3 – адміністративно-навчальний корпус (актова зала, відділ кадрів, бібліотека, бухгалтерія, кафедра хімії); 4 – філологічний факультет; 5 – фізико-математичний факультет; 6 – спорткомплекс; 7 – учбовий корпус № 4; 8 – блок обслуговування гуртожитку № 4; 9 – гуртожиток № 4; 10 – їдальня; 11 – недобудова; 12 – стадіон

Окрім того, це вирішить проблему втрати частини території під забудову СЕС. З метою простішого монтажу і подальшого обслуговування геліопанелі планується розміщати у ряди здовж більшої сторони будівлі.



Рисунок 1.10 – Рівень сонячної радіації (інсоляції) на території України

Підсумовуючи наведені дані, можна дійти висновку, що рівень сонячної генерації електроенергії значно залежить від інсоляції в певному регіоні, а також наявність похмурої погоди внаслідок впливу різних атмосферних циклонів. За даними NASA [14] створена карта рівня сонячного опромінення території України (рис. 1.10). З географічної точки зору, Україна демонструє значення сонячної інсоляції від 1400 до 1180  $\text{kWh}\cdot\text{год}/\text{m}^2$  на рік.

У табл. 1.2 подано середньомісячну величину сонячної інсоляції у різних містах країни по місяцях, виражених у  $\text{kWh}\cdot\text{год}/\text{m}^2/\text{доба}$ . Маємо осереднені дані за NASA протягом останніх 22 років.

Таблиця 1.2 – Середньомісячні рівні інсоляції території України,  $кВт \cdot год / м^2 / добу$

Міста/Місяці	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	Сер.
Вінниця	1.07	1.89	2.94	3.92	5.19	5.30	5.16	4.68	3.21	1.97	1.10	0.90	3.11
Дніпропетровськ	1.21	1.99	2.98	4.05	5.55	5.57	5.70	5.08	3.66	2.27	1.20	0.96	3.36
Донецьк	1.21	1.99	2.94	4.04	5.48	5.55	5.66	5.09	3.67	2.24	1.23	0.96	3.34
Житомир	1.01	1.82	2.87	3.88	5.16	5.19	5.04	4.66	3.06	1.87	1.04	0.83	3.04
Запоріжжя	1.21	2.00	2.91	4.20	5.62	5.72	5.88	5.18	3.87	2.44	1.25	0.95	3.44
Івано-Франківськ	1.19	1.93	2.84	3.68	4.54	4.75	4.76	4.40	3.06	2.00	1.20	0.94	2.94
Київ	1.07	1.87	2.95	3.96	5.25	5.22	5.25	4.67	3.12	1.94	1.02	0.86	3.10
Кропивницький	1.20	1.95	2.96	4.07	5.47	5.49	5.57	4.92	3.57	2.24	1.14	0.96	3.30
Луцьк	1.02	1.77	2.83	3.91	5.05	5.08	4.94	4.55	3.01	1.83	1.05	0.79	2.99
Луганськ	1.23	2.06	3.05	4.05	5.46	5.57	5.65	4.99	3.62	2.23	1.26	0.93	3.34
Львів	1.08	1.83	2.82	3.78	4.67	4.83	4.83	4.45	3.00	1.85	1.06	0.83	2.92
Миколаїв	1.25	2.10	3.07	4.38	5.65	5.85	6.03	5.34	3.93	2.52	1.36	1.04	3.55
Одеса	1.25	2.11	3.08	4.38	5.65	5.85	6.04	5.33	3.93	2.52	1.36	1.04	3.55
Полтава	1.18	1.96	3.05	4.00	5.40	5.44	5.51	4.87	3.42	2.11	1.15	0.91	3.25
Рівне	1.01	1.81	2.83	3.87	5.08	5.17	4.98	4.58	3.02	1.87	1.04	0.81	3.01
Суми	1.13	1.93	3.05	3.98	5.27	5.32	5.38	4.67	3.19	1.98	1.10	0.86	3.16
Сімферополь	1.27	2.06	3.05	4.30	5.44	5.84	6.20	5.34	4.07	2.67	1.55	1.07	3.58
Тернопіль	1.09	1.86	2.85	3.85	4.84	5.00	4.93	4.51	3.08	1.91	1.09	0.85	2.99
Ужгород	1.13	1.91	3.01	4.03	5.01	5.31	5.25	4.82	3.33	2.02	1.19	0.88	3.16
Харків	1.19	2.02	3.05	3.92	5.38	5.46	5.56	4.88	3.49	2.10	1.19	0.90	3.26
Херсон	1.30	2.13	3.08	4.36	5.68	5.76	6.00	5.29	4.00	2.57	1.36	1.04	3.55
Хмельницький	1.09	1.86	2.87	3.85	5.08	5.21	5.04	4.58	3.14	1.98	1.10	0.87	3.06
Черкаси	1.15	1.91	2.94	3.99	5.44	5.46	5.54	4.87	3.40	2.13	1.09	0.91	3.24
Чернігів	0.99	1.80	2.92	3.96	5.17	5.19	5.12	4.54	3.00	1.86	0.98	0.75	3.03
Чернівці	1.19	1.93	2.84	3.96	4.54	4.75	4.76	4.40	3.06	2.00	1.20	0.94	2.94

Тривалість світлового дня безпосередньо корелює з сезонними змінами. За сприятливих метеорологічних умов влітку спостерігається збільшення виробництва електроенергії завдяки подовженому періоду освітлення. Натомість, узимку, через скорочення тривалості світлового дня, відбувається зниження генерації електроенергії СЕС. (рис. 1.11).

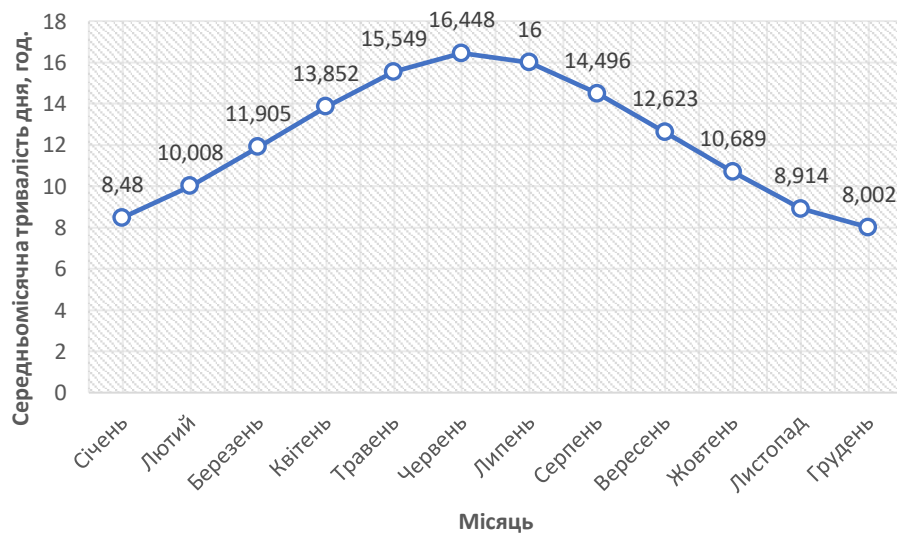


Рисунок 1.11 – Середня тривалість дня в місті Суми в кожному місяці протягом року

Наведений на рис. 1.11 графік показує середньомісячну тривалість світлої пори доби (дня) для м. Суми.

Додатково необхідно зазначити, що більш повному забезпеченню якості і автономності діяльності закладу сприятиме додаткове встановлення геліопанелей для виробництва гарячої води. Принципи встановлення геліопанелей, методи підвищення їх ефективності та розширення діапазону ефективної роботи описані у роботі [49].

### **1.7 Висновки з розділу 1**

У розділі 1 виконано докладний огляд питання надійності електропостачання та методи її підвищення. Виконано аналіз переваг і недоліків сонячних електростанцій, проаналізовано існуючі технології сонячних батарей. Завершальна частина розділу присвячена аналізу об'єкту дослідження та основних характеристик місцевості, що впливають на інсоляцію у регіоні.

Покращенню якості забезпечення нормальних умов діяльності закладу також може сприяти встановлення геліопанелей, що вироблятимуть гарячу воду для потреб їдальні, прибирання приміщень тощо.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 2.1 Розрахунок споживання електроенергії за укрупненими показниками

Заклад освіти призначений для здійснення навчально-наукової діяльності. У ньому, з метою забезпечення його діяльності, також працюють адміністрація та допоміжні служби (бібліотека, бухгалтерія, навчальний відділ тощо). У зв'язку з впливом зовнішніх незалежних від об'єкту факторів та чинників непереборної сили (спочатку епідемія SARS COVID-2019, а потім військові дії) з метою забезпечення безпеки персоналу та здобувачів навчальний процес змушений був перейти на дистанційні форму навчання. Як результат, основне навантаження для забезпечення життєдіяльності закладу лягло на мережі інтернет-зв'язку і сервери. Отже, для забезпечення діяльності роботи закладу необхідно постійне живлення комутаційних засобів інтернет-зв'язку (наприклад, роутерів), розподільчих ланок та централізованих місць зберігання інформації (серверів), а також персональних комп'ютерів, системи освітлення. Це є найважливішим енергетичним обладнанням, що безпосередньо забезпечують роботу університету. У табл. 2.1 наведено електроприймачі, що вирізняються найвищою потужністю в аналізованому закладі. Максимальна потенційна споживана потужність оцінюється приблизно у 150 *кВт*. Усі зазначені значення споживаної потужності отримані з технічних паспортів до відповідних електроприладів.

Ці пристрої скоріш за все не працюватимуть одночасно, тому досягнення максимального значення на практиці майже нереальне. Фактичне енергоспоживання у будівлях адміністративного призначення дуже залежить від політики оптимізації енергозбереження у закладі. Воно може знаходитися значно ближче до мінімальної межі забезпечення життєдіяльності закладу, а саме, через забезпечення електропостачання найнеобхіднішим пристроям: персональним комп'ютерам, принтерам, системі освітлення та серверу. При цьому енергоспоживання може складати близько 60 *кВт*, тобто всього 40 % від найбільшого значення.

Таблиця 2.1 – Групи електроприймачів об'єкту

Електроприймач	Кількість, одиниць	Потужність одного електроприладу, кВт	Загальна потужність
Персональний комп'ютер	155	0,09	13,95
Персональний комп'ютер (сховище)	36	0,09	3,24
Багатофункціональний пристрій	29	0,5	14,5
Принтер струменевий	58	0,03	1,74
Світильник на світлодіодних лампах 1	605	0,04	24,2
Світильник на світлодіодних лампах 2	16	0,1	1,6
Кондиціонер	28	1,5	42
Холодильник	15	0,1	1,5
Мікрохвильова піч	15	0,8	12
Електрочайник	15	2,2	33
Сервер	1	1,5	1,5
Максимум потужності	–	–	149,23

Щоб визначити необхідну кількість енергії для забезпечення потреб об'єкта, слід розрахувати пікову миттєву потужність, а також встановити максимальне й середнє значення очікуваного добового енергоспоживання. Пікова миттєва потужність визначається як загальна потужність всіх електроприладів, які можуть працювати одночасно, що представляє найбільш екстремальний сценарій навантаження на електромережу. Це не означає, що потрібно просто підсумувати потужності всіх електричних пристроїв на

об'єкті, адже більшість з них вмикаються періодично.

Щоб уникнути зайвих витрат на додаткову потужність, яка може знадобитися лише кілька разів на рік, важливо стежити за кількістю одночасно включених електроприладів.

Не припустимо залишати увімкненим електрообладнання, що не затребуване протягом неробочого часу (персональні комп'ютери, принтери, система основного освітлення, кондиціонери тощо). Усі потужні споживачі, що автоматично вмикаються (наприклад, електричний бойлер), якщо такі пристрої існують на об'єкті, повинні бути враховані. Це призводить до значного зниження вимог до максимальної миттєвої потужності. Замість потреби у понад сотні кіловат для одночасного використання всієї доступної електричної техніки, ці параметри можуть бути суттєво скорочені, і, як правило, достатньо в середньому близько 60 *кВт*.

Спрощений розрахунок споживаної електроенергії об'єктом виконують відповідно до рекомендацій [16].

Розрахунок активного навантаження на лінії живлення та ввідних пристроїв у робочих та аварійних режимах здійснюється під час одночасного забезпечення електроживленням силових електроприймачів та систем освітлення.  $P_{заг}$  здійснюємо за формулою:

$$P_{заг} = K \cdot (P_{oc} + P_{емс} + P_{xc} \cdot K_1) \quad (2.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який враховує відмінності в розрахункових максимальних навантаженнях силових електроприймачів, включаючи обладнання для охолодження та освітлення;

$P_{oc}$  – розрахункове навантаження системи освітлення, *кВт*;

$P_{емс}$  – навантаження силових електроприймачів без урахування холодильних машин в системах кондиціонування повітря, *кВт*;

$P_{xc}$  – споживання електроенергії холодильним устаткуванням системи кондиціонування, *кВт*;

$K_1$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення розрахункового навантаження

освітлення до навантаження холодильного обладнання на холодильній станції, визначений відповідно до рекомендацій. [16].

Отже, з табл. 2.1 маємо:

– навантаження силових електроприймачів без холодильних машин систем кондиціонування повітря  $P_{елс} = 149,23 - 42 = 107,23 \text{ кВт}$ .

– загальна потужність приєднаних електроприймачів без холодильних машин систем кондиціонування повітря  $P_{xc} = 42 \text{ кВт}$ ;

– розрахункове навантаження освітлення  $P_{oc} = 24,2 + 1,6 = 25,8 \text{ кВт}$ .

Відношення

$$P_{oc} / P_{xc} = 25,8 / 42 = 0,614,$$

тоді відповідно до [16]  $K_1 = 0,5$ .

Коефіцієнт, що враховує розбіжність розрахункових максимумів навантажень силових електроприймачів, включаючи холодильне устаткування і освітлення  $K$  за умови співвідношення навантаження системи освітлення до силового  $P_{oc} / P_{елс} = 25,8 / 107,23 = 0,24$  для освітніх закладів  $K = 0,95$ .

У результаті отримаємо

$$P_{заг} = 0,95 \cdot (25,8 + 107,23 + 42 \cdot 0,5) = 146,33 \text{ кВт}.$$

Як бачимо, отримане значення розрахункового активного навантаження ліній живлення і вводів у робочому та післяаварійному режимах практично збігається з максимальним приєднаним навантаженням.

Окрім активного навантаження у об'єкті наявні електроприймачі з реактивною складовою потужності: холодильники, кондиціонери та мікрохвильові печі тощо.

Реактивне навантаження об'єкту визначаємо за формулою:

$$Q = P_{заг} \cdot \text{tg } \varphi, \quad (2.2)$$

де  $\text{tg } \varphi$  – розрахунковий коефіцієнт реактивного завантаження.

У навчальних корпусах вищих закладів (без їдалень) з кондиціонуванням повітря відповідно до рекомендацій [16]  $\text{tg } \varphi = 0,48$ , тоді

$$Q_{заг} = 146,33 \cdot 0,48 = 70,24 \text{ кВАр}.$$

Повне навантаження об'єкту знаходимо за формулою:

$$S_{заг} = \sqrt{P_{заг}^2 + Q_{заг}^2} \quad (2.3)$$

У результаті отримаємо:

$$S_{заг} = \sqrt{146,33^2 + 70,24^2} = 162,53 \text{ кВА}.$$

Розрахункову силу струму мережі при  $U_{ном} = 230 \text{ В}$

$$I = \frac{S_{заг}}{U_{ном}} \quad (2.4)$$

Підставляючи до (2.4) повне навантаження об'єкту, необхідна сила струму складе

$$I = \frac{162,53}{0,23} = 706,65 \text{ А}.$$

## **2.2 Розрахунок споживання електроенергії за уточненими показниками**

Розрахунок за укрупненими показниками надає лише орієнтовні значення споживання енергії. Для того, щоб визначитися з кількістю енергії споживаною об'єктом, треба зробити детальний аналіз. Однак визначити очікуване добове енергоспоживання складно. Воно залежить від режиму роботи системи електропостачання. Для цього необхідно скласти перелік всіх електроприладів у закладі, який вже наведено в табл. 2.1, а потім виконати розрахунки. Треба перемножити кількість спожитої енергії кожним приладом на тривалість його роботи в годинах. Результати розрахунків подаємо у табл. 2.2.

У даному дослідженні обчислення проводяться за місячний період, оскільки значна кількість електроприладів не експлуатується щодня. Наприклад, у вихідні дні в закладі функціонують переважно сервер та частково система освітлення.

Таблиця 2.2 – Графік електроспоживання електроприймачів

Найменування електроприймача	Спожита потужність, кВт·год											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Комп'ютер	2344	2232	2344	2455	2567	2232	2567	2455	2344	2567	2344	2455
Персональний комп'ютер (сховище)	544	518	544	570	596	518	596	570	544	596	544	570
Багатофункціональний пристрій	91	87	91	96	100	87	100	96	91	100	91	96
Принтер струменевий	37	35	37	38	40	35	40	38	37	40	37	38
Світильник на світлодіодних лампах 1	3557	3388	2541	2662	2226	968	278	532	508	2226	4066	4259
Світильник на світлодіодних лампах 2	34	32	34	35	37	32	37	35	34	37	34	35
Кондиціонер	0	3360	1764	3234	1932	840	0	0	0	2898	5292	5544
Холодильник	378	360	378	396	414	360	414	396	378	414	378	396
Мікрохвильова піч	25	24	25	26	28	24	28	26	25	28	25	26
Електрочайник	69	66	69	73	76	66	76	73	69	76	69	73
Сервер	1116	1008	1116	1080	1116	1080	1116	1116	1080	1116	1080	1116
Максимум потужності	8195	11110	8943	10666	9132	6242	5252	5338	5110	10098	13960	14609
Всього на рік	108654											
У середньому на день	264,4	396,8	288,5	355,5	294,6	208,1	169,4	172,2	170,3	325,7	465,3	471,3

Отримані значення середньомісячного енергоспоживання можна порівняти з фактично вимірним за допомогою електричного лічильника (табл. 2.3), встановленого на об'єкті (головний корпус), рис. 2.1.

Таблиця 2.3 – Фактичні значення середньомісячного використання електричної потужності для головного корпусу станом на 2023 рік

Місяць	Фактичне середньомісячне споживання електричної енергії, <i>кВт·год</i>
Січень	8220
Лютий	11580
Березень	8760
Квітень	10680
Травень	9120
Червень	6120
Липень	5100
Серпень	5220
Вересень	5280
Жовтень	10140
Листопад	14340
Грудень	14700
Всього за рік	109260

Фактично забезпечення надійного енергопостачання саме головного корпусу закладу освіти (об'єкту) дозволить реалізувати всі найнеобхідніші потреби життєдіяльності.

З рис. 2.1 видно гарну узгодженість результатів розрахункового визначення та фактичних значень, отриманих за допомогою лічильника активної енергії по об'єкту, де зосереджені всі найважливіші та критично важливі служби закладу та енергетичне обладнання (головний корпус). Це підтверджує працездатність виконаного математичного аналізу впливу складових, що утворюють загальне електроспоживання.

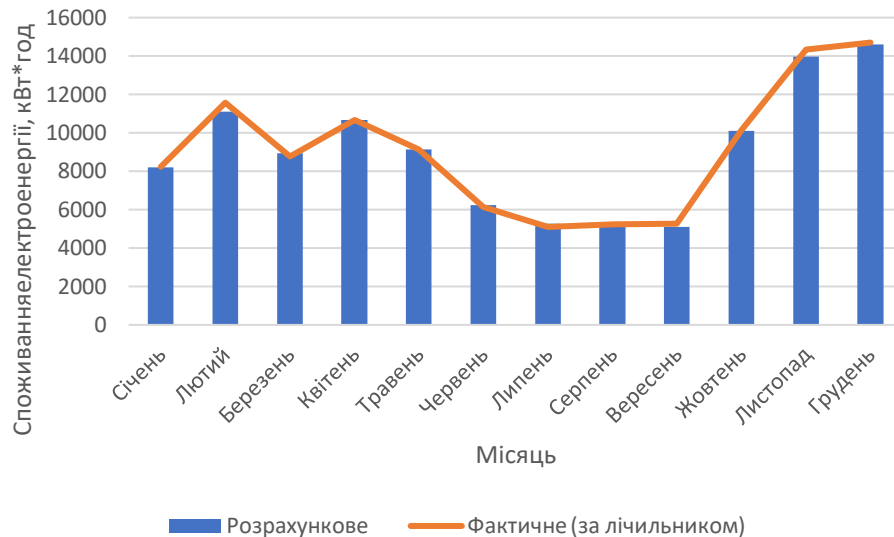


Рисунок 2.1 – Порівняння фактичного і розрахункового електроспоживання об'єктом (головний корпус)

Як видно з результатів розрахунків (табл. 2.2), найбільший вплив на загальне електроспоживання чинять чотири складові: робота персональних комп'ютерів служб, загальна робоча система освітлення, система кондиціонування та робота серверу. Всі вони, окрім системи кондиціонування, належать до критичних електроприймачів, що забезпечують життєдіяльність об'єкту, тому не можуть бути відключені протягом робочого часу за жодних умов.

З рис. 2.1 можна побачити, що електроспоживання об'єкту протягом року не є рівномірним: найбільші значення електроспоживання припадають на зимові та весняні місяці. Це можна пояснити зростанням тривалості роботи системи освітлення через скорочення тривалості дня (див. рис. 1.11), а також суттєвий вплив на зростання електроспоживання чинить активне використання системи кондиціонування у режимі теплового насоса, тобто з метою опалення приміщень. Фактично постійним протягом року є електроспоживання персональних комп'ютерів та сервера, а також незначно змінюється електроспоживання допоміжного обладнання, що забезпечує відносно комфортні умови робочого персоналу закладу (холодильне обладнання, мікрохвильові печі та електрочайники). Частка електроспоживання такого обладнання складає близько 5 % від загального

електроспоживання (рис. 2.2).

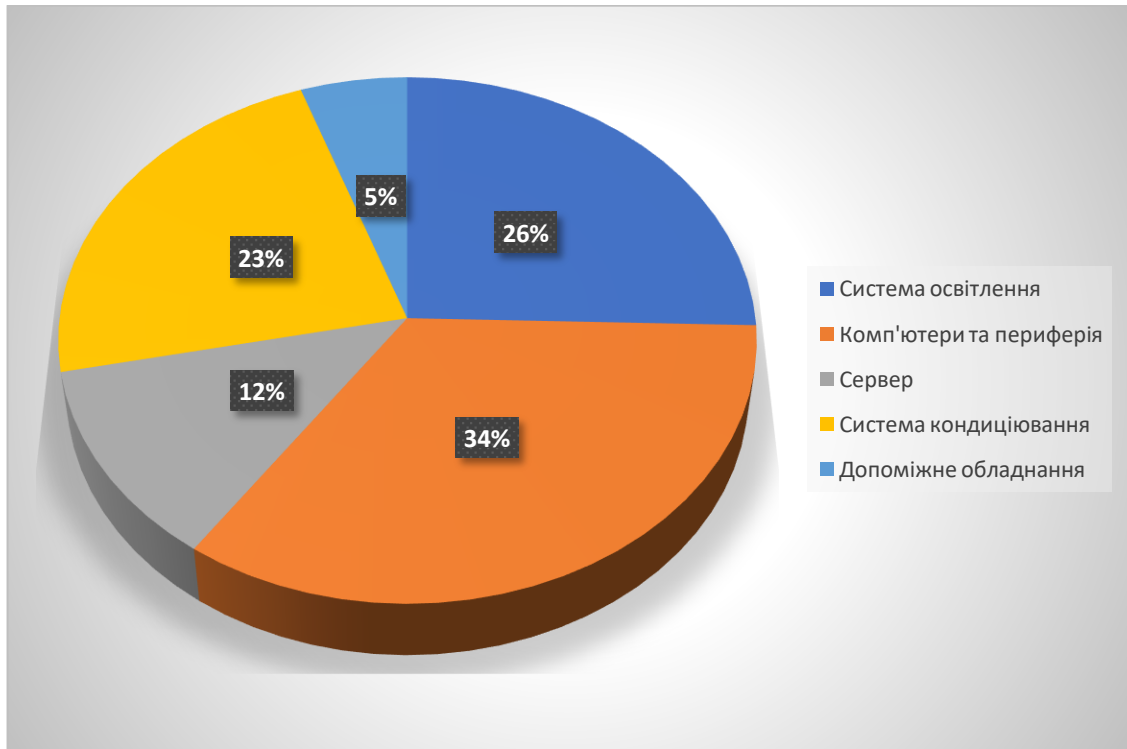


Рисунок 2.2 – Структура електроприймачів об'єкту

Відповідно до структури електроприймачів об'єкту (рис. 2.2) для забезпечення надійності роботи критично необхідно забезпечити живлення системи освітлення (26 %), сервера (12 %) та комп'ютерів з периферією (34 %). Отже, за критичної необхідності можливе зменшення електроспоживання на 28 %, що включає системи кондиціонування та допоміжне обладнання. За подальшої необхідності зменшення енергоспоживання необхідно буде розглядати зменшення (до 50 % від номінального) електроспоживання системи освітлення, що додатково ще 13 % загального енергоспоживання.

### 2.3 Розрахунок гібридної сонячної електростанції

СЕС, яку використовують для виробництва власної електроенергії є, по суті, так звану домашню електростанцію, що функціонує без підключення до програми «зеленого тарифу». У такі системи встановлюється Smart Meter або «розумний лічильник», який у випадках, коли геліопанелі виробляють надлишкову кількість енергії, автоматично переводиться в режим

0 % Feed in Mode («нульового експорту»). Це означає, що вироблена станцією енергія не передається до загальної електромережі, а накопичується в акумуляторних батареях для подальшого власного використання. У випадку недостатності сонячного освітлення, електропостачання здійснюється від районних електромереж (за наявності живлення), або від інших автономних чи резервних джерел, включно з можливим використанням інших джерел відновлювальної та альтернативної енергетики.

Подібна автономна енергосистема є доцільною, коли джерело електроенергії використовується з декількома цільовими призначеннями. Найголовніше – як резервне живлення у випадках, коли місцеві енергомережі не можуть надати необхідну потужність, наприклад, як у даному випадку коли відсутня надійність електропостачання (безперебійність роботи електроприладів) у зв'язку із постійними і руйнівними обстрілами загальної енергосистеми, або з метою економії електроенергії [17]. Принцип дії і основні складові гібридної СЕС подано на рис. 2.3.

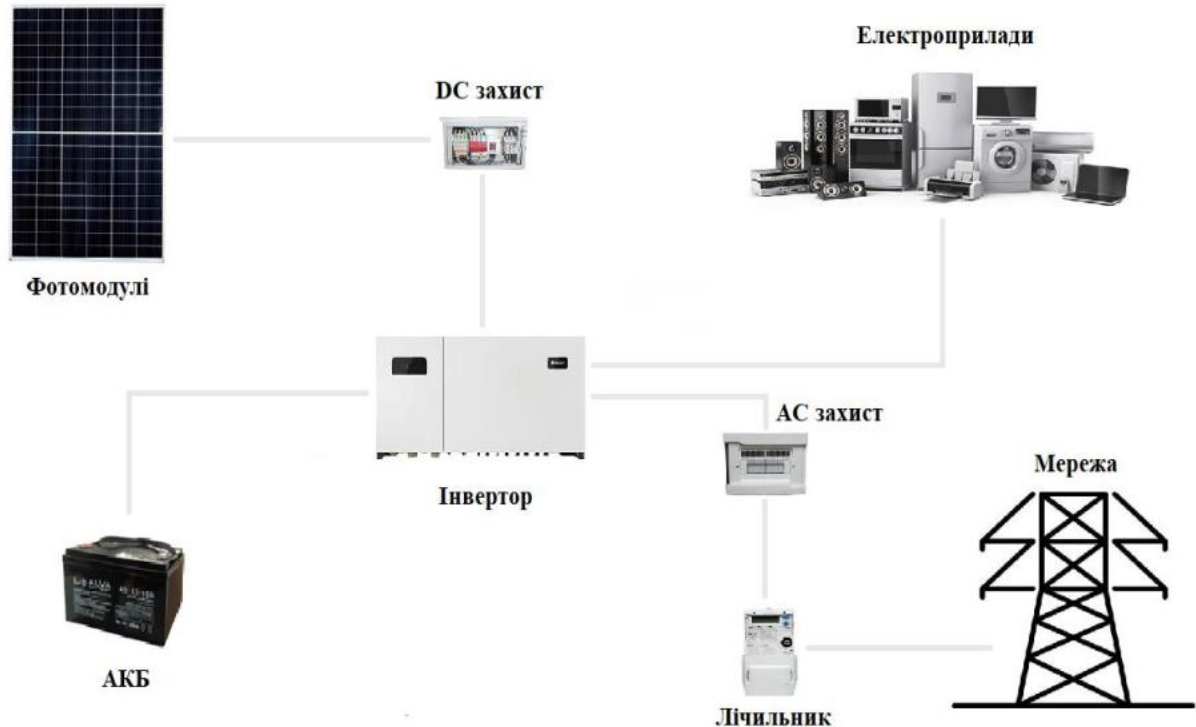


Рисунок 2.3 – Принципова схема гібридної СЕС

Відповідно до рис. 2.3 гібридну СЕС утворюють елементи, об'єднані

пристроєм, що контролює і узгоджує роботу всіх елементів, своєрідними «мізками» СЕС, що працюють на основі мікроконтролерів. Цей пристрій називають інвертор. Також до системи входять фотомодулі (геліопанелі), що забезпечують виробництво електроенергії із подальшим її транспортуванням через інвертор залежно від обраної програми: або на живлення електроприладів об'єкту, або до акумуляторної батареї. У такій СЕС наявні засоби захисту як на стороні сталого (DC захист), так і змінного (AC захист) струмів. Завдання таких захистів полягає у захисті інвертора від впливу перенапруг та перевантажень.

*Вибір сонячних панелей.* Під час збірки обладнання гібридної СЕС у першу чергу обирають геліопанелі. Під час вибору обладнання важливо брати до уваги два ключові показники: необхідну потужність навантаження і номінальну потужність панелі.

У табл. 2.2 для розрахунку потужності навантаження наведено дві величини очікуваного добового енергоспоживання: максимальне та середнє значення.

Виходячи з аналізу технологій сонячних панелей, поданий у розділі 1 роботи, обираємо для встановлення сонячну монокристалічну панель Risen Energy RSM110-9-550M. Її технічні характеристики подано у табл. 2.4 [18].

Зовнішній вигляд панелі Risen Energy RSM110-9-550M на рис. 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики сонячної панелі Risen Energy RSM110-9-550M гібридної СЕС

Характеристика	Розмірність	Параметр
Вид модуля	–	Монокристалічний
Потужність модуля, $P_{\max}$	<i>Вт</i>	550
Номінальна напруга, $U_{\text{ном}}$	<i>В</i>	24
ККД	%	21,3
Струм максимальної потужності	<i>А</i>	17,27
Напруга максимальної потужності	<i>В</i>	42,2

Продовження табл. 2.4

Характеристика	Розмірність	Параметр
Струм КЗ	<i>A</i>	13,94
Напруга ХХ	<i>B</i>	49,8
Максимальна робоча напруга	<i>B</i>	1500
Робочі параметри довкілля	°C	від –40 до +85
Габаритні розміри	<i>мм</i>	2279 x 1134 x 35
Число елементів у модулі	<i>шт.</i>	134
Маса	<i>кг</i>	27,8
Ступінь захисту модуля	–	IP68
Гарантія 90 % від вихідної потужності	<i>роки</i>	10
Гарантія 80 % від вихідної потужності	<i>роки</i>	25

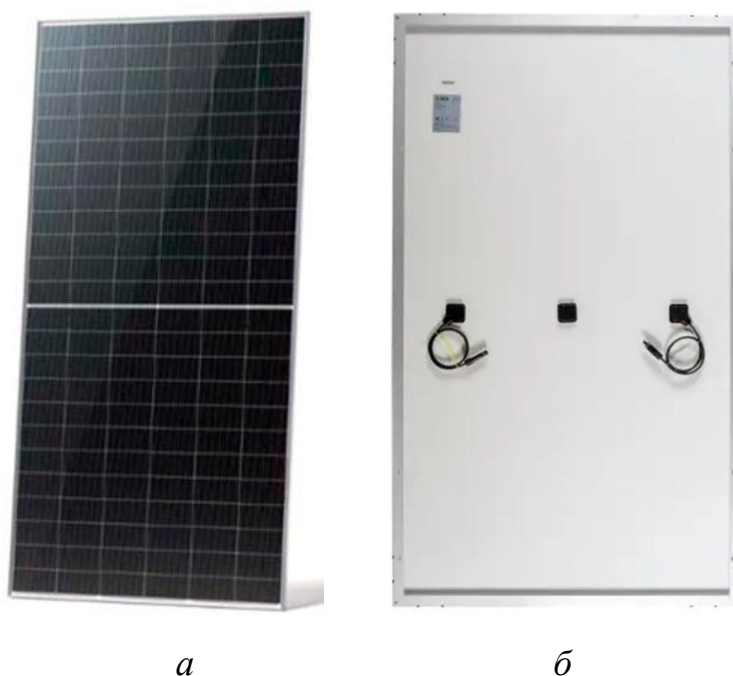


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд сонячної панелі

Risen Energy RSM110-9-550M : *a* – вид спереду; *б* – вид позаду

Необхідно провести розрахунок оптимальної кількості модулів для безперебійного забезпечення закладу електроенергією, враховуючи, що пікове добове споживання припадає на пізню осінь і зимові місяці.

Потужність геліопанелі,  $кВт \cdot год/доба$

$$W = k \cdot a \cdot b \cdot \eta \cdot E, \quad (2.5)$$

де  $k$  – поправковий коефіцієнт, що враховує місяць року;  $k = 0,5$  для теплих місяців і  $0,7$  для холодних; для перехідних періодів (осінні і весняні місяці) задаємося  $k = 0,6$ ;

$a, b$  – габаритні розміри сонячної панелі,  $м$ ;

$\eta$  – ККД сонячної панелі;

$E$  – інсоляція, згідно табл. 1.1,  $кВт \cdot год/м^2$  за день.

Після підстановки всіх відомих змінних до (2.5), отримуємо значення потужності, яку генерує одна геліопанель у зимовий період у грудні, коли спостерігається найбільше енергоспоживання

$$W = 0,7 \cdot 2,279 \cdot 1,134 \cdot 0,213 \cdot 0,86 = 0,331 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{доба}.$$

Число геліопанелей

$$N = \frac{P_{\text{доб}}}{W}, \quad (2.6)$$

де  $P_{\text{доб}}$  – найбільше електроспоживання за добу,  $кВт \cdot год/доба$ ;

Отримане значення округляємо у більший бік.

Необхідна максимальна кількість панелей

$$N = \frac{471,3}{0,331} = 1424 \text{ шт.}$$

Подібним чином обчислимо необхідну кількість панелей для забезпечення об'єкта в середньому за рік, замінюючи максимальне добове споживання середньорічним добовим значенням. Середнє значення інсоляції за рік дорівнює  $3,16 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  на день згідно з табл. 1.1. Коефіцієнт  $k$  встановлюємо на рівні  $0,5$ , оскільки це дозволяє створити певний запас мінімальної кількості панелей.

Отже,

$$W = 0,5 \cdot 2,279 \cdot 1,134 \cdot 0,213 \cdot 3,16 = 0,870 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{доба};$$

$$N = \frac{108654}{365 \cdot 0,870} = 343 \text{ шт.}$$

Отримане значення кількості панелей округлюємо до більшого цілого парного числа у зв'язку зі значною загальною потужністю (більше 100 кВт), яка у подальшому ляже у основу вибору інвертора. Остаточо задаємося  $N = 344 \text{ шт.}$

Наступним кроком є визначення необхідного рівня електропостачання для об'єкта. Задаємося такими рівнями:

- повний: передбачає повну заміну зовнішнього електропостачання на автономне.
- комфортний: забезпечує повноцінну функціональність об'єкта, але без допоміжного обладнання (електрочайники, мікрохвильові печі), яке живиться лише від зовнішньої мережі;
- помірний – забезпечується діяльність об'єкту, але взагалі без допоміжного обладнання (кондиціонери, холодильники, електрочайники, мікрохвильові печі), яке живиться лише від зовнішньої мережі;
- базовий – забезпечується постійне живлення лише для сервера, персональних комп'ютерів і периферії та 50 % освітлювальних пристроїв, а решта – від зовнішньої мережі;
- аварійний – забезпечується електроживлення нетривало (4 годинний робочий день) для всього комп'ютерного обладнання і периферії та забезпечується робота 50 % освітлювальних пристроїв до моменту підключення зовнішнього електропостачання; постійне електроживлення забезпечується лише серверу.

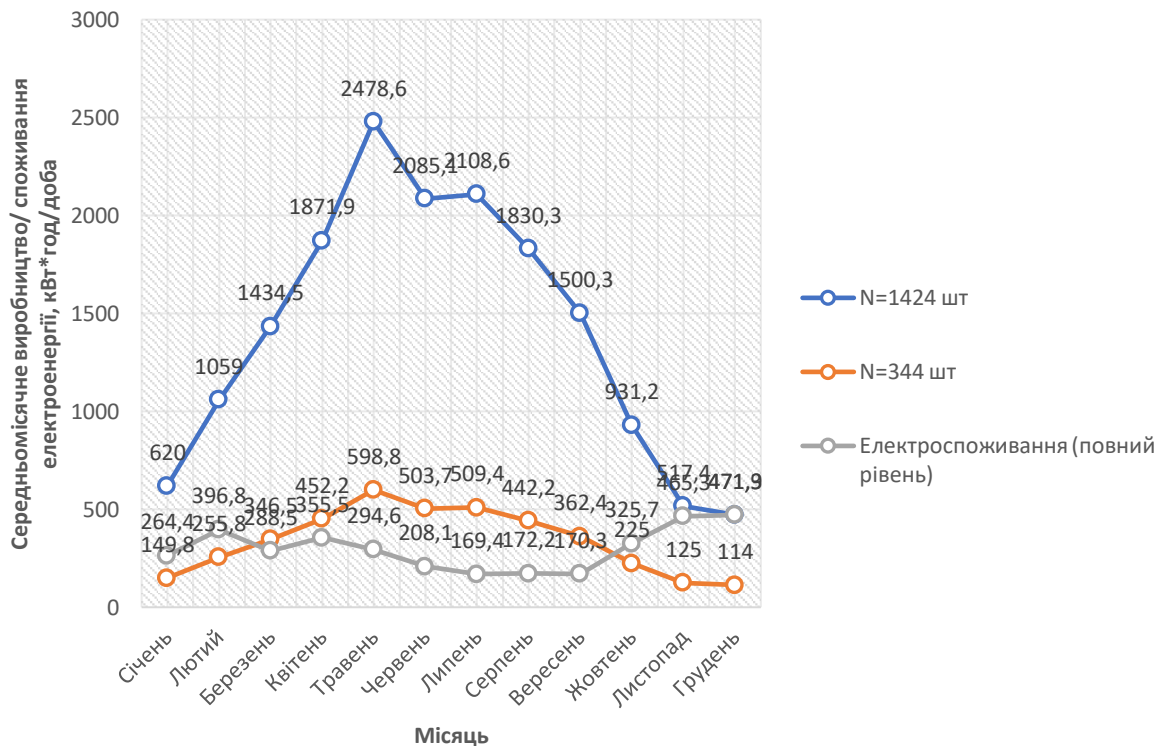


Рисунок 2.5 – Порівняльні графіки середньомісячне виробництво/споживання електроенергії для об'єкту (повний рівень електрозабезпечення від СЕС)

Для наочності створимо графік, який відображає генерацію енергії геліопанелями в кількості 344 та 1424 штуки, і накладемо на цей графік спожиту об'єктом потужність, рис. 2.5. Розрахунки виконуємо для кожного місяця за формулами (2.5) і (2.6).

У процесі аналізу рис. 2.5 можна виразно помітити, що генерована СЕС потужність у літній період значно перевищує зимову, що зумовлено різницею у рівні інсоляції. Це призводить до утворення надлишкової невикористаної потужності впродовж теплих місяців. Отже, навіть при виборі повного рівня електропостачання за рахунок СЕС, рекомендується розмістити не більше ніж 344 панелі. Така кількість панелей забезпечить об'єкт необхідною потужністю протягом більшу частину року (з березня до другої половини вересня), тоді як у зимові та частково осінні місяці недостатній обсяг електроенергії буде компенсовано за рахунок зовнішнього електропостачання.

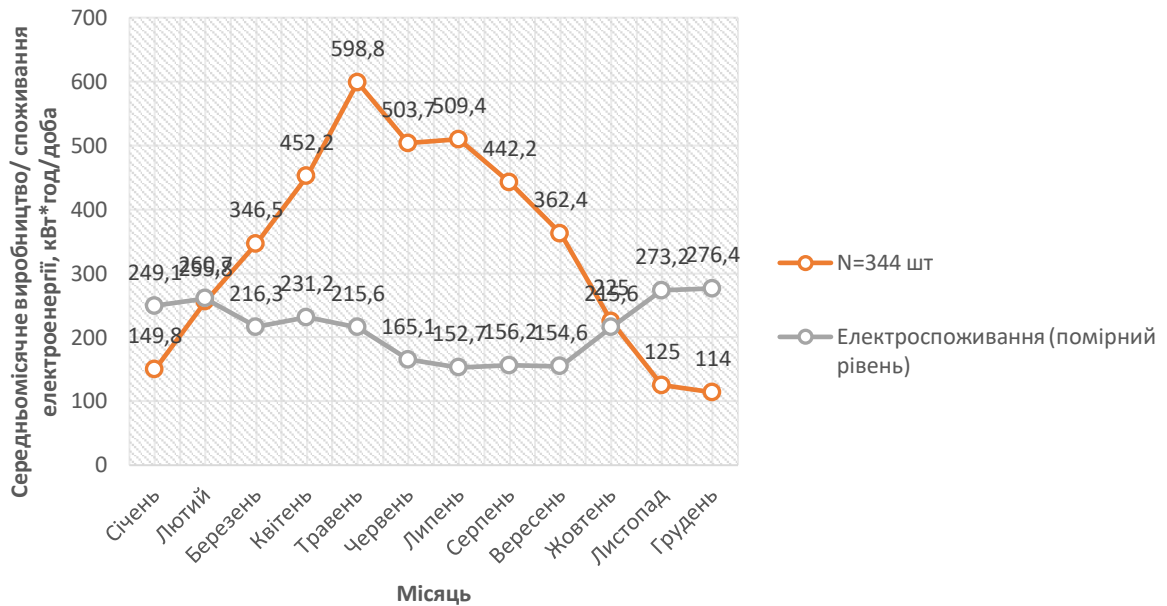


Рисунок 2.6 – Порівняльні графіки середньомісячне виробництво/споживання електроенергії для об’єкту (помірний рівень електрозабезпечення від СЕС)

Менше з тим, всі необхідні функції, що забезпечують діяльність закладу будуть збережені навіть за умови помірною рівня електрозабезпечення від СЕС. У цьому дослідженні задля підвищення візуальної наочності буде виконано побудову графіку виробництва електроенергії за допомогою 344 панелей. Цей графік буде накладено на діаграму потужності, яку споживає об’єкт для забезпечення помірною рівня електричної енергії, як зображено на рис. 2.6.

Аналізуючи рис. 2.6, можемо побачити, що згенерована потужність 344 сонячними панелями дозволяє забезпечити об’єкт електроенергією протягом року за виключенням зимових місяців.

За умови тривалого підтримання складного стану енергетичної галузі та максимальної орієнтації на власне виробництво електроенергії від СЕС протягом року доцільно змінювати рівні електрозабезпечення. Для визначення графіку переходу між режимами проаналізуємо табл. 2.5, де наведено помісячне енергоспоживання об’єкту залежно від запровадженого рівня електрозабезпечення.

Таблиця 2.5 – Помісячне енергоспоживання об'єкту залежно від запровадженого рівня електрозабезпечення

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Рівень енергоспоживання, кВт*год	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Повний	264,4	396,8	<b>288,5</b>	<b>355,5</b>	<b>294,6</b>	<b>208,1</b>	<b>169,4</b>	<b>172,2</b>	<b>170,3</b>	325,7	465,3	471,3
Помірний	249,1	<b>260,7</b>	216,3	231,2	215,6	165,1	152,7	156,2	154,6	<b>215,6</b>	273,2	276,4
Аварійний	<b>142,5</b>	148,3	126,1	133,5	125,7	100,5	94,3	96,1	95,3	125,7	<b>154,5</b>	<b>156,1</b>

Для наочності за даними табл. 2.5 для комбінованого цілорічного режиму електропостачання від СЕС, який включає використання аварійного рівня електрозабезпечення для листопада, грудня і січня, помірний рівень для лютого і жовтня, і повного рівня для всіх інших місяців (березень – вересень), побудуємо відповідний графік (рис. 2.7). Комбінований графік електрозабезпечення у табл. 2.5 виділений жирним шрифтом.

Отже, застосування комбінованого графіку електрозабезпечення дозволить реалізувати надійне електропостачання об'єкту за рахунок власної СЕС протягом всього року навіть в умовах постійного відімкнення зовнішнього електропостачання (найгірший можливий варіант). Незначне недозабезпечення електроенергією від СЕС можливе лише листопаду і грудня. У цей час за відсутності можливості електропостачання від зовнішньої мережі необхідно розробити адміністративні заходи із переведення працівників на дистанційну роботу або розглянути заходи з виведення здобувачів та частини персоналу закладу на канікули та у відпустки.

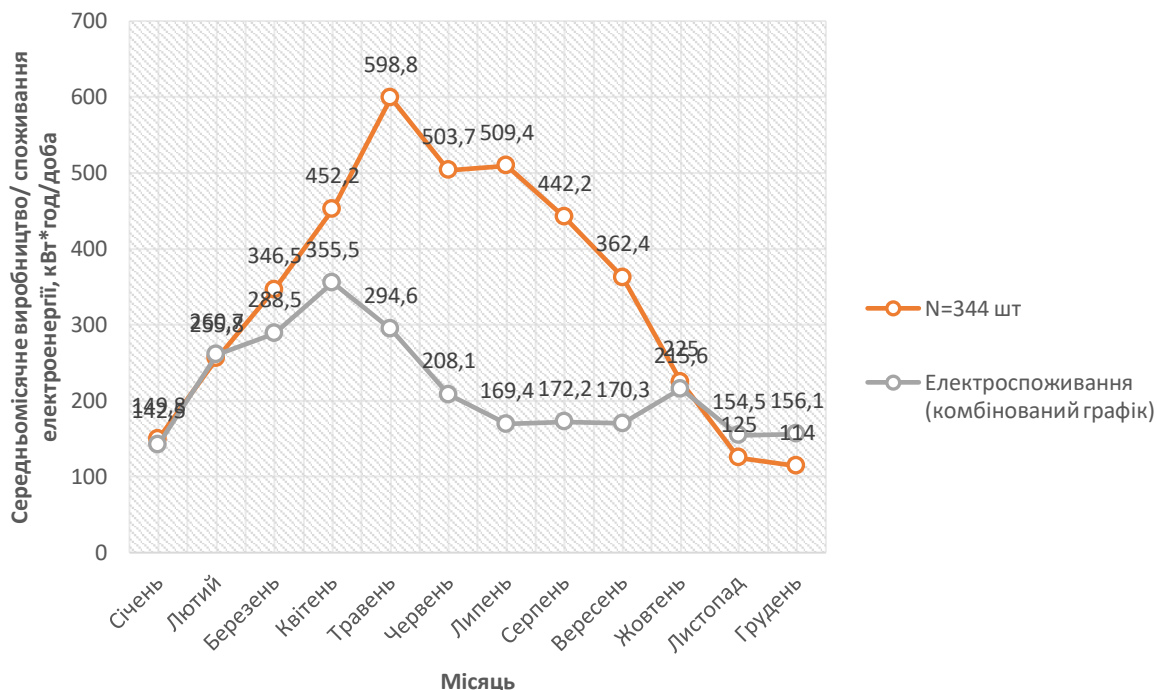


Рисунок 2.7 – Порівняльні графіки середньомісячне виробництво/споживання електроенергії для об'єкту (комбінований графік електрозабезпечення від СЕС)

*Вибір інвертора.* За параметрами максимального навантаження мережі, що виробляється всіма сонячними панелями, підбираємо інвертор гібридної СЕС. Аналіз сучасного ринку інверторів показав, що наразі пропонуються моделі на найбільшу номінальну потужність, що складає 115 *кВт*. З урахуванням того, що всі сонячні панелі мають загальну максимальну потужність  $344 * 0,55 = 189,2$  *кВт*, тому підбираємо 2 інвертори однакової моделі і потужності. Виходячи з цього, обираємо гібридний інвертор WIT 100K-AU (виробник компанія Growatt) у кількості 2 *шт.*, який підходить автономним та гібридним сонячним електростанціям. Його технічні характеристики подані у табл. 2.6 [19].

Таблиця 2.6 – Характеристики інвертора WIT 100K-AU гібридної СЕС

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальна потужність	<i>кВт</i>	100
Максимальна потужність	<i>кВт</i>	110
Мінімальна напруга масиву геліопанелей	<i>В</i>	195
Максимальна напруга масиву геліопанелей	<i>В</i>	1100
Номінальна напруга виходу	<i>В</i>	380/220; 400/230
Номінальна частота вихідного струму	<i>Гц</i>	50/60
Кількість МРРТ	<i>шт.</i>	10
Максимальний вхідний струм на один МРРТ вхід	<i>А</i>	26
ККД	<i>%</i>	98,2
Форма синусоїди	–	правильна
Габарити	<i>мм</i>	820*1350*510
Маса	<i>кг</i>	140
Ступінь захисту	–	IP66
Діапазон температури	<i>°С</i>	-30 – +60
Робочий діапазон вологості	<i>%</i>	0 – 100
Власні потреби	<i>Вт</i>	1

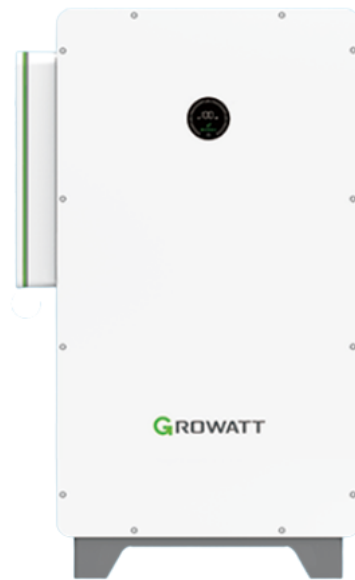


Рисунок 2.8 – Гібридний інвертор WIT 100K-AU

Зважаючи на той факт, що інвертор здатний витримати максимальну напругу в  $1100\text{ В}$ , та беручи до уваги, що приблизно половина всіх сонячних панелей буде приєднана до одного інвертора, необхідно ретельно враховувати специфікації при проектуванні системи (у першому наближенні по  $172\text{ шт.}$ ), то всі  $172$  геліопанелі з'єднати послідовно не можна, адже результуюча напруга такого ланцюга складе  $172 * 42,2 = 7258,4\text{ В}$ , що значно перевищує допустиме значення. У такому випадку кількість геліопанелей ділять на декілька окремих паралельних включень. Всі групи геліопанелей, що працюють на спільний інвертор повинні мати однакову потужність, тобто однакову кількість геліопанелей.

Після виконання перебірних розрахунків було отримано, що на інвертор 1 буде паралельно підключено 8 груп (тобто буде задіяно 8 з 10 доступних виходів MPPT) по 22 сонячні панелі у кожній групі. За умови такого підключення загальна номінальна напруга системи складатиме  $22 * 24 = 528\text{ В} > 195\text{ В}$ , а за умови максимальної потужності –  $22 * 42,2 = 928,4\text{ В} < 1100\text{ В}$ . Загальна кількість геліопанелей, підключена до інвертора 1 складе  $8 * 22 = 176\text{ шт.}$

Відповідно на інвертор 2 залишиться  $344 - 176 = 168\text{ шт.}$

Аналогічно виконуючи перебірні розрахунки отримуємо, що на інвертор

2 буде паралельно підключено 8 груп (тобто буде задіяно 8 з 10 доступних виходів MPPT) по 21 сонячній панелі у кожній групі. За умови такого підключення загальна номінальна напруга системи складатиме  $21 \cdot 24 = 504 \text{ В} > 195 \text{ В}$ , а за умови максимальної потужності –  $21 \cdot 42,2 = 886,2 \text{ В} < 1100 \text{ В}$ .

Принципова схема підключення системи сонячних панелей до інвертора 1 зображена на рис. 2.9. Схема включення геліопанелей до інвертора 2 принципово аналогічна. Відмінність схеми для інвертора 2 від схеми підключення інвертора 1 полягає у підключенні 21 панелі замість 22 на одну групу.

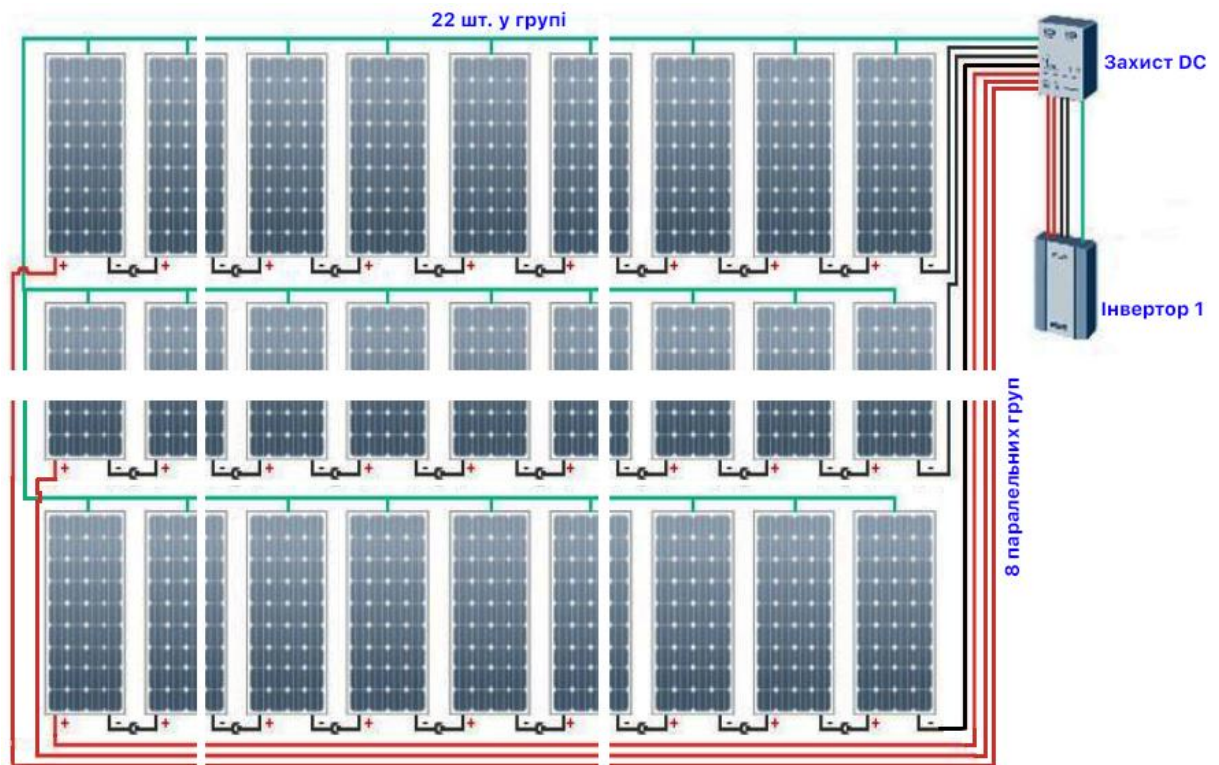


Рисунок 2.9 – Принципова схема підключення системи сонячних панелей до інвертора 1

Вибраний тип інвертора може працювати за умови повної відсутності зовнішнього електроживлення від акумуляторних батарей або їх збірок, а джерелом енергії акумуляторів є сонячні панелі. Автономні інвертори можуть накопичувати сонячну енергію в акумуляторних батареях, а потім спрямовують її через інвертор для живлення об'єкту. Енергопостачання

об'єкту можливе у режимі 24/7.

У світлу пору доби сонячні панелі створюють струм, який через інвертор надходить до точок забору та розподіляється між поточними електроприймачами, що підключені до електромережі, та акумуляторними батареями, куди надходять надлишки невикористаної енергії. Вночі та у випадку недостатності виробництва електроенергії геліопанелями, наприклад, у похмурий день, енергія відбиратиметься з акумуляторного модуля.

*Вибір акумулятора.* Фотопанелі продукують електроенергію вдень, тому акумулятори для гібридної сонячної електростанції мають забезпечувати постачання енергії вночі. При надмірно великій ємності акумулятори можуть залишатися недозарядженими, що негативно впливає на їхній стан і зменшує термін служби. Якщо ж ємність занадто мала, акумулятори не задовільнять потреби в енергії, що може призвести до глибокого розряду, погіршуючи їх ресурс. [20].

При виборі батареї опираємося на зразки, що мають найбільший ресурс роботи навіть за умови високої глибини розряду. У даний час це літій залізофосфатні батареї  $\text{LiFePO}_4$ . Для отримання такої значної ємності як правило здійснюють збірки акумуляторів.

Під час вибору інвертора у зв'язку зі значною загальною потужністю їх було обрано два. Також виходячи з компоновання поля геліопанелей і їх реального розміщення на дахах корпусів будівель поз. 1, 2 і 3, рис. 1.6, задаємося, що матимемо дві СЕС, кожна з яких має власний інвертор та масив акумуляторних батарей, які потім будуть приєднані до загальної системи живлення об'єкту. Отже, виконаємо вибір акумуляторної батареї для кожного інвертора із розрахунку, що інвертор 1 працює на поле сонячних панелей зі  $N_1 = 176$  панелей, що відповідає потужності генерації  $P_{i1} = 96,8 \text{ кВт}$ , а інвертор 2 працює на поле сонячних панелей зі  $N_2 = 168$  панелей, що відповідає потужності генерації  $92,4 \text{ кВт}$ .

Напруга та кількість акумуляторних батарей визначаються характеристиками інвертора, а також необхідною ємністю акумуляторних

блоків.

Відповідно до табл. 2.2 найбільше середньомісячне електроспоживання протягом року із розрахунку на день (грудень) становить  $P_{срдоб} = 471,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ .

Виконаємо розрахунок для одного дня повного рівня електрозабезпечення. Ємність акумулятора не повинна бути меншою за це число з урахуванням запасу на 20–30 %, тобто  $1,2 \cdot 471,3 = 565,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ . Розподілимо цю ємність пропорційно кількості підключених панелей, використовуючи формулу:

$$P_{доб.i} = K \cdot P_{срдоб} \cdot \frac{N_i}{N}. \quad (2.7)$$

У результаті отримуємо:

– середньомісячне енергоспоживання із розрахунку на день, що припадає на систему з інвертором 1

$$P_{доб1} = 565,6 \cdot \frac{176}{344} = 289,4 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

– середньомісячне енергоспоживання із розрахунку на день, що припадає на систему з інвертором 2

$$P_{доб2} = 565,6 \cdot \frac{168}{344} = 276,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

За умови номінальної напруги акумулятора  $U_{ном} = 820 \text{ В}$  ємність батареї, можна розрахувати за формулою (2.9)

$$C_{АКБ} = K \cdot \frac{P_{срдоб}}{U_{ном}}, \quad (2.8)$$

де  $U_{ном}$  – напруга акумулятора, В;

$K$  – коефіцієнт запасу, що враховує запас ємності батареї після доби її розрядки,

$$I_{роз1} = \frac{289,4 \cdot 10^3}{820} = 353 \text{ А} \cdot \text{год};$$

$$I_{роз2} = \frac{276,2 \cdot 10^3}{820} = 337 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Як бачимо, необхідні ємності дуже близькими, тому виконуємо вибір збірки на більшу з двох ємностей, тобто  $P_{АКБ} = P_{обл} = 289,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  або  $I_{роз} = I_{роз1} = 353 \text{ А} \cdot \text{год}$ .

З каталогу компанії Growatt [19] збираємо акумуляторну збірку на основі модулів серії APX тип APX 14.3P-B1-US. Номінальна потужність модуля  $P_{м0} = 14,33 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , тоді необхідна кількість модулів

$$M = \frac{P_{АКБ}}{P_{м0}}, \quad (2.9)$$

$$M = \frac{289,4}{14,33} = 20 \text{ модулів.}$$

Дані акумуляторної збірки подані у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Технічні параметри збірки акумуляторів

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Тип модуля	–	APX 14.3P-B1-US
Кількість модулів у збірці	<i>шт.</i>	20
Номінальна ємність модуля	<i>кВт·год</i>	14,33
Номінальна ємність батареї	<i>кВт·год</i>	286,6
Найбільша потужність батареї	<i>кВт</i>	142,8
Маса	<i>кг</i>	2788,5
напруга номінальна	<i>В</i>	820
Габарити	<i>мм</i>	920*2700*510

Зовнішній вигляд акумуляторної збірки поданий на рис. 2.10.

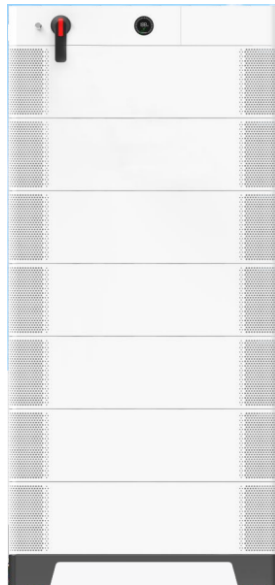


Рисунок 2.10 – Акумуляторна збірка на основі модулів  
APX 14.3P-B1-US компанії Growatt

Обрана акумуляторна збірка оснащена вбудованою системою управління BMS, яка ідеально підходить для використання в автономних системах зберігання енергії, а також у автономних та гібридних сонячних станціях. Серед її переваг можна виділити швидкісний заряд, стабільну роботу при екстремальних температурах, великий ресурс циклів (понад 2000 циклів при 100 % розряді та більше 4000 циклів при розряді на 70–80 %), а також вбудований інтелектуальний захист, який запобігає глибокому розряду, перезаряду та критичним температурам. Збірка також демонструє низький рівень саморозряду – до 1,5 % на місяць..

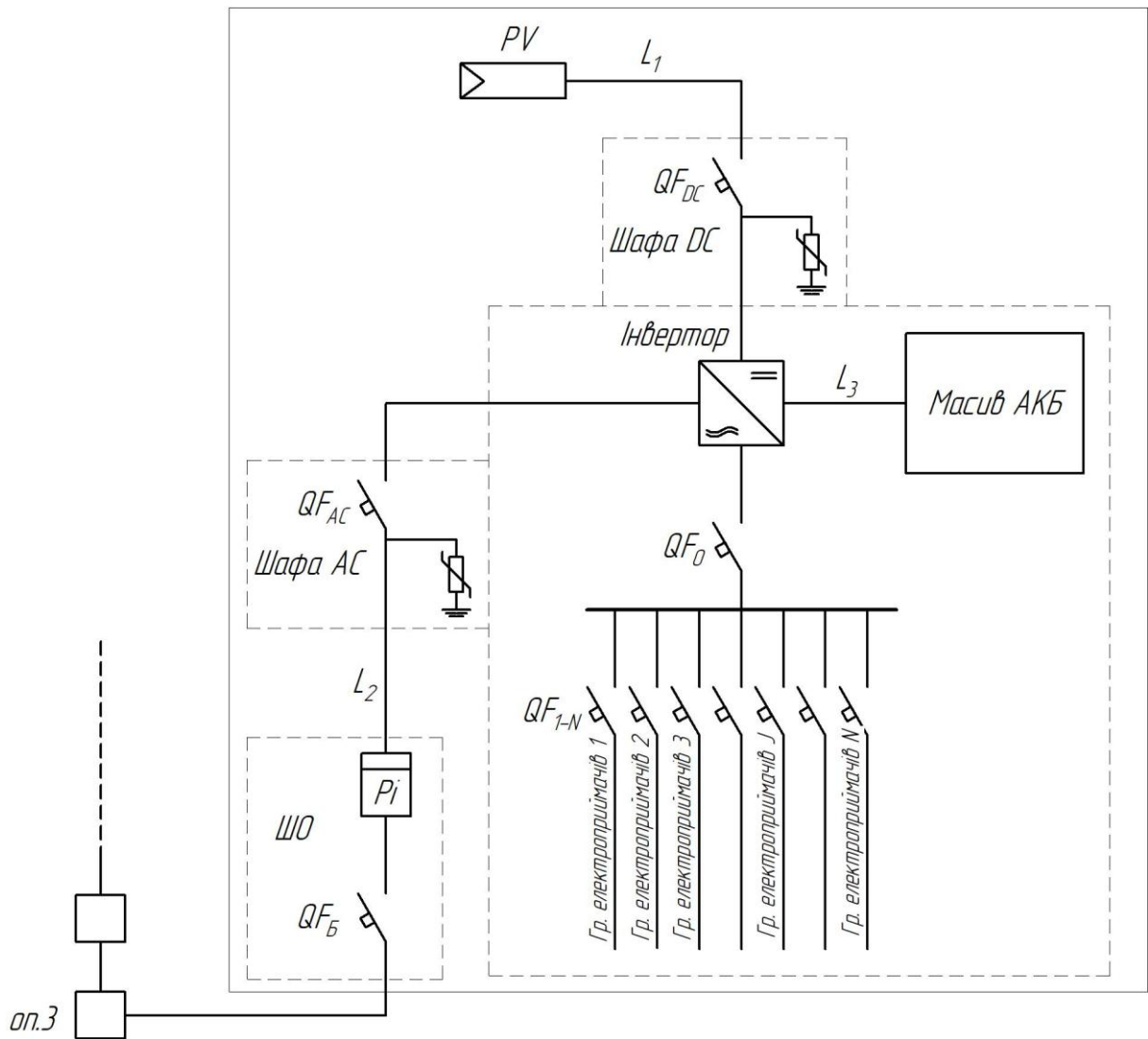


Рисунок 2.11 – Електрична схема гібридної СЕС

*Підбір кабелів.* Щоб з'єднати всі елементи схеми, потрібно правильно вибрати кабелі. Від вибору перерізу жил кабелів залежить надійність, ефективність та безпека роботи всієї системи електропостачання, що виходить від СЕС, показаної на рис. 2.11.

Підбір електричних кабелів, зокрема їх перерізів, здійснюватиметься на основі допустимого тривалого струму. Розрахуємо струми в лініях за формулами (2.10) та (2.11), а отримані дані запишемо в табл. 2.8:

– для трьохфазної електромережі

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n}; \quad (2.10)$$

– для однофазної електромережі

$$I = \frac{S}{U_n}; \quad (2.11)$$

Далі виконуємо порівняння номінальних струмів кабелів із їх розрахунковими величинами. Всі отримані результати систематизовано у табл. 2.9. Крім того, для кожного з кабелів визначаємо втрати напруги:

$$\Delta U = \frac{K \cdot P \cdot L}{C \cdot S} \quad (2.12)$$

де  $L$  – довжина кабеля,  $m$ ;

$S$  – площа перерізу жили кабеля,  $mm^2$ ;

$C$  – коефіцієнт, що враховує матеріал жили;

$P$  – заживлена потужність, що передається кабелем,  $kWt$ ;

$K$  – коефіцієнт розподілу навантаження.

Розрахунки виконуємо для системи на основі найбільш навантаженого інвертора 1. Інвертор 2 через близькість навантажень та симетричну рівномірність джерел живлення буде мати близькі параметри.

Результати розрахунків зводимо у табл. 2.8. Умовні позначення у таблицях відповідно до рис. 2.11.

Таблиця 2.8 – Вибір кабелів для підключення гібридної СЕС (інвертор 1)

№ з/п	$L, m$	$U, kV$	$P, kWt$	$I_p, A$	Марка	$S, mm^2$	$I_{don}, A$	$\Delta U, \%$
$L_1$	70	0,528	96,8	183,3	SOLAR+ H1Z2Z2-K 01X50 VZ	50	276	1,91
$L_2$	50	0,4	96,8	242	ВВГЗ×95с	95	279	0,72
$L_3$	3	0,82	83,2	101,5	ПВЗ×25	25	115	0,14

Для з'єднання геліопанелей між собою і їх приєднання до інвертора обраємо кабель SOLAR+ H1Z2Z2-K 01X50 VZ, призначений для геліопанелей і відповідає стандарту EN 50618.

Між акумуляторною батареєю та інвертором використали мідний кабель

з ПВХ ізоляцією. Для підвищення ефективності обрали короткий і товстий кабель. Усі кабелі пройшли перевірку: розрахункові струми не перевищують допустимих значень, а втрати напруги залишаються в межах 5 %.

*Вибір захисної автоматики для шаф DC і AC.* Правильно обрана захисна автоматика допоможе уникнути ремонту основного обладнання при перевантаженнях, перегріві, зворотних струмах, імпульсних стрибках напруги, ударах блискавки та подібних ситуаціях. У табл. 2.9 наведені обрані компоненти для захисних шаф DC та AC струму.

Таблиця 2.9 – Пристрої автоматичного захисту СЕС

Елемент захисту	Модель
AC шафа	
Силовий автоматичний вимикач	E.INDUSTRIAL.UKM.250SL.250
Обмежувач перенапруг	ETI ETITEC V T2 690/20 3 + 0 RC
DC шафа	
Вимикач автоматичний	DC Suntime SM8-250HPV 2P
Обмежувач перенапруг	ETI ETITEC M T2 PV 1100/20 Y RC

Для цієї гібридної сонячної електростанції обрано захисний комплект, побудований на базі гібридного інвертора WIT 100K-AU, розрахованого на потужність 100 кВт.

*Підбір електролічильника.* Обираємо SmartMeter, який представляє собою інтелектуальний прилад обліку електроенергії. Він не тільки виконує типові функції класичного лічильника, але й запобігає зворотному перетіканню електроенергії до центральної електромережі. Для нашого дослідження був обраний розумний лічильник марки DTSU666-H 250A/50mA, розроблений компанією HUAWEI, який може бути інтегрований в наявну облікову шафу. Даний пристрій адаптований до роботи у трифазній мережі. Його технічні характеристики наведені у табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Характеристика лічильника електричної енергії СЕС

Параметр	Розмірність	Величина
Діапазон вхідної (фазової) напруги	<i>B</i>	176–288
Значення вхідного струму	<i>A</i>	< 250
Точність вимірювання напруги	%	± 0,5
Точність вимірювання струму	%	± 1,0

*Компонування геліополя СЕС.* В Україні зазвичай вважається, що оптимальний кут нахилу сонячних панелей становить від 35 до 45 градусів. Для визначення найбільш відповідного кута для конкретної місцевості, підставляють географічну широту цієї місцевості у формулу (2.13)

$$\varphi = 0,76 \cdot GL + 3,1^\circ, \quad (2.13)$$

де *GL* – географічна широта місцевості, градуси.

Широта на якій знаходиться заклад –  $GL = 50^\circ 55'$  або після приведення результату до десяткової форми та округлення отримаємо  $GL = 50,92^\circ$ . Отже, оптимальний кут нахилу сонячної панелі у м. Суми складе

$$\varphi = 0,76 \cdot 50,92 + 3,1 = 41,8^\circ.$$

Габаритні розміри сонячної панелі Risen Energy RSM110-9-550M гібридної СЕС (див. табл. 2.4) складають 2279 x 1134 x 35 мм (висота x ширина x товщина). Сонячні панелі встановлюємо на дахах існуючих корпусів, деякі з яких є двоскатними (поз. 2 і 3, рис 1.9). Це значить, що розміщення рядів панелей буде визначатися напрямом коника будинку, тобто для будівель 2 і 3 – вздовж довшого їх розміру. Це однозначно визначить орієнтацію сонячних панелей відносно сторін горизонту як південно-західну (азимут 225°), рис. 1.9. Така орієнтація забезпечить гарну та тривалу інсоляцію панелей протягом року. Через значну кількість панелей можливе продовження залишків геліополя на даху будівлі головного корпусу (поз. 1, рис. 1.6). У цьому випадку з метою збереження сталості величини інсоляції панелей їх розміщуємо з таким самим азимутом, що й на іншій частині геліополя.

При встановленні геліопанелей можливі два варіанти їх розміщення: більшою стороною вгору і навпаки. Визначимо більш доцільний спосіб розміщення панелей у межах даху будівлі поз. 2, рис. 1.9.

Розглянемо варіант коли панель розміщуємо більшою стороною вгору (рис. 2.12). Відстань між рядами панелей задаємося із розрахунку

$$s = 1,7 \cdot h \quad (2.14)$$

де  $h$  – висота вертикальної проєкції панелі, яку розраховуємо за формулою (2.15)

$$h = a \cdot \sin \varphi, \quad (2.15)$$

де  $a$  – вертикальний розмір панелі.

Один з розмірів горизонтальної проєкції панелі  $b$  відповідає горизонтальному розміру панелі, а інший може бути визначений за формулою (2.16):

$$l = a \cdot \cos \varphi. \quad (2.16)$$

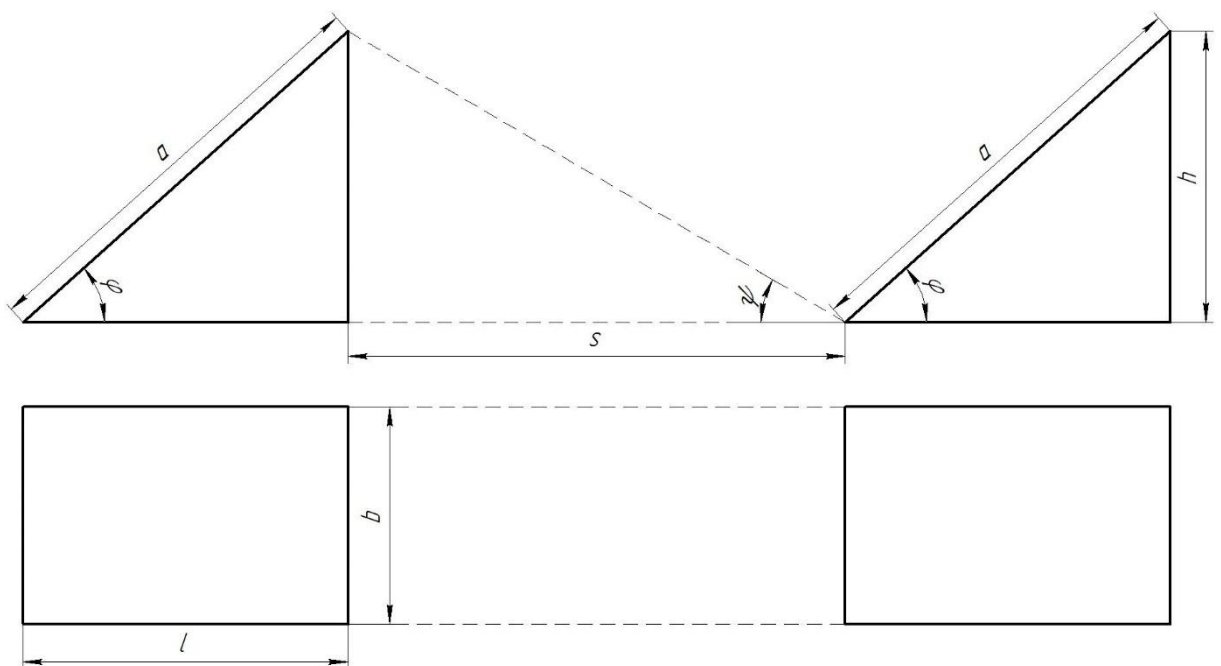


Рисунок 2.12 – Ряди панелей

У нашому випадку при  $a = 2279$  мм і  $b = 1134$  мм отримаємо:

$$h = 2279 \cdot \sin 41,8^\circ = 1519 \text{ мм};$$

$$s = 1,7 \cdot 1519 = 2580 \approx 2600 \text{ мм}.$$

Графічна інтерпретація розрахунків розміщення двох сусідніх рядів геліопанелей (вид збоку та вид згори) – рис. 2.12.

Врахувавши мінімальні відступи від краю даху будівлі як 500 мм, виконаємо планування розміщення геліополя для випадку 1 на даху розміром 39000 x 15630 мм (рис. 2.13 а).

Виконуємо аналогічні розрахунки для другого можливого варіанту встановлення геліопанелі – більша сторона панелі вгору:

$$a = 1134 \text{ мм}; b = 2279 \text{ мм};$$

$$h = 1134 \cdot \sin 41,8^\circ = 756 \text{ мм};$$

$$s = 1,7 \cdot 756 = 1285 \approx 1300 \text{ мм}.$$

Врахувавши мінімальні відступи від краю даху будівлі як 500 мм, виконаємо планування розміщення геліополя для випадку 2 на даху розміром 39000 x 15630 мм (рис. 2.13 б).

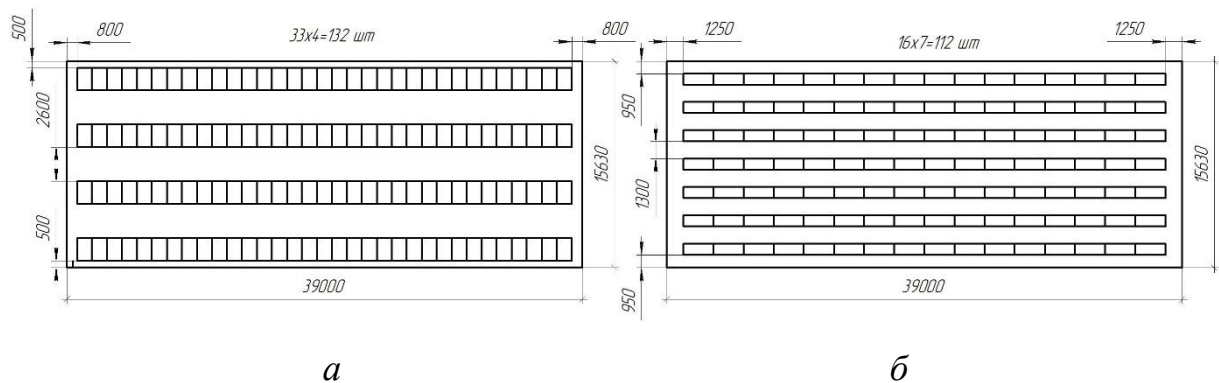


Рисунок 2.13 – Геліополе при розміщенні панелей більшою (а) і меншою (б) стороною догори

Як бачимо з рис. 2.14 на однаковій площі даху, для однакових панелей і їх кутів нахилу у випадку 1 (розміщення панелей більшою стороною вгору) можливо встановити 4 ряди по 33 панелі у ряді, тобто загалом 132 панелі. У випадку 2 можна розмістити 7 рядів по 16 панелей у ряді, тобто загалом 112

панелей, що на 15 % менше.

Отже, остаточно задаємося для проєктування розміщенням геліопанелей більшої стороною вгору. Цей спосіб використовуємо для всіх випадків.

#### **2.4 Висновки з розділу 2**

У розділі було розраховано повне електричне навантаження об'єкту за групами електроприймачів, розраховано середньомісячні значення електроспоживання об'єкту із розрахунку на один день, які лягли в основу графіків електроспоживання і виконано порівняння розрахункового і фактичного енергоспоживання. Після розбивки електроспоживачів на групи було визначено структуру електроприймачів розрахунок гібридної сонячної електростанції. Під час виконання розрахунків гібридної СЕС було визначено можливі графіки роботи об'єкту та підібрано оптимальний (комбінований), визначено необхідну кількість геліопанелей, що змогли б забезпечити необхідне енергоспоживання. Після цього підібрано основне обладнання СЕС, виконано проєктування геліополя із визначенням більш ефективної орієнтації геліопанелей.

### 3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Застосування технологій, що базуються на відновлюваних джерелах енергії, забезпечує не лише постачання необхідної енергії споживачам, але й мінімізує негативний вплив, завданий традиційними методами видобутку енергії з викопного палива.

Застосування сонячних панелей вважається перспективним і економічно вигідним напрямком, яке дозволить забезпечити всі потреби суб'єкта господарювання у електричній енергії.

У розділі розрахуємо економічну складову від запровадження СЕС.

Для техніко-економічного обґрунтування виконують:

- 1) розрахунки вартості капітальних витрат;
- 2) визначення розміру експлуатаційних витрат;
- 3) розрахунки річної економії;
- 4) визначення і подальший аналіз показників економічної ефективності.

#### 3.1 Капітальні затрати

Визначаючи вартість капітальних витрат необхідно знати назви технічних засобів, що утворюють досліджувану систему (у нашому випадку СЕС), їх кількість, вартість одиниці засобу. Всі ці дані подані у табл. 3.1. За даними цієї таблиці розраховують сумарну вартість комплектуючих елементів.

Проектні капіталовкладення

$$K_{np} = K_{об} \cdot \sum_{i=1}^k C_i + Z_{ТЗС} + Z_M + Z_H + Z_{ПР}, \quad (3.1)$$

де  $K_{об} \cdot \sum_{i=1}^k C_i$  – вартість придбання електротехнічного обладнання, включаючи елементи автоматизації та програмне забезпечення, що передбачена проектом, або загальна вартість складових елементів системи;

$Z_{ТЗС}$  – транспортно-заготівельні та складські затрати;

$k$  – число комплектних елементів;

$Z_M$  – затрати, пов’язані із монтажем;

$Z_{PP}$  – додаткові одноразові витрати;

$Z_H$  – затрати з налагодження установки.

Таблиця 3.1 – Капітальні витрати для гібридної СЕС (інвертор 1 + інвертор 2)

№ з/п	Елемент СЕС	Модель / марка	Кількість, шт/м.п	Вартість одиниці, грн	Посилання
1	Інвертор гібридний	WIT 100K-AU	2	720551	[21]
2	Сонячна панель	Risen Energy RSM144-9-550M	344	5998	[22]
3	Масив акумуляторів	APX 14.3P-B1-US	40	215645	[23]
4	Силовий автоматичний вимикач АС	E.INDUSTRIAL.UKM.250SL.250	2	3115	[24]
5	Обмежувач перенапруг АС	ETI ETITEC V T2 690/20 3 + 0 RC	2	3799	[25]
6	Автоматичний вимикач DC	DC Suntime SM8-250HPV 2P	2	5054	[26]
7	Обмежувач перенапруг DC	ETI ETITEC M T2 PV 1100/20 Y RC (для PV систем)	2	3553	[27]
8	Смарт-метр	Huawei DTSU666-H	2	12152	[28]
9	Кабель $L_1$	SOLAR+ H1Z2Z2-K 01X50 VZ	140	658	[29]
10	Кабель $L_2$	ВВГнг3×95	100	1578	[30]
11	Кабель $L_3$	ПВ3×25	6	132	[31]
Вартість сонячної електростанції всього				12436272	

Вартість транспортно-заготівельних і складських витрат задаються як 7 % від вартості обладнання:

$$Z_{ТЗС} = 12436272 \cdot 0,07 = 870539 \text{ грн.} \quad (3.2)$$

Витрати на наладку і монтаж оцінюють як 10 % від вартості обладнання

$$Z_M = 12436272 \cdot 0,1 = 1243627 \text{ грн.} \quad (3.3)$$

Проектні капіталовкладення

$$K_{np} = 12436272 + 870539 + 1243627 = 14550438 \text{ грн.} \quad (3.4)$$

### 3.2 Експлуатаційні затрати

Експлуатаційні затрати об'єкта за рік

$$C = C_a + C_z + C_c + C_T + C_e + C_{np}, \quad (3.5)$$

де  $C_a$  – відрахування на амортизацію;

$C_z$  – зарплата персоналу;

$C_c$  – єдиний соцвнесок;

$C_T$  – затрати на поточний ремонт і техобслуговування;

$C_e$  – тариф на електричну енергію, що споживає установка;

$C_{np}$  – інші додаткові затрати.

Амортизація об'єкту основних засобів розраховується на основі тривалості його ефективного використання. Визначення цього терміну для об'єктів основних засобів і нематеріальних активів здійснюється суб'єктом господарювання самостійно, зважаючи на такі аспекти, як очікувані економічні вигоди, технічні та якісні характеристики основного засобу, а також рівня морального і фізичного зношування. Необхідно враховувати різноманітні фактори, що можуть впливати на здатність використовувати такі активи. Важливо зазначити, що термін корисного використання об'єктів основних засобів для обчислення амортизації повинен відповідати або перевищувати мінімально допустимим строкам експлуатації.

Використаємо прямолінійний метод визначення норми амортизації, тоді постійна впродовж амортизаційного періоду

$$H_a = \frac{\Phi_{II} + Z_p - Л}{\Phi_{II} \cdot T_{II}} \cdot 100 \%, \quad (3.6)$$

де  $\Phi_{II}$  – вихідна вартість основних засобів об'єкта;

$Z_p$  – сумарні витрати на капремонт;

$Л$  – ліквідаційна вартість основних фондів;

$T_{II}$  – тривалість корисного застосування основних засобів.

Норма амортизації СЕС з урахуванням, що термін корисного застосування СЕС складає 25 років, а ліквідаційна вартість і загальні затрати на капітальний ремонт відсутні

$$H_a = \frac{12436272}{12436272 \cdot 25} \cdot 100 \% = 4 \%. .$$

Амортизаційні нарахування за рік

$$C_a = K_{np} \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (3.7)$$

де  $H_a$  – норма амортизації,

$$C_a = 14550438 \cdot \frac{4}{100} = 582018 \text{ грн.}$$

### 3.3 Річний фонд зарплатні

Обчислення річного фонду зарплатні виконується з урахуванням категорійності персоналу, таких як робітники, інженерно-технічний персонал та керівники, які обслуговують конкретний об'єкт. Також це здійснюється відповідно до чисельності працівників, умов їх робочого режиму, годинних тарифних ставок, посадових окладів тощо.

До додаткової заробітної плати належать премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій, доплати і надбавки, гарантійні і компенсаційні виплати, передбачені чинним законодавством.

Номінальний фонд робочого часу за рік на одного працівника встановлюється, виходячи з його робочого графіка, який включає кількість робочих днів і тривалість кожної зміни. Для обслуговування СЕС потрібен електрик 6 розряду. Через те, що СЕС знаходиться на даху будівлі додаткової охорони не потрібно.

Необхідно також зазначити, що у закладі вже наявна посада електрика-електромонтера, тому на нього будуть покладені функції з обслуговування проєктованої СЕС. Тоді експлуатаційні річні затрати по об'єкту складуть  $C_3 = 0$ .

### **3.4 Затрати на техобслуговування, поточний ремонт мереж і обладнання**

Щорічні затрати на техобслуговування, поточний ремонт мереж і електрообладнання охоплюють вартість матеріалів і запасних частин, оплату праці ремонтного персоналу. Ці витрати визначаються на основі фактичних даних підприємства або узагальнено у вигляді процентного співвідношення до капітальних витрат

$$C_T = 0,01 \cdot K_{np}; \quad (3.8)$$

$$C_T = 0,01 \cdot 14550438 = 145504 \text{ грн.}$$

### **3.5 Інші затрати**

Інші витрати, пов'язані з експлуатацією об'єкта, охоплюють витрати на спеціальний одяг, охорону праці тощо. Як правило, ці витрати оцінюються у розмірі 4 % від річного фонду зарплати персоналу, що здійснює обслуговування установки. У нашій ситуації  $C_{np} = 0,04 \cdot C_3 = 0$ .

Загальні експлуатаційні затрати по об'єкту за рік

$$C = 582018 + 145504 = 727522 \text{ грн.}$$

### 3.6 Вартість генерації електричної енергії

Розраховуємо надлишки виробленої електроенергії протягом року для комбінованого графіку енергозабезпечення.

Таблиця 3.1 – Річний енергетичний баланс об'єкту для комбінованого графіку енергозабезпечення

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Кількість електроенергії, кВт*год/день												
Енергоспоживання об'єктом	142,5	260,7	288,5	355,5	294,6	208,1	169,4	172,2	170,3	215,6	154,5	156,1
Виробництво електроенергії від СЕС	149,8	255,8	346,5	452,2	598,8	503,7	509,4	442,2	362,4	225,0	125,0	114,0
Баланс енергії	7,3	-4,9	58,0	96,7	304,2	295,6	340,0	270,0	192,1	9,4	-29,5	-42,1

Як видно з табл. 3.1, знак балансу енергоспоживання об'єкту залежить від місяця року. Від'ємні значення балансу свідчать про необхідність використання додаткового живлення від зовнішньої мережі та купівлю електроенергії за тарифами для бюджетних установ. Додатні значення балансу енергії свідчать про надлишковий виробіток електроенергії, яку у подальшому можна продати зовнішній електромережі за «зеленим» тарифом.

Загальна річна кількість перевиробництва електроенергії СЕС складе

$$W_{річ} = 7,3 \cdot 31 + 58 \cdot 31 + 96,7 \cdot 30 + 304,2 \cdot 31 + 295,6 \cdot 30 + 340 \cdot 31 + 270 \cdot 31 + 192,1 \cdot 30 + 9,4 \cdot 31 = 48187,9 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Прибуток від продажу електроенергії

$$D = W_{річ} \cdot C_{3T}, \quad (3.9)$$

де  $W_{річ}$  – річний виробіток,  $кВт \cdot год$ ;

$C_{зт}$  – вартість однієї кіловат-години за зеленим тарифом (для наземних СЕС 670,43  $кон/кВт \cdot год$  без ПДВ станом на 2024 рік).

$$D = 48187,9 \cdot 614,66 / 100 = 296192 \text{ грн.}$$

### 3.7 Визначення річної економії від впровадження гібридної СЕС

Повна річна економія від впровадження технічного рішення визначається з урахуванням експлуатаційних витрат по об'єкту

$$E_{річ}^{нов} = E_{річ} - C. \quad (3.10)$$

Для сонячної електростанції  $E_{річ} = D$ , тоді у нашому випадку  $E_{річ} < C$  і  $E_{річ}^{нов} < 0$ , тому розраховувати термін окупності за формулою (3.11) немає сенсу.

Простий термін окупності

$$T_{ок} = \frac{K_{np}}{E_{річ}^{нов}}; \quad (3.11)$$

### 3.8 Визначення річної економії від впровадження мережевої СЕС

Виконаємо порівняльні розрахунки для випадку, коли вся електроенергія продається у зовнішню електромережу за «зеленим» тарифом.

У цьому випадку загальна річна кількість виробництва електроенергії мережевої СЕС складе

$$\begin{aligned} W_{річ0} = & 149,8 \cdot 31 + 255,8 \cdot 28 + 346,5 \cdot 31 + \\ & + 452,2 \cdot 30 + 598,8 \cdot 31 + 503,7 \cdot 30 + \\ & + 509,4 \cdot 31 + 442,2 \cdot 31 + 362,4 \cdot 30 + \\ & + 225 \cdot 31 + 125 \cdot 30 + 114 \cdot 31 = 124418,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \end{aligned}$$

Прибуток від продажу електроенергії

$$D_0 = 124418,1 \cdot 614,66 / 100 = 764748 \text{ грн.}$$

Проектні капіталовкладення у цьому випадку суттєво зменшаться адже замість гібридного інвертора можна буде використати більш дешевий

мережевий інвертор, наприклад, Huawei SUN2000-100KTL-M0, який за даними [32] складає 288425 грн. Також така СЕС не потребує акумуляторів.

У табл. 3.2 наведено капітальні витрати для мережевої СЕС.

Таблиця 3.2 – Капітальні витрати для мережевої СЕС (інвертор 1 + інвертор 2)

№ з/п	Елемент СЕС	Модель / марка	Кількість, шт/м.п	Вартість одиниці, грн	Посилання
1	Інвертор гібридний	SUN2000-100KTL-M0	2	288425	[12]
2	Сонячна панель	Risen Energy RSM144-9-550M	344	5998	[2]
4	Силовий автоматичний вимикач АС	E.INDUSTRIAL.UKM.250SL.250	2	3115	[4]
5	Обмежувач перенапруг АС	ETI ETITEC V T2 690/20 3 + 0 RC	2	3799	[5]
6	Автоматичний вимикач DC	DC Suntime SM8-250HPV 2P	2	5054	[6]
7	Обмежувач перенапруг DC	ETI ETITEC M T2 PV 1100/20 Y RC (для PV систем)	2	3553	[7]
8	Смарт-метер	Huawei DTSU666-H	2	12152	[8]
9	Кабель $L_1$	SOLAR+ H1Z2Z2-K 01X50 VZ	140	658	[9]
10	Кабель $L_2$	ВВГнг3×95	100	1578	[10]
11	Кабель $L_3$	ПВ3×25	6	132	[11]
Вартість сонячної електростанції всього				2946220	

Як бачимо, вартість мережевої СЕС такої самої потужності у  $12436272/2946220 = 4,2$  менша порівняно з вартістю гібридної СЕС.

Розрахуємо проєктні капіталовкладення для мережевої СЕС за методикою, поданою вище (див. рівняння (3.1) – (3.4)):

$$Z_{ТЗСО} = 2946220 \cdot 0,07 = 206235 \text{ грн};$$

$$Z_{M0} = 2946220 \cdot 0,1 = 294622 \text{ грн};$$

$$K_{np0} = 2946220 + 206235 + 294622 = 3447077 \text{ грн}.$$

Річні експлуатаційні витрати по об'єкту

$$C_{a0} = 2946220 \cdot \frac{4}{100} = 117849 \text{ грн};$$

$$C_T = 0,01 \cdot 2946220 = 29462 \text{ грн};$$

$$C = 117849 + 29462 = 147311 \text{ грн}.$$

Повна річна економія від впровадження технічного рішення

$$E_{річ}^{нов} = 764748 - 147311 = 617437 \text{ грн}.$$

Простий термін окупності мережевої СЕС

$$T_{ок0} = \frac{3447077}{617437} = 5,6 \text{ роки}.$$

Отримане число терміну окупності не перевищує термін експлуатації СЕС, отже, економічно має сенс запроваджувати такий захід (встановлення мережевої СЕС).

### 3.9 Висновки з розділу 3

У даному розділі було визначено економічну доцільність впровадження гібридної та мережевої СЕС.

Результати розрахунків показали, що для гібридної СЕС:

- проєктні капіталовкладення 14550438 грн;
- річні експлуатаційні витрати 727522 грн;
- річний прибуток 296192 грн.

Аналогічно для мережевої СЕС:

- проєктні капіталовкладення 3447077 грн;

- річні експлуатаційні витрати 147311 *грн*;
- річний прибуток 764748 *грн*
- простий термін окупності 5,6 *року*.

З економічної точки зору встановлення гібридної СЕС зовсім не виправдане, адже річні експлуатаційні витрати перевищують річний прибуток, а також проєктні капіталовкладення значно перевищують річний прибуток.

Менше з тим, встановлення гібридної СЕС може бути виправдане, якщо враховувати, що до економії треба включати можливі збитки від зупинки роботи закладу, що можуть призвести впритул до цілковитої втрати навчального контингенту. Це питання містить багато невідомих змінних та потребує подальшого опрацювання.

При встановленні мережевої СЕС бачимо суттєве зменшення порівняно із гібридною СЕС проєктних капіталовкладень. Це пов'язане із одночасним зростанням прибутків від продажу електроенергії та суттєвим зменшенням капітальних вкладень у зв'язку зі здешевленням інвертора та відсутністю акумуляторів. Такий захід за умови юридичної можливості запровадження має гарні показники окупності та може бути рекомендований до запровадження.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Вимоги безпеки під час використання сонячних батарей**

В останні роки в багатьох європейських країнах, включаючи Україну, стало популярним використання альтернативних джерел енергії для господарських потреб. Однак слід зазначити, що в Україні досі немає специфічного законодавства щодо застосування сонячних батарей.

Тим не менш, виробники сучасних екологічних електричних установок рекомендують прирівнювати ці вироби до звичайних побутових електроприладів, що дозволяє уникнути отримання будь-яких спеціальних дозволів.

Відповідно до статті 11 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» [33], функціонування альтернативних джерел енергії на об'єктах альтернативної енергетики здійснюється за умовами:

- 1) забезпечення безпеки робіт та проведення державного контролю за режимами споживання енергії;
- 2) гарантування енергетичної безпеки, що забезпечує технічне та економічне задоволення періодичних, поточних і перспективних потреб споживачів енергії;
- 3) дотримання технологічних вимог до виробництва, акумуляування, передачі, постачання та споживання енергії;
- 4) дотримання єдиних державних норм, правил і національних стандартів усіма учасниками відповідних відносин;
- 5) суворого дотримання правил експлуатації об'єктів альтернативної енергетики, які регламентовані нормативно-правовими актами, були обов'язковими для виконання всіма суб'єктами підприємницької діяльності.

Іншим законодавчим актом є закон України «Про альтернативні джерела енергії», де розглянуто механізми протиаварійного захисту та забезпечення екологічної безпеки під час використання альтернативних джерел енергії [33].

Для ефективної роботи СЕС та передачі енергії в загальну мережу, необхідно встановити кілька додаткових пристроїв. [34].

Зважаючи на те, що ефективність роботи системи суттєво залежить від стану експлуатаційної придатності акумуляторних батарей, надзвичайно важливо ознайомитися з інструкцією з охорони праці для стаціонарних акумуляторних систем.

Оскільки сонячна електростанція включає в себе й інші електричні компоненти, такі як інвертори та контролери, існує необхідність суворо дотримуватися комплексних рекомендацій і заходів для забезпечення безпечного використання електроустановок. Ізолювання струмоведучих частин здійснюється шляхом накладення ізоляційного шару, щоб запобігти випадковому контакту з струмопровідними елементами. Засоби електрозахисту становлять автономні пристрої, які надійно захищають осіб, що працюють з електроустановками, від ураження електричним струмом, дії електричної дуги та впливу електромагнітного поля [35].

Існують основні та додаткові електрозахисні ізолювальні засоби. Основними вважаються ті засоби, ізоляція яких здатна тривалий час витримувати робочу напругу електроустановки. Додаткові ізолювальні засоби мають обмежені ізолювальні характеристики, тому їх використовують лише для підсилення захисної ефективності основних засобів, разом з якими вони застосовуються [36].

#### **4.2 Інструктаж з охорони праці, стажування (дублювання)**

Усі співробітники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, а також під час виконання своїх обов'язків, повинні проходити на підприємстві навчання у вигляді інструктажу з охорони праці. Він включає надання першої допомоги постраждалим у нещасних випадках, а також навчання правилам поведінки та діям у випадку аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих. Залежно від характеру і часу проведення, інструктажі з охорони праці

поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [37].

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Нові співробітники на підприємстві, після проходження початкового інструктажу на робочому місці, обов'язково під керівництвом досвідчених та кваліфікованих спеціалістів мають пройти стажування, яке може тривати від 2 до 15 змін, або дублювання, що триває не менше шести змін, перш ніж розпочати самостійну роботу. Співробітники, які відповідають за безпеку експлуатації важливих і складних промислових об'єктів з підвищеним ризиком або виконують окремі небезпечні роботи (наприклад, на теплових та атомних електростанціях, у гірничодобувній галузі та на інших схожих об'єктах), повинні пройти дублювання з обов'язковим включенням в програму протиаварійних і протипожежних тренувань, які проводяться згідно з планом ліквідації аварій.

Дозвіл на стажування (дублювання) оформлюється наказом або розпорядженням на підприємстві або у відповідному структурному підрозділі.

Стажування реалізується на основі програм, спеціально створених для певної професії, посади або робочого місця.

### **4.3 Висновки з розділу 4**

Наразі в Україні немає спеціалізованого законодавства стосовно використання сонячних батарей. Тому для забезпечення охорони праці при їх експлуатації ми можемо керуватися такими нормативно-правовими документами: Законом України «Про альтернативні джерела енергії», «Інструкцією з охорони праці під час експлуатації стаціонарних акумуляторних батарей», а також основами охорони праці при використанні електроустановок.

Для гарантування надійного функціонування енергетичних об'єктів у надзвичайних ситуаціях та в умовах воєнного стану слід заздалегідь

організувати та реалізувати інженерно-технічні, технологічні та організаційні заходи, спрямовані на підвищення стійкості їхньої роботи.

Під час проєктування схем зовнішнього електропостачання важливих об'єктів інфраструктури необхідно передбачати їх електропостачання від декількох незалежних та територіально рознесених джерел живлення. Використання відновлювальних джерел електроенергії призводить до більшого підвищення стійкості такої системи електропостачання.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянуто актуальне та важливе питання, пов'язане із забезпеченням надійності електропостачання закладу вищої освіти. Серед різних шляхів досягнення надійності електропостачання у роботі акцентовано увагу на використанні власних резервних джерел живлення на основі застосування СЕС.

Україна в цілому і Сумщина зокрема мають високий потенціал інсоляції, що зумовлює постійне зростання потужностей СЕС, незважаючи на планомірне зменшення вартості «зеленого» тарифу і створення штучних юридичних обмежень з реєстрації таких бізнесів.

Як показали техніко-економічні розрахунки, досить ефективним та рекомендованим способом заробітку є встановлення мережевих СЕС. Така станція має досить короткий термін окупності 5,6 року. Однак вона не дозволить забезпечити надійне електропостачання, адже вся вироблена енергія буде передаватися до загальної електромережі.

Менше з тим, встановлення гібридної СЕС дозволить забезпечити надійність електропостачання, але через значну вартість акумулятора та гібридного інвертора така СЕС не має економічного сенсу. Як показали розрахунки, для гібридної СЕС річні експлуатаційні витрати суттєво перевищують річний прибуток, а вартість гібридного інвертора у декілька разів перевищує вартість мережевого на аналогічну потужність.

Отже, використання гібридної СЕС може забезпечити стабільну роботу будь-якого підприємства, організації чи закладу навіть в умовах тривалої відсутності електропостачання. У такому випадку питання економічної доцільності потребує більш докладного вивчення з позицій аналізу розмірів можливих економічних збитків, які можуть бути отримані під час тривалих простоїв, а також можливих гарних перспектив, пов'язаних із покращенням репутації закладу як надійного, що може позитивно вплинути на ведення освітньої діяльності закладу та забезпечити додаткові надходження коштів.

У роботі виконано аналіз існуючих технологій сонячних елементів, розглянуто їх переваги та недоліки, враховано досвід експлуатації деяких типів панелей і їх доступність у продажу і загальну поширеність. Як результат було обрано панель монокристалічного типу Risen Energy RSM110-9-550M, що має порівняно високий ККД (21,3 %).

На підставі розрахунків електроспоживання було оцінено величину потенційного навантаження на проєктовану СЕС та визначено необхідну кількість геліопанелей. Під час виконання цих розрахунків було розглянуто декілька можливих рівнів енергозабезпечення та підібрано комбінований графік, що дозволить максимально оптимізувати енергобаланс СЕС з ухилом на автономне енергозабезпечення. Завершальним етапом розрахунку СЕС став підбір основного електричного обладнання, яке забезпечить її працездатність.

У розділі «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» розглянуто важливі питання безпеки використання сонячних панелей, важливості та алгоритму інструктажів з техніки безпеки, а також підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання дипломної роботи для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», денної та заочної форм навчання. – Суми: Сумський НАУ, 2024. – 30 с.
2. Рожков П.П. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність електричних мереж» / П. П. Рожков, С. Е. Рожкова. – Харків : ХНАМГ, 2008. – 89 с.
3. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж [Електронний ресурс] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 457 с.
4. Правила улаштування електроустановок [Текст]; Міненерговугілля України. – Київ : Індустрія, 2022. – 800 с.
5. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – [https://5watt.ua/uk/blog/statti/kategoriyi-elektropostachannya?srsltid=AfmBOopFB7MJx1ni1IINyrajGHhA1oi5BoSgq\\_zX SJq6depT2ULIQyZS](https://5watt.ua/uk/blog/statti/kategoriyi-elektropostachannya?srsltid=AfmBOopFB7MJx1ni1IINyrajGHhA1oi5BoSgq_zX SJq6depT2ULIQyZS) Категорії електропостачання.
6. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://www.pveducation.org/> С. Honsberg, S. Bowden Photovoltaics.
7. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://sspu.edu.ua/> – Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка.
8. Шкарлет С. Освіта в Україні в умовах воєнного стану : Інформаційно-аналітичний збірник // С. Шкарлет, А. Вітренко, В. Рогова та ін., всього 90 осіб. – МОН : Київ, 2022. – 358 с.
9. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://ukraine.un.org/uk/> Атаки на енергетичну інфраструктуру України

становлять загрозу ключовим аспектам життя напередодні зими – спостерігачі ООН з прав людини.

10. Возняк О. Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О. Т. Возняк, М. Є. Янів // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. Політехніка". Теорія і практика буд-ва. – 2010. – № 664.

11. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://www.google.com.ua/maps/>

12. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://mepr.gov.ua/news/39661.html> Екологічний паспорт Сумської області станом на 01.01.2024.

13. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://prel.prom.ua/n234221-yaki-nyuansi-roboti.html> Які нюанси роботи сонячної електростанції в зимовий період?

14. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://strategycouncil.com/files/research/en/38.pdf> Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential, National Investment Council of Ukraine, 2018.

15. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://eds-development.com/yak-vibrati-zemelnudilyanku-pid-ses-top-5-rekomendacij-vid-eds-development/> Як вибрати земельну ділянку під СЕС: ТОП-5 рекомендацій від ЕДС-Девелопмент.

16. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Видання офіційне [Текст] – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 103 с.

17. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://sunsayenergy.com/technology/sonyachna-domashnyaelektrostantsiya-dlya-privatnogo-budinku> Сонячна домашня електростанція для приватного будинку.

18. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://lvivskiy-balkon.lviv.ua/index.php?mact=Products,cntnt01,details,0&cntnt01productid=179>

[&cntnt01detailtemplate=shop&cntnt01returnid=539](https://en.growatt.com/products) Сонячна панель Risen Energy RSM144-9-550M.

19. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://en.growatt.com/products>

20. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <http://ukrenerho.com/sonyachni-batareyi-kupiti-v-ukrayini/> Сонячні батареї в Україні.

21. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://watt.net.ua/invertori/invertor-gibridnij-growatt-wit-100k-au.html> Інвертор гібридний Growatt WIT 100K-AU.

22. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://lvivskiy-balkon.lviv.ua/index.php?mact=Products.cntnt01.details,0&cntnt01productid=179> [&cntnt01detailtemplate=shop&cntnt01returnid=539](https://en.growatt.com/products) Сонячна панель Risen Energy RSM144-9-550M.

23. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://watt.net.ua/akkumuljatornie-batarei/akkumuljator-growatt-apx-14-3p-b1--80v--14-33kvt-g.html> Акумулятор Growatt APX 14.3P-B1, 80В, 14.33кВт\*г

24. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://electrotorg.biz.ua/product/shkafnoy-avtomaticheskij-vyklyuchatel-3-faznyy-250a-eindustrialukm250sl250-enextenekst> Шафовий автоматичний вимикач 3-х фазний, 250 А E.INDUSTRIAL.UKM.250SL.250.

25. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://electrocontrol.com.ua/ua/ogranichiteli-perenapryazheniya/2442988-ogranichitel-perenapryazheniya-eti-etitec-v-t2-690-20-3-0-rc> Обмежувач перенапруги ETI ETITEC V T2 690/20 3 + 0 RC.

26. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – [https://e-energy.in.ua/Related\\_products/avtomatichnij-vymykach-postijnogo-strumu-dc-suntree-sm8-250hpv-2p-1000v-250a.html](https://e-energy.in.ua/Related_products/avtomatichnij-vymykach-postijnogo-strumu-dc-suntree-sm8-250hpv-2p-1000v-250a.html) Автоматичний вимикач постійного струму DC Suntree SM8-250HPV 2P 1000В 250А.

27. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://electrocontrol.com.ua/ogranichiteli-perenapryazheniya/2440516-ogranichitel-perenapryazheniya-eti-etitec-m-t2-pv-1100-20-y-rc-dlya-pv-sistem> Обмежувач перенапруг ETI ETITEC M T2 PV 1100/20 Y RC (для PV систем).
28. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – [https://sun-energy.com.ua/solar-power/dongle/huawei\\_dtsu666-h?srsltid=AfmBOoqHtYgRcYXhnT8Z2iJLVilIcgWdz6dbmlkXdYzQKwg-KF53nXkd](https://sun-energy.com.ua/solar-power/dongle/huawei_dtsu666-h?srsltid=AfmBOoqHtYgRcYXhnT8Z2iJLVilIcgWdz6dbmlkXdYzQKwg-KF53nXkd) Смарт-метр Huawei DTSU666-Н.
29. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://mardalcables.com/kabel-ta-provid/kabeli-solar/kabel-faber-solar-h1z2z2-k-01x50-vz-1kv-chornyi/?srsltid=AfmBOooXcxNJJYhqaIpHnE7w4QXkLSLvheaqmWVt1rb4uLhBN5AruUTH> Кабель SOLAR+ H1Z2Z2-K 01X50 VZ 1кВ чорний.
30. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – [https://ecshop.com.ua/p108175-kabel\\_vvgng\\_3h\\_95?srsltid=AfmBOoo0q2BbikUTUG7jPFj1ELoPj-XOVJ3Jy59WSU0P9PgW-34okbfl](https://ecshop.com.ua/p108175-kabel_vvgng_3h_95?srsltid=AfmBOoo0q2BbikUTUG7jPFj1ELoPj-XOVJ3Jy59WSU0P9PgW-34okbfl) Кабель ВВГнг 3х 95.
31. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://shop220.com.ua/products/provod-pv3-25-mm-kv-belyi-zztsm> Провід ПВ-3 25 мм кв, білий, ЗЗЦМ.
32. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <https://soncedim.com.ua/product/merezhevii-invertor-huawei-sun2000-100ktl-m0> Мережевий інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M0
33. [Електронний інтернет-ресурс] Режим доступу – <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/555-15> Закон України «Про альтернативні джерела енергії», редакція від 16.07.2015 р.
34. Носенко Ю. Сучасні сонячні технології / Юрія Носенко // Життєве середовище. – №18 (241) – 2012. – С 1.
35. Третьяков О. В. Охорона праці: навч. посібник / О. В. Третьяков, В. В. Зацарний, В. Л. Безсонний ; ред. К. Н. Ткачук. - К. : Знання, 2010. – 168 с.

36. Панькевич А. С. Вимоги безпеки під час використання сонячних батарей [Електронний ресурс] / А. С. Панькевич, М. С. Лемешев // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції “Інноваційні технології в процесі підготовки фахівців”, 3-4 квітня 2016 р. - С. 136–138.

37. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник / В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів : Афіша, 2000. – 350 с.

38. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– Київ, 2010. – 487 с.

39. Best Research-Cell efficiency chart. [online] [31.01.2025]. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

40. Rühle, S. (2016). Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy*. 130: 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>.

41. LONGi Sets New World-Record for Silicon Solar Cell Efficiency, Launching 2nd Generation Ultra-Efficient BC-Based Module. Longi. [online] [31.01.2025]. Available at: <https://www.longi.com/en/news/longi-hi-mo9-bc-world-record>.

42. Dhonde, M., Sahu, K., Das, M. (2022). Review-recent advancements in dye-sensitized solar cells; from photoelectrode to counter electrode. *Electrochem. Soc.* 169 066507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac741f>.

43. Fu, J., Yang, Q., Huang, P. et al. (2024). Rational molecular and device design enables organic solar cells approaching 20 % efficiency. *Nat. Commun* 15, 1830. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46022-3>.

44. Manser, J. S., Christians, J. A., Kamat, P. V. (2017). Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites. *Chem. Rev.* 116 (21): 12956-13008 (2016) <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00136>.

45. Jiang, X. et al. Lang, F. & Li, Yongfang. (2024). Isomeric diammonium passivation for perovskite-organic tandem solar cells. *Nature* 635 (8040): 860-866. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08160-y>.

46. LONGi sets a new world record of 33.9 % for the efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells. Longi. [online] [31.01.2025]. Available at: <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells>.

47. Shishodia, S., Chouchene, B., Gries, T., & Schneider, R. (2023). Selected I-III-VI<sub>2</sub> semiconductors: synthesis, properties and applications in photovoltaic cells. *Nanomaterials*, 13 (21), 2889. <https://doi.org/10.3390/nano13212889>.

48. Jeco-Espaldon, B. M. Y., Tamaki, R. Giteau, M. (2023). Electrical passivation of III-V multijunction solar cells with luminescent coupling effect. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 249, 112045, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112045>.

49. В. М. Козін, Б. О. Винниченко. Підвищення теплонадходження геліопанелі для вироблення теплової енергії / Наукові праці – Одеса, Одеська національна академія харчових технологій: 2017. – Том 81, Вип. 1. – С. 147–152.

# ДОДАТКИ