

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ, ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ТА  
МЕХАТРОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ С.В. Єнчев  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 141 «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

**Тема: «Енергозбереження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчику»**

Виконавець \_\_\_\_\_ студент групи М-141-24-1-МН Герук Максим Вячеславович  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Кравчук Микола Петрович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ Вальченко О.І.  
(підпис) (ПІБ)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ Л.І. Павлюх  
(підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ М.П. Кравчук  
(підпис) (ПІБ наукового керівника)

КИЇВ 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО**  
**«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

Факультет аерокосмічний  
Кафедра електричної інженерії, енергоменеджменту та мехатроніки  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(шифр, найменування)

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

С.В.Снчев

«31» липня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на виконання кваліфікаційної роботи (проекту)**

Герука Максима Вячеславовича  
(П.І.Б. випусника)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Енергозбереження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчику» затверджена наказом в.о. Президента КАІ «Про затвердження тем та призначення керівників кваліфікаційних робіт» від «31» липня 2025 р. №1337/ст.

2. Термін виконання кваліфікаційної роботи: з 29.09.2025р. по 31.12.2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: електричні параметри електроспоживання злітно-посадкового майданчика; кліматичні та сонячно-енергетичні характеристики району розташування; технічні параметри елементів сонячної системи (фотоелектричних модулів, інверторів, акумуляторних батарей); основні параметри існуючої системи електропостачання та діючі тарифні й вартісні показники; нормативно-правові вимоги та задані якісні критерії щодо надійності й енергоефективності системи.

4. Зміст пояснювальної записки:

Огляд літератури та аналіз сучасного стану питання; Проектування сонячної електричної станції для злітно-посадкового майданчику; Заходи забезпечення експлуатаційних характеристик критичних генеруючих об'єктів України; Інтеграція сонячної електричної станції в систему електропостачання злітно-посадкового майданчику.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: презентація

## 6. Календарний план-графік

№	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Аналіз та обґрунтування вибору інформаційних джерел	31.07.2025 – 01.09.2025	<i>Виконано</i>
2.	Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження	01.09.2025 - 20.10.2025	<i>Виконано</i>
3.	Обробка відповідного теоретичного та практичного технічного матеріалу.	01.09.2025 - 20.10.2025	<i>Виконано</i>
4.	Робота над розділом №1	01.10.2025 - 22.10.2025	<i>Виконано</i>
5.	Робота над розділом №2	10.10.2025 - 25.10.2025	<i>Виконано</i>
6.	Робота над розділом №3.	10.10.2025 - 29.10.2025	<i>Виконано</i>
7.	Розгляд питання охорони праці	10.10.2025 - 29.10.2025	<i>Виконано</i>
8.	Розгляд питання охорони навколишнього середовища	01.11.2025 - 20.11.2025	<i>Виконано</i>
9.	Робота над оформленням обов'язкового ілюстрованого матеріалу, оформлення пояснювальної записки	01.11.2025 - 20.11.2025	<i>Виконано</i>
10.	Перевірка роботи на добросовісність. Підготовка до захисту	12.12.2025	<i>Виконано</i>

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доцент Вальченко О.І.		
Охорона навколишнього середовища	к.т.н., доцент Павлюх Л.І.		

8. Дата видачі завдання: «01» вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Кравчук М. П.  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ Герук М.В.  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

«Енергозбереження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика»: 107., 14 рис., 10 табл., 2 графіки, 33 літературних джерел.

Тема кваліфікаційної роботи Energy saving of the solar power supply system of the runway

**Об'єкт дослідження:** енергозбереження в системі електропостачання злітно-посадкового майданчика (вертодрому).

**Предмет дослідження:** методи та засоби вибору сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика.

**Мета роботи:** підвищення енергоефективності та надійності електропостачання злітно-посадкового майданчика шляхом розроблення та обґрунтування сонячної системи електропостачання.

**Наукова новизна:** комплексний підхід до енергозбереження в системі «мережа – сонячна електростанція – акумуляторне накопичення» з урахуванням специфіки експлуатації злітно-посадкового майданчика.

**Методи дослідження:** аналіз і синтез літературних джерел; розрахунково-аналітичні та порівняльні методи; техніко-економічний аналіз.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ЗЛІТНО-ПОСАДКОВИЙ МАЙДАНЧИК, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ, АКУМУЛЯТОРНЕ НАКОПИЧЕННЯ.

У роботі досліджено можливості підвищення енергоефективності систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків шляхом упровадження сонячної (гібридної) системи електропостачання. Проаналізовано структуру та режими роботи існуючої системи електропостачання, запропоновано варіант модернізації із застосуванням фотоелектричних модулів і акумуляторного накопичення. Розраховано основні параметри сонячної системи, оцінено її техніко-економічну доцільність. Розроблені підходи та отримані результати можуть бути використані під час проєктування й модернізації систем електропостачання інших злітно-посадкових майданчиків та подібних об'єктів інфраструктури.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВИХ МАЙДАНЧИКІВ.....	12
1.1. Роль та значення систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків у забезпеченні безпеки польотів.....	12
1.2. Класифікація та структура систем електропостачання аеродромів і злітно-посадкових майданчиків.....	14
1.3. Сонячні (фотоелектричні) системи електропостачання: принцип дії, основні елементи та режими роботи.....	16
1.4. Поняття, критерії та показники енергозбереження в системах електропостачання.....	21
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА СТАНУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА.....	31
2.1. Характеристика об'єкта – злітно-посадкового майданчика та його електроприймачів.....	31
2.2. Опис існуючої системи схеми електропостачання злітно-посадкового майданчика.....	38
2.3. Дослідження енергоспоживання та графіків навантаження основних споживачів.....	45
2.4. Втрати електричної енергії в існуючій системі та визначення основних зон неефективності.....	50
2.5. Оцінка потенціалу впровадження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика.....	55
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА.....	61
3.1. Обґрунтування вибору структури сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика.....	61
3.2. Розрахунок необхідної потужності та конфігурації фотоелектричних модулів.....	66
3.3. Вибір та розрахунок акумуляторних батарей і перетворювального обладнання.....	72
3.4. Розробка схеми приєднання сонячної системи до існуючої мережі електропостачання злітно-посадкового майданчика.....	75
3.5. Розробка комплексу енергозберігаючих заходів в системі електропостачання (оптимізація режимів, керування навантаженням, резервування).....	75
3.6. Техніко-економічний розрахунок ефективності впровадження сонячної системи (строк окупності, економія електроенергії, показники ефективності).....	81
3.7. Оцінка надійності та безперервності електропостачання злітно-посадкового майданчика при використанні сонячної системи.....	84

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА.....	87
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час виконання робіт.....	87
4.2. Вимоги техніки безпеки при монтажі, обслуговуванні та експлуатації фотоелектричних модулів і електрообладнання.....	89
4.3. Засоби індивідуального та колективного захисту персоналу.....	91
4.4. Організаційні заходи з охорони праці та інструктажі для персоналу.....	95
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА.....	96
5.1. Аналіз впливу традиційних систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків на довкілля.....	96
5.2. Екологічні переваги застосування сонячних систем електропостачання.....	98
5.3. Заходи щодо мінімізації впливу на навколишнє природне середовище при монтажі та експлуатації сонячних панелей і акумуляторних батарей.....	99
5.4. Утилізація та переробка відпрацьованих фотоелектричних модулів та акумуляторних батарей.....	101
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104

## **СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

- БПЛА – безпілотний літальний апарат  
НТД – науково-технічна документація  
ПАТ – приватне акціонерне товариство  
АК- акціонерна компанія  
АЕС – атомна електростанція  
ГЕС – гідроелектростанція  
ТЕЦ – теплоелектроцентраль  
ТЕС – теплова електростанція  
ГАЕС – гідроакumuлююча електростанція  
ЛЕП – лінія електропередачі  
GPS – система глобальної супутникової навігації  
ТП – трансформаторна підстанція  
ОЕС – об'єднана енергетична система  
ПЗ – програмне забезпечення  
ІЧ- інфрачервоний діапазон  
УФ – ультрафіолетовий діапазон  
СМО – система масового обслуговування  
MPPT – Maximum Power Point Tracking

## ВСТУП

Сучасний розвиток авіаційної галузі України та світу супроводжується підвищенням вимог до надійності, безперервності та енергоефективності електропостачання аеропортової інфраструктури. Особливо критичним є гарантоване й якісне електроживлення злітно-посадкових майданчиків, адже від стабільності роботи світлосигнальних систем, засобів радіонавігації та зв'язку, метеозабезпечення й аварійного освітлення безпосередньо залежить безпека зльоту, посадки та маневрування повітряних суден. Відхилення параметрів живлення або перерви електропостачання можуть спричиняти порушення норм безпеки, затримки/скасування рейсів, позаштатні ситуації та матеріальні втрати.

В умовах актуальних викликів для енергосистеми України (зростання вартості енергоресурсів, зміни структури генерації, пошкодження інфраструктури, інтеграція до європейського енергопростору) підвищення енергоефективності та енергозбереження на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема на аеродромних об'єктах, є пріоритетним. Зменшення споживання з централізованих мереж, оптимізація режимів роботи обладнання та впровадження відновлюваних джерел енергії підвищують енергетичну стійкість авіаційної інфраструктури.

Перспективним напрямом є застосування сонячних фотоелектричних систем як локального (основного та/або резервного) джерела живлення критичних споживачів злітно-посадкового майданчика. Водночас встановлення фотоелектричних модулів без урахування режимів роботи об'єкта, сезонності сонячної радіації, структури навантажень та вимог до надійності не гарантує максимального ефекту. Потрібен комплексний інженерний і системотехнічний підхід: аналіз чинної схеми електропостачання, оцінка втрат і потенціалу сонячної генерації, оптимальний вибір структури СЕС та її коректна інтеграція із забезпеченням резервування й стабільності параметрів електроживлення. Пріоритетом є безпека польотів, тому енергозберігаючі рішення мають не знижувати, а підвищувати відмовостійкість і надійність.

**Об'єкт дослідження** – система електропостачання злітно-посадкового майданчика як сукупність джерел живлення, розподільчих мереж, перетворювального обладнання та електроприймачів.

**Предмет дослідження** – процеси енергозбереження, підвищення енергоефективності та надійності функціонування сонячної системи електропостачання, а також методи її інтеграції в існуючу систему.

**Мета роботи** – підвищення енергоефективності електропостачання злітно-посадкового майданчика шляхом розробки та техніко-економічного обґрунтування енергозберігаючої сонячної системи, інтегрованої в загальну схему живлення з урахуванням вимог надійності та безпеки польотів.

Для досягнення мети необхідно розв’язати такі **завдання**:

- проаналізувати роль електропостачання злітно-посадкових майданчиків у забезпеченні безпеки польотів та розглянути принципи роботи й структуру сонячних фотоелектричних систем;
- узагальнити підходи до енергозбереження та сформувані критерії/показники енергоефективності для об’єктів цього типу;
- дослідити існуючу схему електропостачання майданчика, навантаження, режими роботи та графіки споживання; визначити втрати і зони неефективності;
- оцінити потенціал впровадження сонячної системи з урахуванням кліматичних, експлуатаційних і технічних чинників;
- обґрунтувати структуру СЕС (конфігурація ФЕМ, інвертори/перетворювачі, акумуляторний резерв), виконати розрахунки потужності та складу обладнання;
- розробити схему приєднання СЕС до мережі майданчика з резервуванням і автоматичним перемиканням джерел;
- сформувані комплекс енергозберігаючих заходів (керування навантаженням, оптимізація режимів, зменшення втрат, моніторинг і керування);
- виконати техніко-економічну оцінку ефективності (економія, витрати, строк окупності, NPV та інші показники);
- оцінити вплив рішень на охорону праці, електробезпеку та довкілля.

**Методи дослідження** включають аналіз і синтез науково-технічної інформації, системний підхід, розрахункові та імітаційні методи оцінки енергетичних показників, техніко-економічний аналіз і порівняння варіантів, елементи моделювання режимів роботи СЕС.

**Наукова новизна** полягає у комплексному підході до підвищення енергоефективності та надійності електропостачання злітно-посадкового майданчика шляхом інтеграції оптимально спроектованої сонячної системи з організаційно-технічними енергозберігаючими заходами з урахуванням специфіки аеродромних навантажень і підвищених вимог до безперервності живлення.

**Практичне значення** полягає в можливості використання розроблених рекомендацій, методик і структурних рішень для модернізації та проектування систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків і споріднених об'єктів інфраструктури, що сприятиме зниженню споживання з мережі, скороченню експлуатаційних витрат та підвищенню автономності й надійності живлення критичних споживачів.

**Структура роботи:** магістерська робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У **першому розділі** подано теоретичні основи енергозбереження та особливості застосування сонячних фотоелектричних систем; у **другому** – аналіз стану електропостачання майданчика та потенціалу впровадження СЕС; у **третьому** – розробка структури та техніко-економічне обґрунтування запропонованої системи; у **четвертому** – питання охорони праці під час монтажу й експлуатації; у **п'ятому** – екологічні аспекти та вплив на довкілля

## РОЗДІЛ 1

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВИХ МАЙДАНЧИКІВ

### 1.1. Роль та значення систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків у забезпеченні безпеки польотів

Злітно-посадковий майданчик є ключовим елементом аеродромної інфраструктури, а надійність його роботи безпосередньо визначає рівень безпеки та регулярності польотів. Технологічні процеси зльоту, посадки й руління неможливі без стабільного функціонування систем електропостачання, тому електроенергетичне господарство майданчика належить до об'єктів підвищеної відповідальності та розглядається як складова критичної інфраструктури.

Основними споживачами електроенергії на майданчику є світлосигнальне обладнання, засоби радіонавігації та зв'язку, метеорологічні комплекси, системи відеоспостереження й охорони, диспетчерське керування, службове та аварійне освітлення. Для цих електроприймачів критично важливі якість і безперервність живлення: навіть короточасні відключення або відхилення напруги можуть спричинити збої, хибні сигнали або втрату функціональності. Особливе значення мають світлосигнальні системи, що забезпечують візуальну орієнтацію екіпажу вночі та за обмеженої видимості; їх відмова через знеструмлення або недопустиме падіння напруги створює пряму загрозу безпеці й може вимагати тимчасового закриття майданчика. Не менш критичними є системи радіонавігації та зв'язку, від яких залежить коректний обмін командами та точність навігаційної інформації, а також метеорологічні комплекси, що формують дані про вітер, видимість, температуру, тиск тощо, необхідні для рішень екіпажу та диспетчерів.

Більшість споживачів злітно-посадкових майданчиків відносять до **I категорії надійності**, тобто перерва живлення неприпустима або допускається лише на час автоматичного ввімкнення резерву. Звідси випливають вимоги до структури системи електропостачання: застосування резервних джерел (дизель-генераторні установки, UPS/ДБЖ, сонячні системи з акумуляторним резервом), автоматичного перемикачів, а також мережевих рішень із підвищеною живучістю (кільцеві або радіально-кільцеві схеми, дублювання ліній тощо).

За умов зростання інтенсивності повітряного руху та вартості енергоресурсів оптимізацію електропостачання доцільно розглядати не лише з позицій надійності, а й енергоефективності. Надлишкові резерви потужності, нераціональні режими роботи обладнання, втрати в мережах і неузгоджені графіки навантаження призводять до зайвого споживання та підвищення експлуатаційних витрат. Отже, системи електропостачання злітно-посадкових майданчиків одночасно є базовою умовою безпеки польотів і важливим резервом підвищення енергоефективності через впровадження сучасних технічних та енергозберігаючих рішень, зокрема сонячних систем електропостачання.

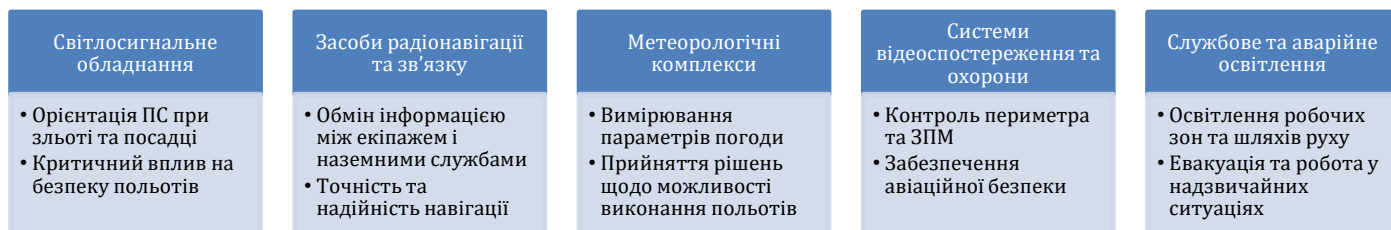


Рис. 1.1. Структура системи електропостачання злітно-посадкового майданчика

## 1.2. Класифікація та структура систем електропостачання аеродромів і злітно-посадкових майданчиків

Системи електропостачання аеродромів і злітно-посадкових майданчиків мають багаторівневу структуру, яка формується з урахуванням категорій надійності споживачів, розміщення об'єктів, потужності навантажень і вимог до резервування. Для побудови енергозберігальної стратегії важливо розуміти їх класифікацію та типову структурну організацію, оскільки саме вона визначає можливості зменшення втрат і впровадження локальної генерації.

За джерелами живлення системи електропостачання умовно поділяють на:

- мережеві (живлення від зовнішніх електричних мереж);
- автономні (локальна генерація: ДГУ, ГТУ, СЕС, ВЕС тощо);
- комбіновані (поєднання мережі та місцевих джерел для підвищення надійності й гнучкості режимів).

На практиці для ЗПМ найбільш доцільними є комбіновані рішення, оскільки вони дозволяють одночасно виконувати вимоги надійності та зменшувати залежність від мережі.

За структурою мереж виділяють:

- радіальні (живлення споживачів окремими лініями),
- кільцеві (замкнуті контури з можливістю живлення з двох напрямків),
- радіально-кільцеві (поєднання переваг двох схем, типове для відповідальних об'єктів).

Для злітно-посадкових майданчиків найчастіше застосовується радіально-кільцева структура, яка забезпечує гнучке перемикання та вищу живучість мережі.

З погляду розподілу електроенергії систему ЗПМ доцільно розглядати як ієрархію рівнів:

1. приєднання до зовнішніх мереж 6–35 кВ (вводи, облік, головні підстанції);
2. внутрішня розподільча мережа середньої напруги (РП, підстанції, лінії між об'єктами);

3. низьковольтні мережі 0,4 кВ (щити, локальні мережі світлосигнальних систем, зв'язку, навігації, освітлення);
4. локальні джерела та резервування (ДГУ, ДБЖ, СЕС з АКБ).

За надійністю споживачі ЗПМ зазвичай поділяють на:

- I категорію (світлосигнальні системи, радіонавігація, зв'язок, аварійне освітлення, критична безпека);
- II категорію (частина службового освітлення, технологічні системи, забезпечення персоналу);
- III категорію (допоміжні навантаження).

Такий розподіл дозволяє раціонально обирати рівень резервування та схеми підключення.

У сучасних умовах поширюються інтегровані енергетичні комплекси, де мережа та ДГУ доповнюються відновлюваними джерелами (насамперед СЕС) і накопичувачами. Для ЗПМ це важливо не лише для резервування, а й для енергозбереження: вирівнювання графіка навантаження, зменшення піків і часткове заміщення мережевого споживання власною генерацією. На мій погляд, саме поєднання СЕС + АКБ дає найбільш практичний ефект, бо дозволяє керувати енергією без компромісів щодо вимог безпеки.



Рис.1.2. Структура системи електропостачання злітно-посадкового майданчика

**Класифікація систем електропостачання аеродромів за джерелами живлення та структурою мереж**

Тип системи	Джерело живлення	Структура мережі	Переваги	Недоліки	Типові сфери застосування
Мережева система	Приєднання до зовнішніх електричних мереж енергопостачальної організації	Радіальна або радіально-кільцева	Відносно низькі капітальні витрати, відсутність власної генерації, простота експлуатації	Залежність від стану зовнішньої мережі, ризик відключень, обмежені можливості резервування	Аеродроми з високою надійністю зовнішнього електропостачання
Автономна система	Локальні джерела: дизель-генератори, газотурбінні установки, сонячні електростанції	Радіальна або кільцева	Висока автономність, незалежність від зовнішньої мережі	Вищі експлуатаційні витрати, необхідність обслуговування джерел, потреба в запасі палива або акумуляторів	Віддалені аеродроми, тимчасові злітно-посадкові майданчики
Комбінована система	Поєднання мережевого живлення з локальними джерелами (ДГУ, СЕС, ВЕС тощо)	Радіально-кільцева	Підвищена надійність, гнучкість режимів, можливість оптимізації енергоспоживання	Складніша схема керування, вищі початкові капітальні витрати	Сучасні аеродроми та ЗПМ з підвищеними вимогами до надійності
Система з відновлюваними джерелами енергії	Сонячні, вітрові, гібридні установки в поєднанні з мережевим або автономним живленням	Радіальна, радіально-кільцева	Зменшення споживання електроенергії з мережі, екологічність, можливість зниження експлуатаційних витрат	Залежність від погодних умов, необхідність систем накопичення енергії та резервних джерел	Аеродромні об'єкти з орієнтацією на енергоефективність та "зелену" енергетику

### **1.3. Сонячні (фотоелектричні) системи електропостачання: принцип дії, основні елементи та режими роботи**

Сонячні (фотоелектричні) системи електропостачання є перспективним напрямом відновлюваної енергетики, оскільки забезпечують пряме перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну. Для об'єктів аеродромної інфраструктури, зокрема злітно-посадкових майданчиків, застосування СЕС дає змогу підвищити автономність живлення, зменшити залежність від зовнішніх мереж, оптимізувати експлуатаційні витрати та покращити екологічні показники.

На практиці найбільший ефект досягається тоді, коли СЕС розглядається не як «додаткова генерація», а як елемент системи резервування та керування навантаженням.

#### **Принцип дії фотоелектричних систем**

Базовим елементом є фотоелектричний модуль, сформований із сонячних елементів (переважно на основі кремнію). Робота фотоелемента ґрунтується на фотоелектричному ефекті: поглинання фотонів у р–п-переході спричиняє генерацію пар електрон–дірка, які розділяються внутрішнім електричним полем, утворюючи ЕРС; при підключенні навантаження виникає струм у зовнішньому колі.

Енергетичні характеристики модуля описуються вольт-амперною характеристикою (ВАХ), що визначається двома ключовими чинниками:

- опроміненням (інтенсивністю сонячного випромінювання) — зі зростанням опромінення збільшується струм, напруга змінюється незначно;
- температурою осередків — при підвищенні температури зменшується напруга холостого ходу та знижується максимальна потужність.

Додатково на виробіток впливають затінення, забруднення поверхні й деградація з часом. Кожен модуль має точку максимальної потужності (МРР); для роботи поблизу цієї точки застосовується МРРТ (Maximum Power Point Tracking), що реалізується в інверторах або контролерах заряду. З мого погляду, якісно налаштований МРРТ і коректний підбір конфігурації стрінгів — це «невидимий» фактор, який часто визначає реальний (а не паспортний) результат системи.

## Основні елементи сонячної системи електропостачання ЗПМ

Типова СЕС для злітно-посадкового майданчика включає:

- Фотоелектричні модулі — джерело постійного струму; з'єднуються у стрінги (послідовно/паралельно) для отримання потрібних рівнів напруги та струму (моно-, полікристалічні, тонкоплівкові — залежно від площі та умов).
- Конструкції кріплення — забезпечують механічну стійкість; для ЗПМ важливо враховувати вітрові/снігові навантаження та відсутність перешкод для огляду й роботи аеродромних систем.
- DC-обв'язка — кабелі, комбайнери/з'єднувальні коробки, захист від КЗ, перевантажень і перенапруг (у т.ч. грозових); правильний вибір кабелів і захисту зменшує втрати та підвищує надійність.
- Інвертори — перетворюють DC у AC з параметрами, сумісними з мережею ЗПМ; застосовуються центральні, стрінгові або мікроінвертори. Зазвичай мають MPPT, захисти й засоби моніторингу/керування.
- Контролери заряду (для автономних/гібридних систем) — узгоджують роботу СЕС з акумуляторами, керують зарядом/розрядом і забезпечують захист; MPPT може бути інтегрований у контролер.
- Акумуляторні батареї / накопичувачі — забезпечують резервування та вирівнювання графіка навантаження (використання вдень накопиченої енергії ввечері/вночі). Для критичних споживачів ЗПМ накопичувач є ключовим елементом безперервності живлення (AGM/GEL, Li-ion, зокрема LiFePO<sub>4</sub>).
- AC-обв'язка та розподільчі пристрої — щити, автоматика, захисне відключення, комутаційна апаратура та лінії між інверторами й внутрішньою мережею.
- Комутація та автоматичне резервування — АВР, перемикання «мережа–ДГУ–СЕС–АКБ», пріоритетність джерел та запобігання небажаному «зворотному» живленню, якщо воно не передбачене.
- Моніторинг і диспетчеризація — контроль напруги/струму/потужності, стану АКБ, журналювання подій; інтеграція в диспетчерський пункт або SCADA.

Зі свого боку підкреслюю: для злітно-посадкових майданчиків СЕС має сенс не лише як «генерація», а як інструмент підвищення стійкості: найкраща архітектура — та, що одночасно підтримує критичні навантаження і зменшує пікове споживання з мережі без ризику для безпеки польотів.

СОНЯЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА	
Фотоелектричні модулі	Перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію
	Формування стрінгів постійного струму
Перетворювальне обладнання	Інвертори з функцією МРРТ
	Контролери заряду для акумуляторних батарей
Акумуляторні батареї	Накопичення електроенергії
	Забезпечення резервного живлення відповідальних споживачів
DC- та AC-мережі	Кабельні лінії постійного та змінного струму
	Низьковольтні розподільчі щити
Системи захисту та комутації	Автоматичні вимикачі, запобіжники, захист від перенапруг
	Пристрої АВР та перемикачів між джерелами живлення
Системи моніторингу та керування	Контроль параметрів напруги, струму, потужності

Рис. 1.3. Структура сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика

### Режими роботи сонячних систем електропостачання

За характером взаємодії з іншими джерелами електроенергії сонячні системи електропостачання можуть функціонувати у різних режимах:

1. Мережевий (on-grid) режим
2. Сонячна система підключена паралельно до зовнішньої або внутрішньої мережі злітно-посадкового майданчика. Генерація від фотоелектричних модулів у першу чергу використовується для покриття власного споживання, а надлишок (за наявності відповідних умов і дозволів) може передаватися в мережу. У разі недостатньої генерації енергія споживається з мережі. У цьому режимі акумуляторні батареї можуть не використовуватися або мати допоміжний характер (для короткочасного вирівнювання режимів).

### 3. Автономний (off-grid) режим

Сонячна система забезпечує живлення ізольованої частини навантажень без прямого зв'язку з зовнішньою мережею. В такому випадку обов'язковим елементом є акумуляторні батареї та/або резервні генератори (ДГУ), що компенсують нестачу сонячної енергії в нічний час або за несприятливих погодних умов. Автономні системи актуальні для віддалених злітно-посадкових майданчиків, тимчасових аеродромів, де відсутнє надійне мережеве живлення.

### 4. Гібридний режим

Поєднує ознаки мережевих і автономних систем. Сонячна станція працює спільно з мережею та накопичувачами енергії. У нормальних умовах частина навантаження живиться від сонячної генерації, надлишок може заряджати акумулятори. При відключенні мережі система переходить в острівний (island) режим, забезпечуючи живлення найбільш відповідальних споживачів з АКБ і, за можливості, додаткових генераторів. Для злітно-посадкового майданчика гібридний режим є найбільш привабливим, оскільки дозволяє одночасно підвищити і надійність, і енергоефективність електропостачання.

### 5. Режими пріоритезації навантажень

У системах електропостачання злітно-посадкового майданчика доцільно виділяти пріоритетні (критичні) та другорядні (некритичні) навантаження. У разі дефіциту генерованої потужності сонячна система (разом з системою керування та АВР) може забезпечувати живлення в першу чергу саме критичних споживачів: світлосигнального обладнання, зв'язку, навігації, аварійного освітлення. Другорядні споживачі (частина службового освітлення, побутові потреби персоналу тощо) можуть автоматично відключатися або переводитися на інші джерела.

### 6. Режими оптимізації енергоспоживання

Використання сонячної системи дозволяє реалізувати різні стратегії енергозбереження:

- зменшення пікових навантажень за рахунок часткового покриття пікових годин власною генерацією;

- вирівнювання графіка навантаження з використанням накопичувачів енергії;
- обмеження або зсув у часі роботи некритичних споживачів відповідно до прогнозу сонячної генерації.

Для злітно-посадкового майданчика пріоритетними є стабільність напруги та частоти і забезпечення електромагнітної сумісності з радіотехнічним обладнанням. Тому інвертори й силове обладнання сонячної системи повинні гарантувати високу якість вихідної напруги, обмежений рівень гармонік і відповідність профільним стандартам.

Узагальнюючи, сонячні (фотоелектричні) системи є комплексами з модулів, перетворювального обладнання, накопичення, комутації та керування. Енергозберігальний ефект досягається за умови правильного вибору структури й режимів роботи з урахуванням специфіки ЗПМ та вимог до надійності й безпеки електропостачання.

#### **1.4. Поняття, критерії та показники енергозбереження в системах електропостачання**

Поняття енергозбереження тісно пов'язане з раціональним використанням паливно-енергетичних ресурсів, підвищенням ефективності роботи енергетичного обладнання та зниженням втрат у всіх ланках системи виробництва, передачі, розподілу й споживання електричної енергії. Для об'єктів критичної інфраструктури, до яких належать злітно-посадкові майданчики, енергозбереження повинно реалізовуватися таким чином, щоб не знижувати, а підвищувати надійність та якість електропостачання, оскільки основним пріоритетом залишається безпека польотів.

У загальному вигляді **енергозбереження** можна визначити як сукупність організаційних, технічних, технологічних, інформаційних, економічних та інших заходів, спрямованих на **зменшення споживання енергоресурсів** при збереженні

або покращенні техніко-економічних та експлуатаційних показників функціонування об'єкта. Для систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків основна увага приділяється зниженню споживання електроенергії за рахунок оптимізації режимів роботи електроприймачів, скорочення втрат у мережах, застосування вискоефективного обладнання та впровадження відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних фотоелектричних систем.

Енергозбереження у системах електропостачання можна розглядати на трьох рівнях:

- рівень джерел живлення (підвищення ККД генерувального та перетворювального обладнання, використання відновлюваних джерел);
- рівень мереж розподілу електроенергії (зменшення технологічних втрат, оптимізація схем та режимів);
- рівень споживачів (підвищення енергоефективності електроприймачів, керування навантаженнями, застосування сучасних систем автоматизації).

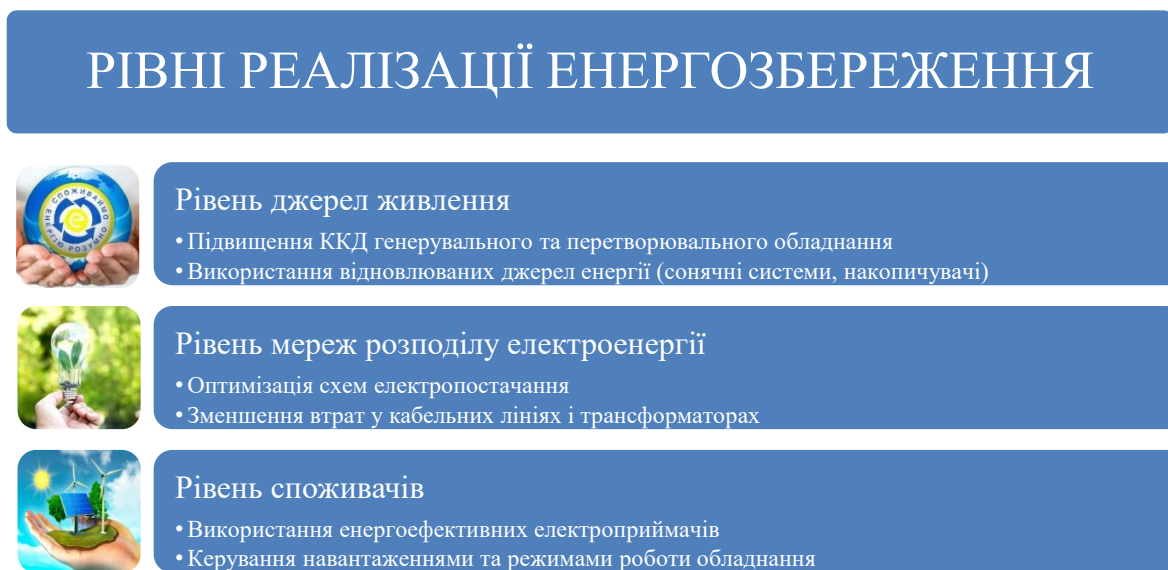


Рис. 1.4. Рівні реалізації енергозбереження в системі електропостачання злітно-посадкового майданчика

## Критерії енергозбереження

Під час оцінювання енергоефективності та результатів впровадження енергозберігальних заходів використовують певні критерії, які дозволяють кількісно й якісно оцінити досягнутий ефект. До основних критеріїв енергозбереження в системах електропостачання злітно-посадкових майданчиків можна віднести:

- Зменшення загального споживання електроенергії за певний період. Критерієм є абсолютне або відносне скорочення річного (місячного, добового) споживання електроенергії при збереженні обсягів авіаційних операцій та режимів роботи обладнання.

- Зниження питомих витрат електроенергії. Питомі витрати відображають кількість електроенергії, спожитої на одиницю корисного результату (кВт·год/виліт, кВт·год/годину роботи світлосигнальної системи, кВт·год/м<sup>2</sup> освітлюваної площі тощо). Зменшення питомих витрат за незмінного рівня безпеки та сервісу є одним із ключових критеріїв енергозбереження.

- Скорочення втрат електроенергії в мережах та обладнанні. Втрати в трансформаторах, кабельних лініях, апаратах комутації та перетворювачах можуть становити суттєву частку загального енергоспоживання. Їхнє зменшення за рахунок оптимізації схем, вибору раціональних перерізів провідників, застосування енергоефективних трансформаторів та інверторів є важливим напрямом енергозбереження.

- Підвищення коефіцієнта потужності ( $\cos \varphi$ ). Низький  $\cos \varphi$  призводить до збільшення струмів у мережах, зростання втрат та необхідності використання обладнання більшої номінальної потужності. Встановлення компенсаційних пристроїв (батарей конденсаторів, активних фільтрів) дозволяє підвищити  $\cos \varphi$  до нормативних значень і, відповідно, зменшити втрати.

- Оптимізація графіків навантаження. Вирівнювання добового графіка навантаження, зменшення піків споживання за рахунок використання власної генерації (сонячних систем) та накопичувачів енергії, а також перенесення роботи некритичних навантажень на періоди мінімального навантаження є важливими критеріями енергоефективності.

- Підвищення частки електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел. Зростання долі сонячної генерації у структурі споживання знижує потребу в традиційних енергоресурсах, зменшує викиди шкідливих речовин і підвищує енергетичну незалежність об'єкта.

- Економічний критерій. Енергозбереження має бути економічно доцільним. Як критерій використовують річну економію коштів на оплату електроенергії та потужності, строк окупності інвестицій, чисту приведену вартість проєкту, внутрішню норму рентабельності тощо.

- Критерії надійності та якості електропостачання. Для злітно-посадкових майданчиків енергозбереження не може реалізовуватися за рахунок зниження надійності. Тому додатково оцінюють тривалість та частоту перерв в електропостачанні, стабільність напруги й частоти, відповідність показників якості електроенергії нормативам.



Рис. 1.5. Основні критерії енергозбереження в системах електропостачання злітно-посадкового майданчика

## Показники енергоефективності та енергозбереження

Для кількісної оцінки енергозбереження в системах електропостачання використовують систему показників, що дозволяє порівнювати стан «до/після» та обґрунтовувати вибір технічних рішень.

### Основні енергетичні показники:

- загальне споживання електроенергії (кВт·год/рік) і фактична економія;
- питомих споживання (кВт·год/виліт, кВт·год/год роботи ЗПМ, кВт·год/м<sup>2</sup> тощо);
- втрати в мережах і обладнанні (кВт·год або %);
- ККД основного обладнання (трансформатори, інвертори, двигуни тощо);
- коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ );
- коефіцієнт завантаження обладнання (раціональність використання встановленої потужності).

### Додатково для сонячних систем:

- річна генерація СЕС (кВт·год/рік);
- коефіцієнт використання встановленої потужності;
- частка покриття навантаження сонячною енергією (%);
- рівень самоспоживання виробленої енергії.

### Економічні показники:

- річна економія витрат на електроенергію/потужність;
- сукупний економічний ефект за розрахунковий період;
- строк окупності (простий і дисконтований);
- NPV та IRR проекту.

## Основні показники енергоефективності систем електропостачання

Назва показника	Позначення	Одиниця виміру	Короткий зміст
Загальне споживання електроенергії	$W_{\text{заг}}$	кВт·год/рік	Обсяг електроенергії, спожитий об'єктом за розрахунковий період
Питоме споживання електроенергії	$w_{\text{пит}}$	кВт·год/од. результату	Споживання електроенергії на один виліт, годину роботи або м <sup>2</sup> площі
Втрати електроенергії в мережах	$W_{\text{вт}}$	кВт·год; %	Різниця між відпуском у мережу та корисним споживанням
Коефіцієнт корисної дії обладнання	$\eta$	–	Відношення корисної потужності до споживаної
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	–	Відношення активної потужності до повної
Частка покриття навантаження сонячною генерацією	кСЕС	%	Частка електроспоживання, забезпечена за рахунок сонячної системи
Річна економія коштів	$E_{\text{грн}}$	грн/рік	Зменшення витрат на електроенергію після впровадження енергозберігальних заходів
Строк окупності проекту	$T_{\text{ок}}$	роки	Період, за який економія покриває капітальні витрати

Комплексний підхід до оцінки енергозбереження

Особливістю систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків є те, що енергозбереження не може розглядатися ізольовано від питань надійності, резервування та якості електроенергії. Будь-який захід, спрямований на зменшення споживання електроенергії, повинен одночасно забезпечувати або підвищення рівня безпеки, або принаймні недопущення його погіршення.

Тому при оцінюванні ефективності енергозберігальних заходів доцільно застосовувати комплексний підхід, що враховує:

- енергетичні показники (економія електроенергії, зниження втрат, підвищення ККД та  $\cos \varphi$ );
- економічні показники (зменшення витрат, окупність інвестицій);
- експлуатаційні показники (надійність, зручність обслуговування, гнучкість режимів роботи);
- екологічні показники (скорочення викидів, зниження використання викопного палива).

У межах даної роботи енергозбереження розглядатиметься не лише як зменшення споживання електроенергії з мережі, а як формування оптимальної структури системи електропостачання злітно-посадкового майданчика, у якій сонячна система, накопичувачі енергії та традиційні джерела живлення працюють узгоджено, забезпечуючи необхідний рівень надійності та безпеки при максимальному можливому енергозберігальному ефекті.

## РОЗДІЛ 2.

### ОЦІНКА СТАНУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА

#### 2.1. Характеристика об'єкту – злітно-посадкового майданчика та його електроприймачів

Об'єктом аналізу є постійний злітно-посадковий майданчик (вертодром) «Дніпро-1», розташований у центральній частині м. Києва на Парковій дорозі, у складі багатофункціонального конгресно-виставкового центру «Парковий». Майданчик введено в експлуатацію у 2012 році як Центр адміністративно-ділової авіації і він призначений для прийому та відправлення вертольотів ділової, службової, санітарної та спеціальної авіації.

Злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» виконаний у вигляді площадкового типу майданчика на покрівлі будівлі, що забезпечує компактне розміщення в умовах щільної міської забудови. Загальні габарити посадкової зони становлять близько 115 × 50,45 м, на ній розташовано два посадкові поля для прийому вертольотів. Конструктивно майданчик розрахований на прийом важких вертольотів масою до 13 т (типу Мі-8), сертифікованих за категорією «А», з відповідними вимогами до навігаційного та світлосигнального оснащення.

Покриття майданчика виконано з важкого цементобетону класу В30 та має товщину близько 0,20 м, що відповідає вимогам до злітно-посадкових майданчиків типу А та забезпечує необхідну несучу здатність для сприйняття навантажень від шасі вертольотів при зльоті, посадці та рулінні. Такий тип конструкції дозволяє забезпечити достатню жорсткість та довговічність покриття у поєднанні з ефективною системою водовідведення.

## АЕРОДРОМ "ДНІПРО-1", (Київ)









Категорія	Елемент	Опис
<b>Посадувальні майданчики</b>		
 Два вертолітні майданчики	Розмітка та позначення посадкової зони	Розмітка та позначення посадкової вертоліт
 Розмітка та позначення посадкової зони	Зони руху та очікування	Маршрути заходів на посадку та зльоту повітряних суден
<b>Технічні та сервісні зони</b>		
 Технічні приміщення вертолітної	Зони руху та очікування	Маршрути заходів на посадку зльоту повітряних суден
 Доступ до інженерних комунікацій	Дослідження руху повітря	
<b>Огорожі та захисні споруди</b>		
 Захисні бар'єри по периметру даху	Винищувачі небезпечних	Хазини евакуації та ооружу денітрах одди
 Захисні екрани та ооружі небезпечних зон	Захисні екрани та ооружі-клази	Ониррві ровні ози ожувлди
 Шляхи евакуації та доступ персоналу	Варіантні поно зони сучанки	
 Аварійні входні та сходові клісти		

Рис. 2.1. Структурні елементи злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» у м. Київ

Функціональне призначення та основні завдання злітно-посадкового майданчика

Основним функціональним призначенням злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» є забезпечення оперативних та безпечних зльотів і посадок вертольотів в умовах великого міста. Майданчик використовується для:

- прийому й відправлення вертольотів ділової авіації та чартерних рейсів;
- забезпечення перевезення офіційних делегацій та VIP-пасажирів;
- потенційного використання аварійно-рятувальними та медичними службами для оперативної евакуації постраждалих;
- організації транспортного сполучення між центральною частиною Києва та основними аеропортами («Бориспіль», «Київ» (Жуляни)) у форматі вертолітного шатлу.

Завдяки розташуванню поблизу урядового кварталу та ділового центру Києва злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» є важливим елементом адміністративно-ділової авіаційної інфраструктури та забезпечує скорочення часу доставки пасажирів і вантажів порівняно з автомобільним транспортом.

Майданчик оснащений системами світлосигнального, радіотехнічного та метеорологічного забезпечення, що забезпечує приймання вертольотів у цілодобовому режимі та за ускладнених метеоумов. Наявність таких систем формує підвищені вимоги до надійності й безперервності електропостачання, оскільки стабільність їх роботи безпосередньо впливає на рівень льотної та експлуатаційної безпеки.

#### Коротка характеристика енергогосподарства ЗПМ «Дніпро-1»

Енергогосподарство ЗПМ «Дніпро-1» інтегроване в загальну систему електропостачання конгресно-виставкового центру «Парковий», водночас має виділену групу відповідальних споживачів із підвищеними вимогами до категорії надійності.

У спрощеному вигляді система електропостачання майданчика включає:

- живлення від міських мереж середньої напруги через трансформаторні підстанції будівлі з пониженням до 0,4 кВ;
- розподіл електроенергії до щитів живлення вертодрому (світлосигнальні системи, метеокомплекс, зв'язок, системи безпеки, евакуаційне освітлення);
- застосування резервних джерел (ДГУ, ДБЖ) для забезпечення роботи відповідальних електроприймачів у разі порушень живлення з зовнішньої мережі;
- використання засобів обліку та диспетчеризації для контролю режимів навантаження і підтримки енергозберігальних рішень.

За категоріями надійності електропостачання основні групи електроспоживачів ЗПМ «Дніпро-1» умовно можна віднести до таких груп:

- I категорія – світлосигнальне обладнання посадкових полів, системи маркування країв і зон підходу, метеорологічні комплекси, системи радіозв'язку та диспетчерського управління, аварійне й евакуаційне освітлення;

- II категорія – системи відеоспостереження, контролю доступу, загальне та службове освітлення технічних приміщень, частина інженерних систем (насосні, вентиляція);
- III категорія – побутові та адміністративні навантаження, що не впливають безпосередньо на безпеку польотів.

Таблиця 2.1

Основні електроспоживачі злітно-посадкового майданчика “Дніпро-1” за категоріями надійності

Група споживачів	Приклади обладнання	Категорія за надійністю	Орієнтовна встановлена потужність, кВт*
Світлосигнальне обладнання посадкових полів	Граничні вогні, розмічальні вогні, підсвічування маркування	I	5–10
Метеорологічні комплекси	Метеостанція, датчики вітру, температури, тиску, видимості	I	1–3
Радіозв’язок та диспетчерське обладнання	Радіостанції, апаратура диспетчерів, мережеве обладнання	I	3–5
Системи безпеки та відеоспостереження	Відеокамери, сервер відеозапису, системи контролю доступу, охоронна сигналізація	II	3–6
Службове та загальне освітлення	Освітлення технічних приміщень, підходів, евакуаційних виходів	II	5–8
Інженерні системи забезпечення	Насосні установки, вентиляція, кондиціонування, протипожежні системи	II	5–15
Адміністративні та побутові навантаження	Освітлення офісів, розетки, офісна техніка в суміжних із майданчиком приміщеннях	III	3–10

Основні групи електроприймачів злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

З урахуванням функціонального призначення майданчика можна виділити такі ключові групи електроприймачів:

### 1. Світлосигнальне обладнання посадкових полів

Ця група включає граничні вогні, розмічальні вогні посадкової зони, засоби підсвічування маркувань, а також, за наявності, елементи системи візуальних індикаторів глибини. Їх робота є критично важливою під час посадки та зльоту вертольотів у темний час доби та за умов обмеженої видимості.

### 2. Системи радіозв'язку та диспетчерського управління

До цієї групи належать засоби зв'язку між екіпажами повітряних суден і диспетчером, локальні мережі передавання даних, обладнання робочих місць операторів та диспетчерів. Надійність електроживлення цих систем визначає можливість організованого та безпечного повітряного руху над майданчиком.

### 3. Метеорологічне обладнання

Метеостанції, датчики швидкості та напрямку вітру, температури повітря, атмосферного тиску, видимості та інші засоби спостереження, що забезпечують екіпажі й диспетчерський персонал актуальною інформацією про погоду в районі майданчика.

### 4. Системи безпеки та відеоспостереження

Камери відеоспостереження, системи контролю доступу, охоронна сигналізація, системи виявлення несанкціонованого перебування на посадковому майданчику чи в небезпечних зонах. Для цих споживачів важливо забезпечити безперервність роботи навіть у разі аварійних ситуацій в електромережі.

### 5. Службове й загальне освітлення

Освітлення технічних та допоміжних приміщень, евакуаційних виходів, шляхів доступу до майданчика, а також окремих зон експлуатації вертольотів. Ці навантаження забезпечують безпечні умови роботи персоналу та пересування.

### 6. Інженерні системи забезпечення

Насосні станції, системи вентиляції й кондиціонування, електроприводи протипожежних та димовидалювальних систем, інше інженерне обладнання, необхідне для нормальної експлуатації як вертолітного майданчика, так і будівлі в цілому.

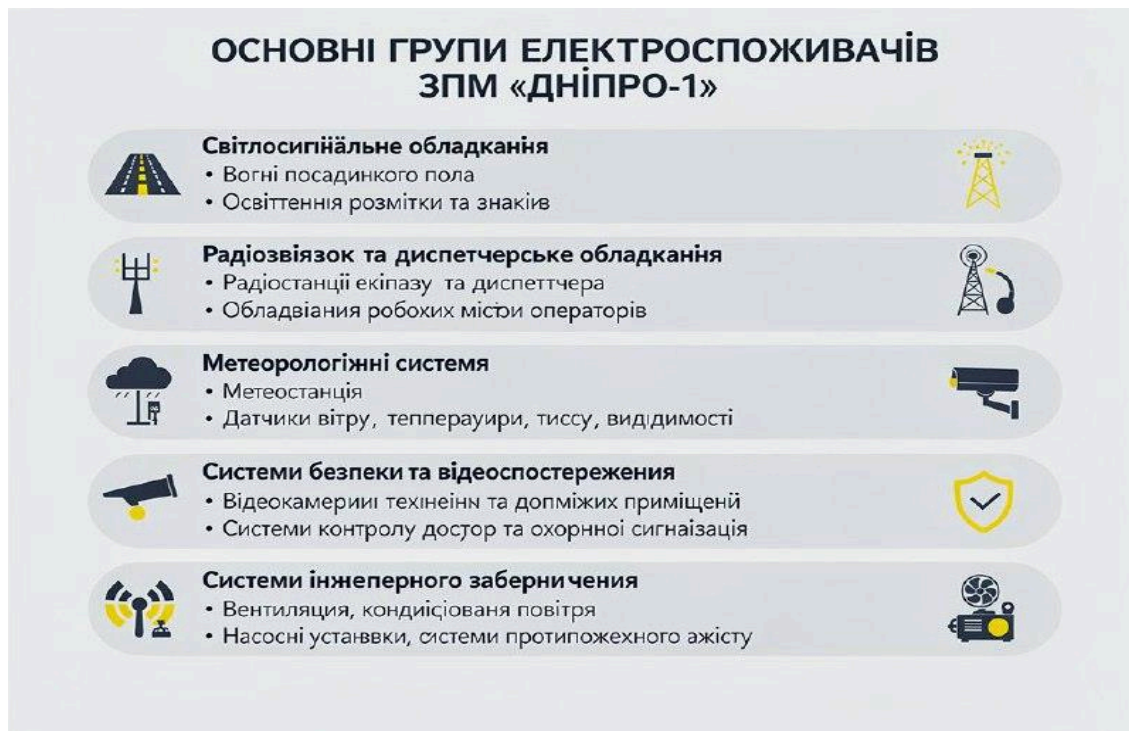


Рис. 2.2. Основні групи електроприймачів злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» у м. Київ

Вихідні позиції для подальшого енергетичного аналізу

Наведена загальна характеристика злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» дозволяє визначити вихідні позиції для подальшого аналізу його системи електропостачання та обґрунтування доцільності впровадження сонячної системи електропостачання з елементами накопичення енергії.

У наступних підрозділах Розділу 2 доцільно:

- детально розглянути існуючу схему електропостачання майданчика, у тому числі типи та потужність трансформаторів, конфігурацію розподільчих мереж і схеми резервування;
- проаналізувати структуру електроспоживання за групами навантажень та добовими/сезонними графіками роботи;
- визначити основні фактори формування енергетичних втрат та пікових навантажень, які можуть бути зменшені за рахунок інтеграції сонячних фотоелектричних установок і систем зберігання енергії;

- сформувати вихідні дані для розрахунку потужності, конфігурації та режимів роботи сонячної системи електропостачання, адаптованої до специфіки вертолітного злітно-посадкового майданчика в умовах густої міської забудови.

- 

## **2.2.Опис існуючої системи електропостачання злітно-посадкового майданчика**

У цьому підрозділі наведено стислий опис існуючої схеми електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» (м. Київ), її основних елементів і структури розподілу електроенергії, а також попередню оцінку відповідності вимогам надійності та енергоефективності. Отримані дані використовуються як вихідні для обґрунтування впровадження сонячної системи електропостачання.

### **Опис існуючої схеми електропостачання**

ЗПМ «Дніпро-1» розміщений на покрівлі КВЦ «Парковий», тому його електропостачання інтегроване в загальну систему будівлі, але має виділені живильні лінії та окрему групу відповідальних споживачів.

Живлення здійснюється від міських мереж середньої напруги через головну понижувальну підстанцію з пониженням до 0,4 кВ. Від шин 0,4 кВ головного розподільчого пристрою прокладені окремі кабельні лінії до щитів живлення обладнання вертодрому, при цьому схема орієнтована на підвищену категорію надійності для критичних електроприймачів. Для цього:

організовано живлення від двох незалежних вводів 0,4 кВ від різних секцій розподільчого пристрою;

для частини споживачів застосовано автоматичне введення резерву, що забезпечує автоматичне переключення з основної лінії на резервну у разі відмови;

критичне обладнання (частина світлосигнальної системи, зв'язок, диспетчерські робочі місця, метеокомплекс) підключене через джерела безперебійного живлення, які дозволяють зберігати працездатність при короткочасних провалах напруги або перемиканні між вводами.

## Спрощена однолінійна схема електропостачання аеродрому «Дніпро-1»



Рис. 2.3. Спрощена однолінійна схема електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

У структурі електропостачання злітно-посадкового майданчика можна виділити такі основні елементи:

- головний розподільчий щит 0,4 кВ будівлі центру «Парковий»;
- секційні вимикачі та вводи, через які подається живлення на вертодром;
- розподільчі щити злітно-посадкового майданчика, що забезпечують подальший розподіл електроенергії між групами споживачів;
- кабельні лінії, прокладені всередині будівлі та до технічних приміщень, пов'язаних з вертодромом;
- апаратура захисту, керування та автоматики, що забезпечує селективне відключення ушкоджених ділянок та керування режимами роботи систем.

Основні елементи схеми електропостачання злітно-посадкового майданчика  
«Дніпро-1»

Елемент	Позначення	Номінальна напруга, кВ	Номінальна потужність / струм	Примітка
Зовнішня кабельна лінія живлення	Л-10	10	150 А (орієнтовно)	Підвід від міської мережі до головної підстанції
Силовий трансформатор №1	T1	10 / 0,4	1600 кВА	Основний трансформатор живлення центру «Парковий»
Силовий трансформатор №2	T2	10 / 0,4	1600 кВА	Резервний трансформатор
Головний розподільчий щит	ГРЩ-0,4	0,4	2500 А	Розподіл електроенергії по будівлі
Секційний вимикач 1-ї секції	QF1	0,4	1600 А	Ввід від трансформатора T1
Секційний вимикач 2-ї секції	QF2	0,4	1600 А	Ввід від трансформатора T2
Щит живлення злітно-посадкового майданчика	ЩВ-ЗПМ	0,4	400 А	Живлення основних споживачів вертодрому
Фідер світлосигнального обладнання	F1	0,4	63 А	Живлення вогнів посадкових полів
Фідер зв'язку та диспетчеризації	F2	0,4	40 А	Живлення радіозв'язку та робочих місць диспетчерів
Фідер метеорологічного комплексу	F3	0,4	25 А	Живлення метеостанції та датчиків
Фідер систем безпеки та відеоспостереження	F4	0,4	40 А	Живлення камер, систем доступу, сигналізації
Фідер службового та загального освітлення	F5	0,4	63 А	Освітлення технічних приміщень і шляхів підходу
Фідер інженерних систем	F6	0,4	80 А	Насоси, вентиляція, кондиціонування тощо

Схема живлення споживачів злітно-посадкового майданчика в основному має радіальний характер: для кожної групи навантажень передбачено окремий фідер від щита живлення майданчика. Це дозволяє локалізувати можливі аварії, зберігаючи роботу інших споживачів, і спрощує облік та аналіз енергоспоживання.

До найвідповідальніших споживачів, що підключені за посиленою схемою з резервуванням, належать:

- світлосигнальне обладнання посадкових полів;
- системи радіозв'язку і диспетчерського управління;
- метеорологічні комплекси;
- системи аварійного та евакуаційного освітлення;
- частина систем безпеки та відеоспостереження.

Менш відповідальні навантаження (службове освітлення, окремі інженерні системи, адміністративно-побутові споживачі) живляться за спрощеною схемою без подвійного введення, що є прийнятним з точки зору безпеки польотів і дозволяє оптимізувати витрати на кабельні лінії й комутаційну апаратуру.

Таблиця 2.3

Основні електроспоживачі злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

Група електроприймачів	Позначення	Встановлена потужність, кВт	Частка загальної потужності, %	від
Світлосигнальне обладнання посадкових полів	P1	15	18,8	
Радіозв'язок та диспетчерське обладнання	P2	10	12,5	
Метеорологічні системи	P3	5	6,3	
Системи безпеки та відеоспостереження	P4	12	15,0	
Службове та загальне освітлення	P5	18	22,5	
Інженерні системи (вентиляція, насоси тощо)	P6	20	25,0	
Разом	PΣ	80	100	

Аналіз схеми з позицій надійності електропостачання

З точки зору надійності електропостачання існуюча схема злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» має низку позитивних характеристик:

#### 1. Подвійне живлення відповідальних електроприймачів.

Наявність двох незалежних вводів 0,4 кВ, що живлять щит вертодрому, дозволяє у разі виходу з ладу одного з напрямків зберігати електропостачання за рахунок другого. Це відповідає вимогам до споживачів I категорії та забезпечує безперервність роботи основних систем.

#### 2. Застосування автоматичного введення резерву.

Використання АВР для окремих груп навантажень I категорії мінімізує час перерви електропостачання при аварії на одній з ліній. Фактична тривалість перерви залежить від налаштувань автоматики, але, як правило, становить лічені секунди або менше.

#### 3. Використання джерел безперебійного живлення.

Підключення найчутливішого обладнання (зв'язок, диспетчерські системи, метеодані) через UPS дає змогу уникнути навіть короточасних провалів напруги при перемиканні між вводами або при запуску дизель-генераторних установок (за наявності).

#### 4. Функціональний поділ навантажень по фідерах.

Виокремлення окремих фідерів на світлосигнальну систему, метеорологію, зв'язок, системи безпеки зменшує ризик одночасної відмови кількох груп споживачів через пошкодження однієї лінії чи помилку обслуговуючого персоналу.

Разом з тим, під час аналізу схеми можна виділити й низку потенційних вразливих місць:

- залежність від зовнішнього джерела живлення.

Уся система базується на електроживленні від міської мережі. У разі тривалої аварії на стороні постачальника електроенергії (за відсутності або обмеженої потужності автономних джерел) можливе часткове або повне припинення роботи майданчика;

- обмежені можливості гнучкого керування навантаженням.

При відсутності сучасних систем автоматизованого керування та моніторингу режимів роботи електрообладнання складніше реалізувати селективне відключення некритичних навантажень, переводячи їх у понижений або резервний режим;

- локальна чутливість до пошкоджень кабельних ліній.

Радіальна структура мережі низької напруги, хоча й спрощує експлуатацію, водночас означає, що ушкодження одного кабелю призведе до повного відключення відповідної групи споживачів. Для найбільш відповідальних ліній це частково компенсується резервними фідерами, але для частини навантажень така можливість відсутня.

#### Аналіз схеми з позицій енергоефективності та енергозбереження

З енергетичної точки зору існуюча схема електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» характеризується такими особливостями:

1. Залежність від централізованого електропостачання.

Відсутність власної генерації (зокрема фотоелектричної) означає, що потреби майданчика повністю покриваються електроенергією з мережі, що обмежує можливості зниження витрат і підвищення енергетичної незалежності.

2. Нерівномірний добовий графік навантаження.

Навантаження змінюється протягом доби: у «спокійні» періоди воно мінімальне, а під час операцій зльоту/посадки виникають короточасні піки. Це підвищує втрати в трансформаторах і мережах та вимагає резерву потужності.

3. Недостатня автоматизація керування навантаженнями.

За відсутності сучасних алгоритмів керування освітленням, вентиляцією та частиною інженерних систем можливі перевитрати електроенергії через роботу обладнання без реальної потреби.

4. Обмежена компенсація реактивної потужності.

Недостатня компенсація реактивної потужності на стороні НН призводить до збільшення струмів, додаткових втрат і потенційного зростання витрат на електроенергію.

Отже, за збереження належного рівня надійності енергоефективність системи може бути підвищена. Перспективним напрямом є впровадження сонячної системи з накопичувачем енергії, яка забезпечить часткове покриття споживання від ВДЕ, зменшить пікові навантаження на трансформатори та кабельні лінії, підвищить енергетичну незалежність і створить передумови для додаткових енергозберігальних заходів.

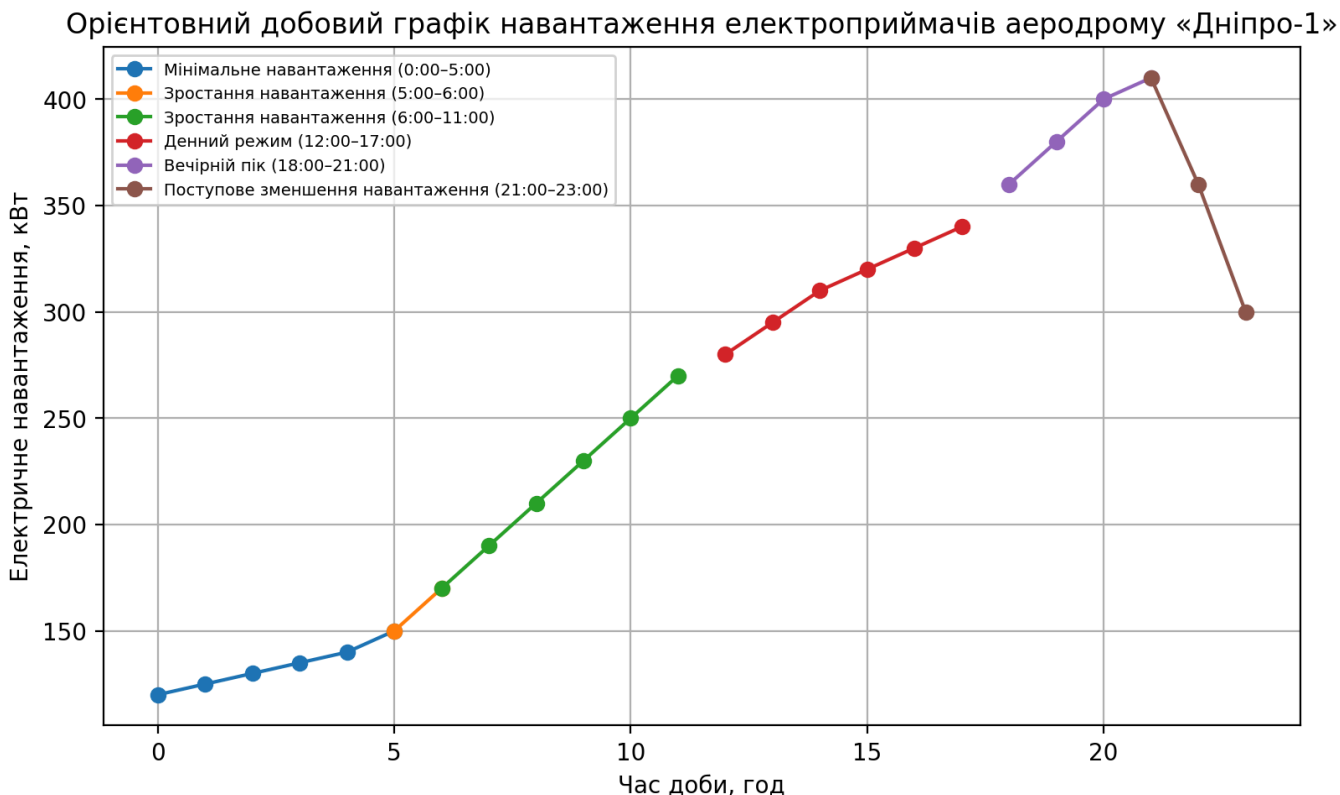


Рис. 2.4. Орієнтовний добовий графік навантаження електроприймачів злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1».

Висновки за результатами опису та аналізу схеми

Проведений опис та аналіз існуючої схеми електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» дозволяє зробити такі узагальнення:

- система побудована з урахуванням вимог до споживачів I категорії і забезпечує подвійне живлення найбільш відповідальних електроприймачів;
- застосування автоматичного введення резерву та джерел безперебійного живлення підвищує стійкість до аварійних ситуацій у зовнішній мережі;

- разом з тим, повна залежність від централізованого електропостачання та нерівномірний графік навантаження обумовлюють підвищений рівень втрат та обмежують можливості подальшого зниження витрат на електроенергію;
- існують передумови для інтеграції сонячної системи електропостачання, яка, будучи грамотно спроектованою, дозволить поєднати високу надійність живлення з підвищенням енергоефективності та досягненням відчутного енергозберігального ефекту.

Ці висновки створюють основу для переходу до наступного розділу, у якому буде розроблятися структура та параметри сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика, а також виконуватимуться відповідні техніко-економічні розрахунки.

### **2.3. Дослідження споживання електроенергії та енергетичних показників злітно-посадкового майданчика**

Аналіз споживання електричної енергії злітно-посадковим майданчиком «Дніпро-1» є важливим етапом обґрунтування доцільності впровадження сонячної системи електропостачання. На основі структури електроприймачів і схеми електропостачання, розглянутих у підрозділах 2.1 та 2.2, у цьому підрозділі проводиться оцінка встановленої потужності, характеру навантажень, добових та сезонних режимів роботи, а також основних енергетичних показників об'єкта.

#### **Структура та рівень електричних навантажень**

За результатами попереднього аналізу приймається, що сумарна встановлена потужність електроприймачів злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» становить орієнтовно  $P_z \approx 80$  кВт

(з можливим уточненням за паспортними даними й результатами енергетичного обстеження). Розподіл потужності між основними групами навантажень наведений у таблиці 2.3, де виділено світлосигнальне обладнання, системи зв'язку й диспетчеризації, метеорологічне обладнання, системи безпеки, освітлення та інженерні системи.

Найбільшу частку встановленої потужності становлять:

- інженерні системи (вентиляція, кондиціонування, насосні установки тощо) – близько 20–30 %;
- службове та загальне освітлення – близько 20–25 %;
- світлосигнальне обладнання посадкових полів – орієнтовно 15–20 %.

Решта потужності припадає на системи радіозв'язку, диспетчеризації, метеокомплекси, системи безпеки та відеоспостереження. Така структура навантажень є типовою для вертолітних злітно-посадкових майданчиків, розташованих на покрівлях будівель, де значна частина енергоспоживання пов'язана з підтриманням необхідних умов роботи персоналу, безпеки та інженерної інфраструктури.

Для подальших розрахунків доцільно визначити розрахункову максимальну потужність  $P_{\max}$  з урахуванням коефіцієнтів одночасності вмикання навантажень. У загальному вигляді:

$$P_{\max} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot k_{o,i},$$

де  $P_i$  – встановлена потужність  $i$ -тої групи навантажень,  
 $k_{o,i}$  – коефіцієнт одночасності для відповідної групи.

У рамках орієнтовної оцінки можна прийняти, що для найбільш відповідальних і постійно працюючих систем (зв'язок, безпека, метеорологія) коефіцієнт одночасності наближається до 0,9–1, для освітлення – 0,7–0,8, для інженерних систем – 0,6–0,8 залежно від режиму експлуатації. Це дозволяє отримати значення розрахункової максимальної потужності  $P_{\max}$ , яке, як правило, менше суми встановлених потужностей, але відображає реальне пікове навантаження майданчика.

Добовий режим споживання електроенергії

Добовий режим роботи злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» характеризується змінною інтенсивністю використання обладнання протягом 24 годин. Умовно можна виділити три основні періоди:

- нічний мінімум (0:00–5:00) – працюють лише чергові системи безпеки, зв'язку, відеоспостереження та мінімально необхідне освітлення;

- денний режим середнього навантаження (6:00–17:00) – збільшення споживання за рахунок часткової роботи світлосигнального обладнання, інженерних систем, службового освітлення, періодичного виконання польотних операцій;
- вечірній пік (18:00–22:00) – максимальне навантаження, пов'язане з активною роботою освітлення, посиленням роботи систем безпеки та можливою концентрацією зльотів/посадок у темний час доби.

Орієнтовний добовий графік навантаження злітно-посадкового майданчика представлено на рисунку 2.4, де по осі абсцис відкладено години доби, а по осі ординат – активне навантаження  $P(h)P(h)P(h)$ , кВт.

Середньодобове значення потужності  $P_{сер}$  можна розрахувати як:

$$P_{сер} = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} P(h),$$

де  $P(h)P(h)P(h)$  – значення активного навантаження в  $h$ -ту годину доби.

Тоді добове споживання електроенергії майданчиком визначається:

$$W_{доб} = \int_0^{24} P(t) dt \approx \sum_{h=1}^{24} P(h) \cdot 1 \text{ год} = 24 \cdot P_{сер},$$

а середньодобовий коефіцієнт використання встановленої потужності:

$$k_{вик,доб} = \frac{P_{сер}}{P_{\Sigma}}.$$

Чим ближче значення  $k_{вик,доб}$  до 0,4–0,6, тим більш рівномірним і ефективним є використання встановленої потужності. Надто низькі значення (0,1–0,2) свідчать про значну частку простоїв обладнання та потенціал для оптимізації навантаження.

Сезонні особливості споживання електроенергії

Сезонна нерівномірність споживання електроенергії злітно-посадковим майданчиком зумовлена в першу чергу:

- зміною тривалості світлового дня (збільшення частки штучного освітлення взимку);
- зміною режимів роботи систем опалення, вентиляції й кондиціонування (зростання навантаження взимку та в літній період спеки);

- можливою різницею в інтенсивності виконання польотних операцій у різні пори року.

Для ілюстрації сезонної динаміки доцільно побудувати графік середньомісячного споживання електроенергії  $W_{\text{міс}}$  Вт·год, за рік. На практиці відповідні дані можуть бути отримані з приладів обліку, автоматизованих систем диспетчеризації чи рахунків за електроенергією.

Таблиця 2.5

Орієнтовний розподіл середньомісячного споживання електроенергії злітно-посадковим майданчиком «Дніпро-1» протягом року

Місяць	$(W_{\text{міс}})$ , кВт·год	Примітка
Січень	24 095	Зимовий період, підвищене освітлення, опалення
Лютий	21 800	Зимовий період, високе навантаження
Березень	20 079	Перехідний період, зменшення освітлення
Квітень	18 932	Весняний період, помірне навантаження
Травень	19 505	Весна/початок літа, стабільна робота
Червень	21 226	Літній період, підвищене навантаження інженерних систем
Липень	22 374	Літній максимум (кондиціонування тощо)
Серпень	21 800	Літній період, високе навантаження
Вересень	20 653	Перехідний період, часткове зниження навантаження
Жовтень	20 079	Осінній період, зростання потреб в освітленні
Листопад	21 226	Пізня осінь, підвищене освітлення
Грудень	24 095	Зимовий максимум, довготривале освітлення та опалення

Сезонний коефіцієнт нерівномірності електроспоживання можна оцінити як відношення максимального місячного споживання до середньомісячного:

Орієнтовна річна сума:  
 $W_{\text{річ}} \approx 255\,865 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ ).

$$k_{\text{нер}} = \frac{W_{\text{міс, max}}}{W_{\text{міс, сер}}}.$$

Значення  $k_{нер} > 1,2$  свідчить про виражену сезонну нерівномірність, що необхідно враховувати при виборі потужності сонячної системи та ємності накопичувача енергії (особливо якщо планується покриття частини нічних або зимових навантажень).

Узагальнення основних енергетичних показників

Для подальшого проектування сонячної системи електропостачання важливо звести основні енергетичні показники злітно-посадкового майданчика в узагальнену таблицю, до якої можуть входити:

- сумарна встановлена потужність  $P_{\Sigma}$  кВт;
- розрахункова максимальна потужність навантаження  $P_{max}$  кВт;
- середня добова потужність  $P_{сер}$  кВт;
- добове споживання електроенергії  $W_{доб}$  кВт·год;
- річне споживання електроенергії  $W_{річ}$  кВт·год;
- добовий коефіцієнт використання встановленої потужності  $k_{вик,доб}$ ;
- сезонний коефіцієнт нерівномірності електроспоживання  $k_{нер}$ .

Таблиця 2.6

#### Основні енергетичні показники електроспоживання ЗПМ «Дніпро-1»

Показник	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Сумарна встановлена потужність електроприймачів	$P_{\Sigma}$	80	кВт
Розрахункова максимальна потужність навантаження (з урах. к. одночасності)	$P_{max}$	60 (орієнтовно)	кВт
Середня добова потужність за добовим графіком	$P_{сер}$	29,2	кВт
Добове споживання електроенергії	$W_{доб}$	701	кВт·год
Річне споживання електроенергії	$W_{річ}$	255 865	кВт·год
Добовий коефіцієнт використання встановленої потужності	$k_{вик,доб}$	0,37	–
Середньомісячне споживання електроенергії	$W_{міс,сер}$	$\approx 21\ 322$	кВт·год
Максимальне середньомісячне споживання	$W_{міс,max}$	24 095	кВт·год
Сезонний коефіцієнт нерівномірності електроспоживання	$(k_{нер} = W_{міс,max} / W_{міс,сер})$	$\approx 1,13$	–

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» має відносно невелику, але структурно складну систему навантажень з вираженою добовою й помірною сезонною нерівномірністю. Це створює сприятливі передумови для:

- застосування сонячних фотоелектричних установок для покриття частини денного навантаження;
- реалізації систем зберігання електроенергії, які дозволять згладжувати піки навантаження та частково забезпечувати критичні споживачі в нічний час;
- підвищення загального рівня енергоефективності та енергетичної незалежності майданчика.
- 

#### **2.4. Втрати електричної енергії в існуючій системі та визначення основних зон неефективності**

Аналіз втрат електричної енергії в системі електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» є ключовим етапом для обґрунтування енергозберігаючих заходів та впровадження сонячної системи електропостачання. На основі структури схеми, розглянутої в підрозділі 2.2, та характеристик навантажень, наведених у підрозділі 2.3, можна виділити основні складові технічних та експлуатаційних втрат, а також окреслити зони неефективного використання електроенергії.

Класифікація втрат електричної енергії в системі електропостачання

Втрати електричної енергії в системі електропостачання злітно-посадкового майданчика доцільно поділити на такі основні групи:

- технічні втрати – зумовлені фізичними процесами в елементах електричної мережі (трансформаторах, кабельних лініях, комутаційній апаратурі, перетворювальних пристроях тощо);

- експлуатаційні (організаційні) втрати – пов’язані з нераціональними режимами роботи електроприймачів, перевитратою електроенергії через недосконале керування освітленням, вентиляцією, кондиціонуванням, а також з недоліками у системі обліку та контролю.

Технічні втрати, у свою чергу, включають:

- втрати в силових трансформаторах (холостого ходу та навантаження);
- втрати в кабельних лініях низької напруги (омічні втрати в жилах);
- втрати в апаратурі захисту та керування, розподільчих пристроях;
- втрати в перетворювальних пристроях (джерела безперебійного живлення, інвертори тощо).

Експлуатаційні втрати проявляються у вигляді надлишкової роботи освітлювальних установок, інженерних систем та допоміжного обладнання при частковому завантаженні майданчика або за відсутності фактичної потреби.

Оцінка технічних втрат у трансформаторах та кабельних лініях

За результатами оцінки встановленої потужності та добового графіка навантаження (підрозділ 2.3) прийнято, що сумарна встановлена потужність електроприймачів злітно-посадкового майданчика становить  $P_{\Sigma} \approx 80$  кВт, а середня добова потужність – близько  $P_{сер} \approx 29,2$  кВт. При цьому загальне річне споживання електроенергії майданчиком оцінено на рівні  $W_{річ} \approx 2,56$

105 кВт\год.

Втрати в силових трансформаторах.

Втрати в трансформаторах складються з втрат холостого ходу  $P_0$ , які практично не залежать від навантаження, та втрат навантаження  $P_k$ , пропорційних квадрату струму:

$$P_{тр} = P_0 + P_k \cdot (I_{ном} I)^2.$$

Оскільки злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» споживає лише частину потужності трансформаторів будівлі, фактичне навантаження трансформаторів у середньому є помірним, але втрати холостого ходу присутні постійно. У річному вимірі це призводить до суттєвої частки втрат, особливо в періоди з низьким навантаженням.

Втрати в кабельних лініях.

Втрати в кабельних лініях низької напруги визначаються омичними втратами в жилах кабелю й можуть бути оцінені за формулою:

$$P_{л} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{ф},$$

де  $R_{ф}$  – опір фази кабелю, який залежить від довжини лінії, матеріалу та перерізу провідника. При відносно невеликій довжині кабельних ліній до майданчика та невисоких струмах навантаження втрати в лініях зазвичай становлять 1–3 % від переданої потужності, але їхня частка зростає при нерівномірних режимах та наявності реактивних навантажень.

Орієнтовно можна вважати, що сумарні технічні втрати в трансформаторах і кабельних лініях системи електропостачання злітно-посадкового майданчика становлять 5–8 % від річного електроспоживання, що відповідає діапазону:

$$W_{\text{тех}} \approx (1,3 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}.$$

Для подальшого розрахункового аналізу доцільно прийняти усереднене значення, наприклад,  $W_{\text{тех}} \approx 7 \% W_{\text{річ}}$ .

Орієнтовна структура технічних втрат електричної енергії в системі  
електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»

Елемент системи електропостачання	Частка від технічних втрат, %	Орієнтовні втрати електроенергії, кВт-год/рік
Силові трансформатори	45	8 060
Кабельні лінії 0,4 кВ	30	5 373
Перетворювальні пристрої (UPS, інвертори тощо)	15	2 687
Розподільчі щити та комутаційна апаратура	10	1 791
Разом технічні втрати	100	17 911

Експлуатаційні втрати та нераціональні режими роботи обладнання

До експлуатаційних втрат та зон неефективного використання електроенергії злітно-посадковим майданчиком «Дніпро-1» належать:

До експлуатаційних причин перевитрат електроенергії на ЗПМ «Дніпро-1» доцільно віднести:

- надлишкову роботу освітлення, коли світло у технічних/допоміжних приміщеннях та на частині підходів і евакуаційних шляхів залишається увімкненим за відсутності персоналу;
- неоптимальні режими інженерних систем (вентиляція, кондиціювання, насоси), які можуть працювати без урахування реальної потреби, погодних умов та фактичної завантаженості об'єкта;
- недостатню деталізацію комерційного й технічного обліку за групами навантажень, що ускладнює ідентифікацію «енергоємних» зон і контроль ефекту від енергозберігаючих заходів;
- неповне використання можливостей автоматизованого керування, яке могло б реалізувати адаптивні режими роботи обладнання залежно від часу доби, присутності персоналу, виконання операцій та рівня природної освітленості.

Точна кількісна оцінка експлуатаційних втрат потребує детального енергоаудиту, однак за практичними оцінками їх рівень може становити порядку 5–10% річного електроспоживання. У поєднанні з технічними втратами це формує помітний резерв для підвищення енергоефективності. Від себе зазначу: саме експлуатаційні втрати найчастіше є «швидким» резервом, бо усуваються організаційними та автоматизованими рішеннями без значних капіталовкладень.

Визначення зон неефективності та резервів енергозбереження

За результатами аналізу до основних зон неефективності в системі електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» віднесено:

1. Низьке завантаження силових трансформаторів у окремі періоди. За часткових навантажень втрати холостого ходу мають підвищену частку в балансі, що знижує енергоефективність.

2. Втрати в кабельних лініях і РП при нерівномірному навантаженні. Нерівномірність розподілу струмів, можливий перекіс фаз та наявність реактивної складової збільшують втрати й додатково навантажують обладнання.

3. Нераціональні режими освітлення та інженерних систем. «Постійні» режими керування без прив'язки до фактичних потреб призводять до перевитрат, особливо в нічний час і за низької завантаженості.

4. Відсутність власної генерації. Повна залежність від мережі обмежує можливість часткового покриття навантажень за рахунок ВДЕ та зменшення витрат/втрат у системі електропостачання.

Визначені зони неефективності є базою для формування комплексу енергозберігаючих заходів, зокрема:

- оптимізація режимів освітлення та інженерних систем через автоматизоване керування;
- впровадження енергоефективних світлотехнічних рішень (LED, датчики руху/освітленості);
- удосконалення структури розподільчих мереж (балансування навантажень, за потреби — корекція перерізів кабелів);

- впровадження сонячної системи електропостачання як локального відновлюваного джерела для часткового покриття навантаження ЗПМ.

Отримані результати аналізу втрат і зон неефективності є вихідною основою для підрозділу 2.5, у якому буде виконано оцінку потенціалу впровадження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика.

## **2.5. Оцінка потенціалу впровадження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика**

Оцінка потенціалу впровадження сонячної (фотоелектричної) системи електропостачання для злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» у м. Києві ґрунтується на поєднанні трьох груп факторів:

- сонячно-енергетичні умови регіону;
- просторові та конструктивні можливості розміщення фотоелектричних модулів;
- структура й рівень електроспоживання майданчика, визначені в підрозділі 2.3.

За даними досліджень та карт потенціалу сонячної енергетики, середньорічна глобальна сонячна радіація на території України становить орієнтовно 1200–1400 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік залежно від регіону. Київ відноситься до центральної частини України й характеризується середнім рівнем сонячної радіації, достатнім для ефективного використання фотоелектричних установок.

Розрахунки на основі бази даних PVGIS показують, що для умов м. Київ специфічна річна генерація фотоелектричної установки (питомий вихід) складає близько

$Y_{sp} \approx 1000 \div 1050$  кВт·год/кВтрік, тобто 1 кВт встановленої потужності ФЕМ здатний за рік виробити приблизно 1,0–1,05 МВт·год електроенергії за оптимальної орієнтації та кута нахилу.

Отже, з точки зору кліматичних умов, Київ має сприятливий рівень сонячного потенціалу, який порівнянний або кращий, ніж у ряді країн Центральної та Північної Європи, де сонячна енергетика вже широко впроваджена. Додатково сучасні оцінки потенціалу дахових фотоелектричних систем в Україні показують суттєві резерви встановлення розподілених сонячних установок, зокрема у великих містах, включаючи Київ.

Просторові та конструктивні можливості розміщення фотоелектричних модулів

Злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» розташований на покрівлі конгресно-виставкового центру «Парковий» і являє собою площадковий майданчик із двома посадковими полями. Безпосередньо в зоні зльоту та посадки розміщення фотоелектричних модулів є неприпустимим з міркувань льотної безпеки, а також через вимоги щодо вільних підходів, відблисків, пожежної безпеки тощо.

Разом з тим, будівля, на якій розташовано майданчик, має значну площу покрівлі та можливі прилягаючі плоскі/експлуатовані ділянки даху, на яких встановлення сонячних панелей є технічно можливим за умови:

- дотримання обмежень по висоті та масі конструкцій, аби не перевищити несучу здатність покрівельних конструкцій;
- забезпечення відсутності засліплення екіпажів та персоналу (правильний вибір місць, орієнтації та кута нахилу модулів);
- організації безпечних проходів для обслуговування обладнання й виконання аварійно-рятувальних заходів;
- узгодження рішень з чинними будівельними та авіаційними нормами.

За попередньою оцінкою, можна вважати реалістичним виділення на покрівлі будівлі декількох сотень квадратних метрів для розміщення фотоелектричних модулів (наприклад, 300–500 м<sup>2</sup>). За умови використання сучасних кремнієвих модулів питомою потужністю 180–220 Вт/м<sup>2</sup> це відповідає встановленій потужності порядку:

$P_{ФЕМ, макс} \approx 50 \div 100$  кВт. Точне значення може бути визначене на стадії робочого проектування з урахуванням реальної геометрії покрівлі, затінення від надбудов, антен, огорожень, а також конструктивних обмежень.

Орієнтовна оцінка покриття електроспоживання за рахунок СЕС

У підрозділі 2.3 було прийнято, що річне споживання електроенергії злітно-посадковим майданчиком «Дніпро-1» становить орієнтовно

$$W_{річ} \approx 2,56 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{к.}$$

Річна генерація сонячної установки визначається співвідношенням:

$$W_{СЕС} = P_{ФЕМ} \cdot Y_{сп},$$

де  $P_{ФЕМ}$  – встановлена потужність сонячної електростанції, кВт;  
 $Y_{сп}$  – специфічна річна генерація, кВт·год/кВт·рік.

За умови  $Y_{сп} \approx 1030$  кВт·год/кВт·рік для м. Київ, можна оцінити частку покриття електроспоживання для різних варіантів потужності СЕС:

- варіант 1 – 20 % покриття споживання:

$$W_{СЕС} \approx 0,2 \cdot W_{річ} \approx 5,1 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{к.},$$

необхідна потужність:

$$P_{ФЕМ} \approx \frac{W_{СЕС}}{Y_{сп}} \approx \frac{5,1 \cdot 10^4}{1030} \approx 50 \text{ кВт.}$$

- варіант 2 – 30 % покриття споживання:

$$W_{СЕС} \approx 0,3 \cdot W_{річ} \approx 7,7 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{к.},$$

необхідна потужність:

$$P_{ФЕМ} \approx \frac{7,7 \cdot 10^4}{1030} \approx 75 \text{ кВт.}$$

- варіант 3 – 50 % покриття споживання:

$$W_{СЕС} \approx 0,5 \cdot W_{річ} \approx 1,28 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{к.},$$

необхідна потужність:

$$P_{ФЕМ} \approx \frac{1,28 \cdot 10^5}{1030} \approx 125 \text{ кВт.}$$

З огляду на реалістичні просторові обмеження покрівлі будівлі, найбільш доцільним для злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» виглядає діапазон встановленої потужності 50–80 кВт, що дозволить покривати орієнтовно 20–30 % річного електроспоживання майданчика. При цьому частка покриття денних навантажень (особливо в літній період) може бути ще вищою, оскільки генерація СЕС найбільша саме у світлу пору доби.

Варіант	Встановлена потужність сонячної електростанції, кВт	Питома річна генерація, собівартість, кВт-год/кВт	Частка покриття річного спожитий електроенергії об'єкта, %
	50	1030	51 500 20,1
	75	77 250	30,2 2 30,2
	100	100 000	103 000 40-3

Рис. 2.6. Сценарії потужності сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

### Функціональні переваги та роль сонячної системи для ЗПМ

Впровадження сонячної системи електропостачання на злітно-посадковому майданчику «Дніпро-1» дає змогу вирішити низку задач, важливих як з енергетичної, так і з експлуатаційної точки зору:

## 1. Зниження споживання електроенергії з мережі

Частина електроспоживання, насамперед денні навантаження (освітлення, інженерні системи, частково системи безпеки й офісна інфраструктура), може покриватися за рахунок власної генерації. Це безпосередньо зменшує обсяг купленої з мережі електроенергії та відповідні експлуатаційні витрати.

## 2. Підвищення енергетичної стійкості та живучості об'єкта

У сучасних умовах для України особливо актуальним є питання децентралізованих джерел електроживлення, які дозволяють підтримувати роботу критичних об'єктів (у тому числі транспортної та авіаційної інфраструктури) при пошкодженнях магістральних мереж. Розподілені сонячні установки розглядаються як один з ключових елементів підвищення стійкості енергосистеми.

## 3. Зменшення втрат електроенергії в мережі

Локальне виробництво електроенергії безпосередньо на об'єкті зменшує потоки потужності через трансформатори та кабельні лінії, що призводить до зменшення технічних втрат, розглянутих у підрозділі 2.4, особливо в періоди пікових денних навантажень.

## 4. Екологічний ефект та іміджева складова

Використання відновлюваних джерел енергії дозволяє зменшити викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом електроенергії на традиційних джерелах. Для об'єкта, що обслуговує ділову, службову та, потенційно, гуманітарну авіацію, впровадження "зеленої" генерації є важливим елементом формування позитивного екологічного іміджу та відповідає сучасним тенденціям декарбонізації інфраструктури.

## 5. Сумісність із системами накопичення енергії та резервування

Сонячна система може бути інтегрована з акумуляторними батареями та існуючими джерелами резервного живлення (UPS, дизель-генератори), що створює умови для реалізації гібридної схеми живлення відповідальних електроприймачів злітно-посадкового майданчика. Це дозволить не лише економити електроенергію, а й підвищити рівень надійності живлення критичних систем.

Узагальнюючий висновок щодо потенціалу впровадження СЕС

Проведена оцінка показує, що:

- сонячно-енергетичні умови м. Києва є достатньо сприятливими для ефективної роботи фотоелектричних установок з питомою річною генерацією на рівні  $\approx 1000\text{--}1050 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кВт}\cdot\text{рік}$ ;
- конструктивні особливості злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» та будівлі конгресно-виставкового центру «Парковий» допускають розміщення сонячних панелей на частині покрівлі з реалізованою встановленою потужністю орієнтовно 50–80 кВт, без порушення вимог льотної та пожежної безпеки;
- за такого рівня потужності сонячна система здатна забезпечити покриття близько 20–30 % річного електроспоживання злітно-посадкового майданчика з вищою часткою покриття денних навантажень;
- впровадження СЕС дозволить зменшити технічні й експлуатаційні втрати, підвищити енергетичну стійкість та надійність електропостачання відповідальних споживачів, а також сприятиме зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Отримані у цьому підрозділі результати підтверджують наявність значного потенціалу та практичної доцільності впровадження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

## РОЗДІЛ 3

# РОЗРОБКА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА

### 3.1. Обґрунтування вибору структури сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика

Метою даного підрозділу є вибір та обґрунтування структури сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1», яка б забезпечувала:

- підвищення енергоефективності системи електропостачання;
- зменшення річного споживання електроенергії з централізованої мережі;
- підвищення надійності та безперервності живлення відповідальних електроприймачів;
- відповідність вимогам льотної безпеки, пожежної безпеки та чинних норм.

Вибір структури здійснюється з урахуванням результатів розділу 2: встановленої потужності й режимів роботи навантажень, втрат електроенергії, потенціалу покриття частини навантаження за рахунок сонячної генерації.

Вимоги до сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика

До сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика ставляться такі основні вимоги:

- Функціональні вимоги:
  - часткове покриття денних навантажень (освітлення, інженерні системи, частина систем безпеки та диспетчеризації);
  - можливість живлення критичних електроприймачів у разі аварій в мережі (разом із наявними UPS/резервними джерелами);
  - сумісність із існуючою схемою електропостачання 0,4 кВ.

- Вимоги до надійності та безпеки:
  - недопущення негативного впливу роботи сонячної системи на параметри напруги та якості електроенергії;
  - наявність засобів автоматичного відключення при аваріях на стороні мережі, інверторів чи ФЕМ;
  - відповідність нормативним вимогам до електроустановок на будівлях, що обслуговують авіаційну інфраструктуру.

- Економічні вимоги:
  - забезпечення прийнятної строку окупності інвестицій;
  - відчутне скорочення річних витрат на електроенергію;
  - можливість поетапного впровадження (масштабованість системи).

- Просторові та конструктивні вимоги:
  - розміщення фотоелектричних модулів поза зоною зльоту і посадки та підходів до майданчика;
  - дотримання обмежень по масі й висоті конструкцій на покрівлі;
  - забезпечення доступу для монтажу й обслуговування.

#### Порівняння можливих структур сонячних систем електропостачання

З урахуванням специфіки злітно-посадкового майданчика можна розглянути три базові варіанти структури сонячної системи:

1. Мережева (on-grid) система без накопичувачів енергії
  - фотоелектричні модулі підключені до мережевих інверторів;
  - інвертори працюють паралельно з мережею 0,4 кВ;
  - відсутні акумуляторні батареї, вся надлишкова генерація або споживається локально, або, за наявності нормативних механізмів, може бути передана в мережу.

2. Автономна (off-grid) система з накопичувачами енергії
  - сонячні модулі заряджають акумуляторні батареї;
  - інвертори живлять окрему локальну мережу злітно-посадкового майданчика;
  - мережа 0,4 кВ використовується лише як резервне джерело (або не використовується).

### 3. Гібридна система (on-grid + накопичувачі енергії)

- сонячні модулі працюють через гібридні інвертори;
- наявні акумуляторні батареї для живлення відповідальних споживачів у аварійних режимах і згладжування піків;
- система може працювати як паралельно з мережею, так і в автономному режимі для частини навантажень.

Таблиця 3.1

#### Порівняння можливих структур сонячних систем електропостачання ЗПМ

Варіант структури системи	Характерні риси	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування для ЗПМ «Дніпро-1»
Мережева (on-grid, без АКБ)	ФЕМ + мережевий інвертор, робота паралельно з мережею	Відносно невисока вартість; висока ефективність використання сонячної генерації вдень; проста схема	Відсутність автономності; неможливість живлення навантажень при відключенні мережі	Може використовуватися для часткового покриття денних некритичних навантажень
Автономна (off-grid)	ФЕМ + контролер + АКБ + автономний інвертор, ізольована мережа	Висока ступінь автономності; можливість повністю незалежного живлення окремих споживачів	Висока вартість АКБ; складність реалізації для великого об'єкта; обмежений ресурс батарей	Недоцільна як основна, може застосовуватись лише для малих локальних об'єктів
Гібридна (on-grid + АКБ)	ФЕМ + гібридні інвертори + АКБ, робота паралельно з мережею або автономно	Поєднання переваг мережевої та автономної систем; можливість резервного живлення критичних навантажень; згладжування піків навантаження	Вища вартість у порівнянні з on-grid; складніша система керування	Найбільш доцільний варіант для ЗПМ «Дніпро-1» з точки зору надійності й енергоефективності

## Обґрунтування вибору гібридної структури системи

З огляду на аналіз навантажень злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» (розділ 2) та вимог до безперервності живлення критичних електроприймачів (світлосигнальне обладнання, системи зв'язку, метеорологія, безпека), найбільш доцільним є вибір гібридної структури сонячної системи електропостачання.

Основні аргументи на користь гібридної системи:

- Забезпечення резервування живлення відповідальних споживачів. Акумуляторні батареї в складі гібридної системи дозволяють забезпечити резервне живлення частини навантажень I категорії при відмові зовнішньої мережі або при запуску дизель-генератора (за наявності).

- Зниження пікових навантажень на мережу та трансформатори. У денний період, коли працює значна частина інженерних систем і освітлення, сонячна генерація бере на себе частину навантаження, що зменшує струми в мережі 0,4 кВ та відповідні втрати потужності.

- Гнучкий режим роботи. Гібридні інвертори можуть працювати в різних режимах:
  - паралельно з мережею (змішане живлення від мережі й СЕС),
  - з пріоритетом сонячної генерації,
  - в автономному режимі для виділеної групи навантажень (за рахунок АКБ).

- Можливість поетапного нарощування потужності. Система може проектуватися модульно: на першому етапі встановлюється частина ФЕМ і АКБ з можливістю подальшого розширення при позитивних результатах експлуатації.

Таким чином, у подальшому розрахунковому аналізі (підрозділи 3.2–3.4) розглядається гібридна сонячна система електропостачання, що працює паралельно з існуючою мережею 0,4 кВ та має можливість живлення виокремленої групи критичних електроприймачів від акумуляторних батарей.

Концептуальна схема гібридної сонячної системи електропостачання

Концептуально гібридна сонячна система електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» включає такі основні елементи:

- поле фотоелектричних модулів, встановлених на вільних ділянках покрівлі будівлі;
- один або декілька гібридних інверторів, підключених до мережі 0,4 кВ та до акумуляторних батарей;
- групу акумуляторних батарей, розраховану на забезпечення роботи критичних навантажень протягом заданого часу;
- щит розподілу навантажень, що формує окремі групи:
  - критичні навантаження (світлосигнальна система, метеобладнання, зв'язок тощо),
  - некритичні (частина освітлення, інженерні системи, допоміжні споживачі);
- апаратуру захисту та автоматики, яка забезпечує:
  - захист від перевантажень і коротких замикань;
  - автоматичне перемикання між режимами роботи (мережа/сонце/АКБ);
  - контроль параметрів напруги, частоти, рівня заряду АКБ тощо.

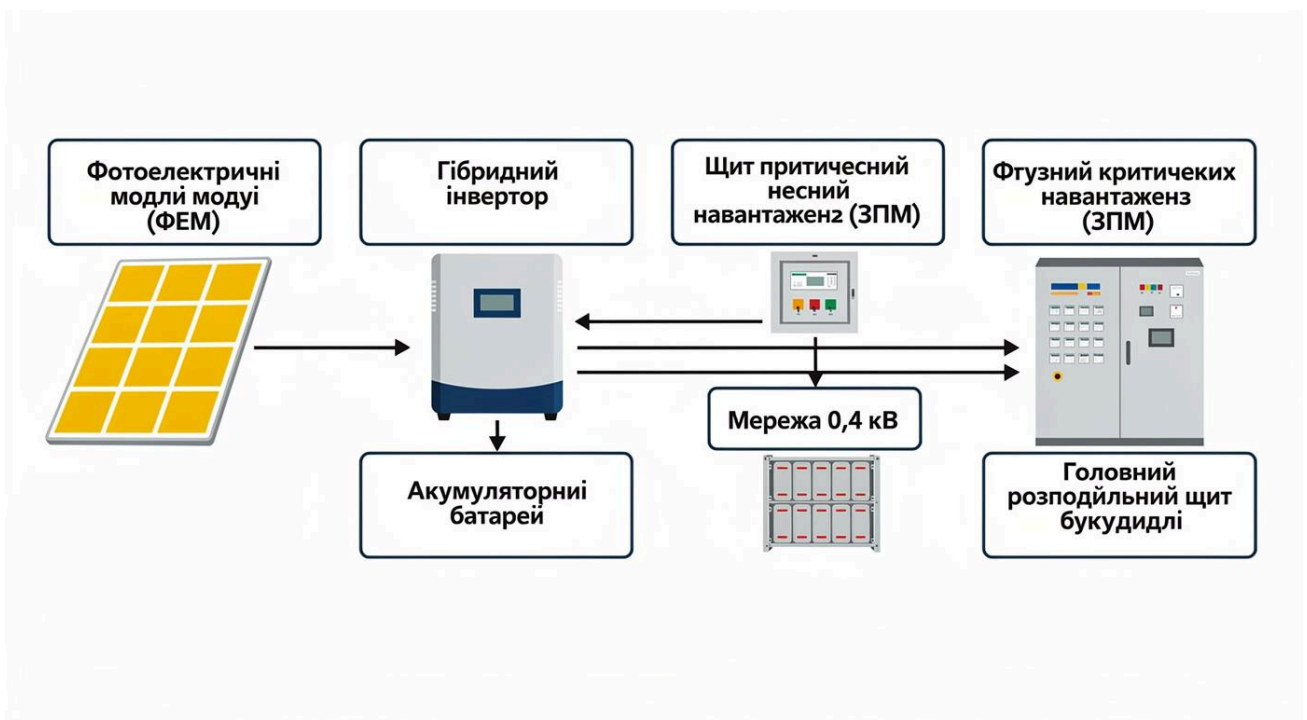


Рис.3.1. Концептуальна схема гібридної сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

### 3.2. Розрахунок необхідної потужності та конфігурації фотоелектричних модулів

Метою даного підрозділу є визначення необхідної встановленої потужності сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» та розробка її конфігурації на основі вибраної в підрозділі 3.1 гібридної структури. Розрахунок виконується з урахуванням сонячно-енергетичних умов регіону, режимів електроспоживання майданчика та конструктивних можливостей розміщення фотоелектричних модулів на покрівлі будівлі.

Вихідні дані та методика розрахунку

Для проведення розрахунків приймаються такі основні вихідні дані:

- розташування об'єкта: м. Київ, центральна частина України;
- річне електроспоживання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» (за результатами підрозділу 2.3):

$$W_{\text{річ}} \approx 2,56 \cdot 10^5 \text{ кВтгод/рік};$$

сумарна встановлена потужність електроприймачів майданчика:

$$P_{\Sigma} \approx 80 \text{ кВт};$$

- середня добова потужність навантаження за добовим графіком:

$$P_{\text{сер}} \approx 29,2 \text{ кВт};$$

- прийнята бажана частка покриття річного електроспоживання за рахунок сонячної системи:

$$\alpha = 0,3 \text{ (30 \%)}$$

За даними PVGIS та інших джерел, для м. Київ специфічний річний вихід (питома генерація) сонячної фотоелектричної установки, встановленої на покрівлі, становить орієнтовно 1000–1050 кВт·год/кВт·рік. Зокрема, для Києва наводиться значення близько 1036 кВт·год/кВт·рік. В інших аналітичних оглядах для України вказується середній діапазон 1100–1200 кВт·год/кВт·рік залежно від регіону та типу системи.

З урахуванням реальних втрат (забруднення модулів, відхилення кута нахилу від оптимального, просторове затінення тощо) у подальших розрахунках приймається:

$Y_{сп} = 1030 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кВт}\cdot\text{рік}$ , – питома річна генерація сонячної установки.

У загальному вигляді річна генерація сонячної електростанції визначається:

$W_{СЕС} = P_{ФЕМ} \cdot Y_{сп}$ , де  $P_{ФЕМ}$  – встановлена потужність фотоелектричних модулів (по постійному струму), кВт.

Таблиця 3.2

Вихідні дані для розрахунку сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Місце розташування об'єкта	–	м. Київ	–
Річне споживання електроенергії ЗПМ	$W_{річ}$	255 865	кВт·год/рік
Сумарна встановлена потужність електроприймачів	$P_{\Sigma}$	80	кВт
Середня добова потужність навантаження	$P_{сер}$	29,2	кВт
Бажана частка покриття річного споживання за рахунок СЕС	$\alpha$	0,3 (30 %)	–
Питома річна генерація СЕС для м. Київ	$Y_{сп}$	1030	кВт·год/кВт·рік
Орієнтовна розрахункова потужність сонячної системи	$P_{ФЕМ,розр}$	$\approx 74,5$	кВт
Прийнята встановлена потужність фотоелектричного поля	$P_{ФЕМ}$	75	кВт

Визначення необхідної встановленої потужності сонячної системи

Цільова річна генерація сонячної системи приймається пропорційною річному споживанню:

$$W_{СЕС} = \alpha \cdot W_{річ}.$$

$$\alpha = 0,3 \quad \alpha = 0,3 \quad \text{та} \quad W_{річ} \approx 2,56 \cdot 10^5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік} \text{ маємо:}$$

$$W_{СЕС} \approx 0,3 \cdot 2,56 \cdot 10^5 \approx 7,68 \cdot 10^4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}.$$

Необхідна встановлена потужність фотоелектричних модулів:

$$P_{ФЕМ,розр} = \frac{W_{СЕС}}{Y_{сп}} = \frac{7,68 \cdot 10^4}{1030} \approx 74,5 \text{ кВт}.$$

З урахуванням стандартизованих рядів потужності обладнання (інверторів, модулів) та для спрощення подальших розрахунків доцільно прийняти розрахункову встановлену потужність фотоелектричного поля:

$$P_{\text{ФЕМ}}=75 \text{ кВт.}$$

Річна генерація при такій потужності очікується на рівні:

$$W_{\text{СЕС},75}=P_{\text{ФЕМ}} \cdot Y_{\text{сп}} \approx 75 \cdot 1030 \approx 7,7 \cdot 10^4 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік,}$$

що становить близько:

$$\eta_W = \frac{W_{\text{СЕС},75}}{W_{\text{річ}}} \approx \frac{7,7 \cdot 10^4}{2,56 \cdot 10^5} \approx 0,30 \text{ (30 \%)}.$$

Таким чином, прийнята потужність сонячної системи 75 кВт забезпечує досягнення раніше обраної цільової частки покриття річного електроспоживання злітно-посадкового майданчика.

Середньодобова генерація сонячної системи у річному вимірі буде:

$$W_{\text{СЕС,доб}} = \frac{W_{\text{СЕС},75}}{365} \approx \frac{7,7 \cdot 10^4}{365} \approx 212 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу.}$$

Порівняно із середнім добовим споживанням майданчика  $W_{\text{доб}} \approx 701 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$ , частка покриття становить також близько 30 %, при цьому основне покриття очікується саме в денні години.

Вибір типу фотоелектричних модулів та їх основних параметрів

Для реалізації потужності 75 кВт доцільно застосувати сучасні монокристалічні кремнієві модулі стандартного розміру з номінальною потужністю 430–460 Вт. У  $P_{\text{мод}}=450 \text{ Вт}=0,45 \text{ кВт}$ .

Основні паспортні параметри такого модуля (для подальших розрахунків) можуть бути прийняті в таких межах:

- напруга в точці максимальної потужності:  $U_{\text{mpp}} \approx 41 \text{ В}$ ;
- струм у точці максимальної потужності:  $I_{\text{mpp}} \approx 11 \text{ А}$ ;
- напруга холостого ходу:  $U_{\text{oc}} \approx 49,5 \text{ В}$ ;
- струм короткого замикання:  $I_{\text{sc}} \approx 11,5 \text{ А}$ ;
- площа модуля:  $S_{\text{мод}} \approx 1,9 \div 2,0 \text{ м}^2$

## Основні електротехнічні параметри обраного фотоелектричного модуля

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Номінальна потужність модуля	$P_{\text{мод}}$	0,45	кВт (450 Вт)
Напруга в точці максимальної потужності	$U_{\text{mpp}}$	41	В
Струм в точці максимальної потужності	$I_{\text{mpp}}$	11	А
Напруга холостого ходу	$U_{\text{oc}}$	49,5	В
Струм короткого замикання	$I_{\text{sc}}$	11,5	А
Орієнтовна площа модуля	$S_{\text{мод}}$	1,95	м <sup>2</sup>

Кількість модулів, необхідна для формування поля потужністю 75 кВт, визначається:

$$N_{\text{мод}} = \frac{P_{\text{ФЕМ}}}{P_{\text{мод}}} = \frac{75}{0,45} \approx 166,7.$$

З урахуванням необхідності цілого числа модулів приймаємо:

$$N_{\text{мод}} = 168 \text{ шт.}$$

Тоді фактична встановлена потужність фотоелектричного поля становитиме:

$$P_{\text{ФЕМ, факт}} = N_{\text{мод}} \cdot P_{\text{мод}} = 168 \cdot 0,45 \approx 75,6 \text{ кВт.}$$

Це незначне перевищення відносно розрахункового значення (74,5–75 кВт) є допустимим і навіть бажаним, оскільки частково компенсує реальні експлуатаційні втрати.

Формування стрінгів фотоелектричних модулів та вибір конфігурації

При проектуванні конфігурації масиву ФЕМ важливо забезпечити:

- відповідність напруги стрінгу діапазону вхідної напруги інвертора;
- допустимий струм по кожному входу інвертора;
- уніфікацію та симетрію масиву для спрощення експлуатації.

Приймемо, що вибрані гібридні інвертори мають максимальну вхідну постійну напругу не менше 1000 В та робочий діапазон напруги МРР-прослідковувача, наприклад, 350–800 В. За таких умов доцільно формувати стрінги з 12 модулів послідовно:

$$U_{\text{mpp, стр}} = 12 \cdot U_{\text{mpp}} \approx 12 \cdot 41 \approx 492 \text{ В,}$$

$$U_{oc,стр} = 12 \cdot U_{oc} \approx 12 \cdot 49,5 \approx 594 \text{ В.}$$

Отримані значення знаходяться в робочому діапазоні більшості промислових інверторів 0,4 кВ та не перевищують граничну вхідну напругу, що забезпечує безпечну й ефективну роботу системи.

Кількість модулів у стрінгу:

$$N_{посл} = 12 \text{ шт,}$$

загальна кількість стрінгів:

$$N_{стр} = N_{посл} N_{мод} = 12 \cdot 168 = 14 \text{ стрінгів.}$$

Потужність одного стрінгу:

$$P_{стр} = N_{посл} \cdot P_{мод} = 12 \cdot 0,45 = 5,4 \text{ кВт.}$$

Сумарна потужність поля:

$$P_{ФЕМ,факт} = N_{стр} \cdot P_{стр} = 14 \cdot 5,4 = 75,6 \text{ кВт,}$$

що узгоджується з попередніми розрахунками.

Таблиця 3.4

Конфігурація масиву фотоелектричних модулів сонячної системи  
електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Кількість модулів у одному стрінгу	$N_{посл}$	12	шт.
Кількість стрінгів у полі	$N_{стр}$	14	шт.
Загальна кількість фотоелектричних модулів	$N_{мод}$	168	шт.
Потужність одного стрінгу	$P_{стр}$	5,4	кВт
Сумарна встановлена потужність фотоелектричного поля	$P_{ФЕМ,факт}$	75,6	кВт
Орієнтовна сумарна площа фотоелектричних модулів	$S_{ФЕМ}$	$\approx 328$	$m^2$
Орієнтовна необхідна площа з урахуванням проходів	$S_{потр}$	$\approx 426$	$m^2$

Подальший вибір кількості та типу гібридних інверторів може виконуватися, наприклад, за схемою:

- 3 інвертори номінальною потужністю по 25 кВт кожен;

- до кожного інвертора підключається відповідна кількість стрінгів (наприклад, 5 + 5 + 4 стрінги);
- забезпечується допустимий рівень DC/AC-співвідношення (наближений до 1,0–1,1), що підвищує повноту використання встановленої потужності ФЕМ.

Оцінка необхідної площі розміщення фотоелектричних модулів

Оцінимо площу, необхідну для розміщення обраної кількості модулів. Для одного модуля площею  $S_{\text{мод}} \approx 1,95 \text{ м}^2$  сумарна площа фотоелектричного поля:

$$S_{\text{ФЕМ}} = N_{\text{мод}} \cdot S_{\text{мод}} = 168 \cdot 1,95 \approx 328 \text{ м}^2.$$

З урахуванням проходів для обслуговування, міжрядних відстаней, можливих зон затінення та конструктивних елементів покрівлі доцільно ввести коефіцієнт запасу 1,2–1,3:

$$S_{\text{потр}} \approx 1,3 \cdot S_{\text{ФЕМ}} \approx 1,3 \cdot 328 \approx 426 \text{ м}^2.$$

Отримане значення площі знаходиться в межах попередньо оцінених можливостей покрівлі будівлі конгресно-виставкового центру «Парковий» (орієнтовно 300–500 м<sup>2</sup> вільної площі), що підтверджує конструктивну здійсненність розміщення поля ФЕМ потужністю близько 75 кВт.

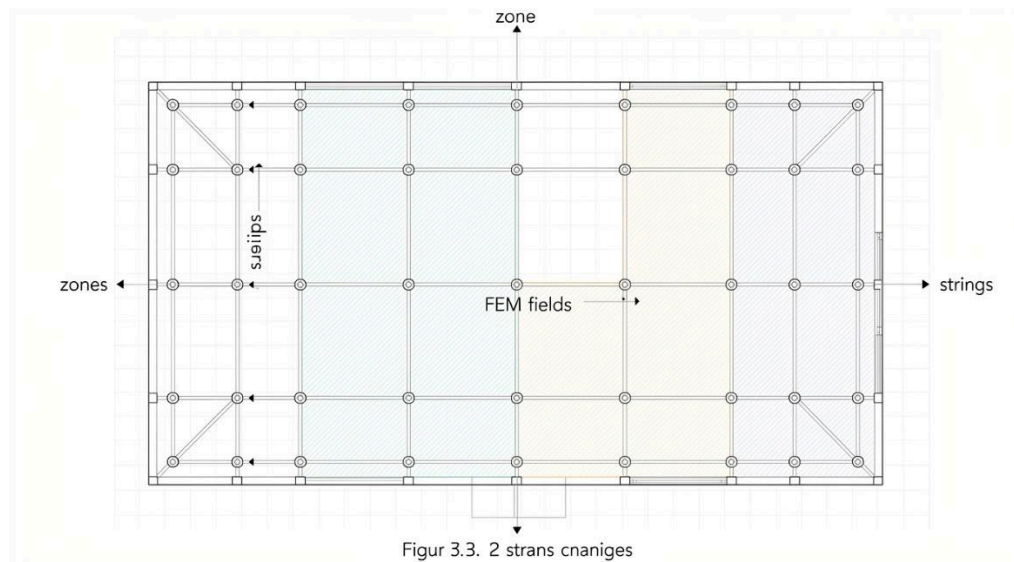


Рис. 3.2. Схематичне розташування полів ФЕМ на покрівлі будівлі

### 3.3. Вибір та розрахунок акумуляторних батарей і перетворювального обладнання

Метою даного підрозділу є визначення параметрів акумуляторних батарей (АКБ) та перетворювального обладнання (гібридних інверторів), необхідних для роботи сонячної гібридної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1».

Призначення акумуляторної батареї та вихідні припущення

АКБ у складі гібридної системи виконують такі функції:

- резервне живлення критичних споживачів (світлосигнальна система, зв'язок, метео, безпека) при відключенні мережі;
- часткове згладжування пікових навантажень;
- підвищення загальної надійності живлення.

Прийmemo для розрахунку:

- сумарна потужність критичних навантажень:

$P_{кр} \approx 20$  кВт;

- необхідний час автономної роботи при повній відсутності мережі:

$t_{авт} = 2$  год

- допустима глибина розряду АКБ (для Li-ion):

$DoD = 0,8$  (80 %);

- коефіцієнт урахування втрат у перетворювачах та кабелях:

$k_{вт} = 1,1$ .

Орієнтовний розрахунок ємності акумуляторної батареї

Енергія, яку має забезпечити АКБ:

$W_{АКБ} = P_{кр} \cdot t_{авт} \cdot k_{вт} = 20 \cdot 2 \cdot 1,1 = 44$  кВт\год.

Необхідна корисна ємність (з урахуванням DoD):

$$W_{АКБ,вст} = \frac{W_{АКБ}}{DoD} = \frac{44}{0,8} \approx 55 \text{ кВт\год.}$$

Прийmemo для подальших розрахунків **встановлену ємність АКБ:**

$W_{АКБ,прийм} = 60$  кВт год.

Основні розрахункові параметри акумуляторної батареї сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Потужність критичних навантажень	$P_{кр}$	20	кВт
Необхідний час автономної роботи	$t_{авт}$	2	год
Розрахункова енергія, яку має забезпечити АКБ	$W_{АКБ}$	44	кВт·год
Розрахункова необхідна енергоемність АКБ	$W_{АКБ,розр}$	55	кВт·год
Прийнята (встановлена) енергоемність АКБ	$W_{АКБ,прийнята}$	60	кВт·год
Тип акумуляторної батареї	—	Li-ion, модулі 48 В	—

Вибір та узгодження потужності гібридних інверторів

Враховуючи встановлену потужність поля ФЕМ:

$P_{ФЕМ} \approx 75$  кВт,

та максимальну потужність критичних навантажень:

$P_{кр} \approx 20$  кВт,

необхідно забезпечити:

- можливість видачі в мережу/на навантаження всієї потужності ФЕМ (по АС-стороні – орієнтовно 60–75 кВт);
- одночасне живлення критичних навантажень від АКБ у разі відключення мережі.

Доцільно прийняти конфігурацію:

- 3 гібридні інвертори по 25 кВт кожен:

$P_{інв,АС} = 3 \cdot 25 = 75$  кВт.

Це забезпечує:

- DC/AC співвідношення близьке до 1 (75,6 кВт ФЕМ / 75 кВт інверторів);
- резерв по потужності для роботи в умовах підвищених навантажень;

- можливість розподілу стрінгів ФЕМ (наприклад, 5 + 5 + 4 стрінги) між трьома інверторами.

У режимі аварійної роботи окремі інвертори (або їх сукупність) забезпечують живлення критичних навантажень  $P_{кр}$  за рахунок АКБ.

Узагальнення результатів підрозділу

У результаті розрахунків:

- прийнята акумуляторна батарея ємністю  $\sim 60$  кВт·год, що забезпечує  $\approx 2$  години автономної роботи критичних навантажень сумарною потужністю 20 кВт;
- рекомендована конфігурація перетворювального обладнання – три гібридні інвертори по 25 кВт, які працюють паралельно з мережею 0,4 кВ та мають можливість живити критичні навантаження від ФЕМ/АКБ;
- така конфігурація узгоджується з потужністю масиву ФЕМ ( $\approx 75,6$  кВт) і забезпечує необхідний рівень надійності та гнучкості роботи системи.

### **3.4. Розробка схеми приєднання сонячної системи до існуючої мережі електропостачання злітно-посадкового майданчика**

Метою даного підрозділу є розробка схеми приєднання гібридної сонячної системи електропостачання до існуючої мережі 0,4 кВ злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» та визначення принципів розподілу навантажень, захисту й автоматики.

Загальні принципи приєднання

Сонячна система потужністю близько 75 кВт (масив ФЕМ + три гібридні інвертори по 25 кВт) інтегрується в існуючу систему електропостачання, описану в розділі 2, за такими принципами:

- робота паралельно з мережею 0,4 кВ будівлі конгресно-виставкового центру «Парковий»;
- формування виділеної групи критичних навантажень злітно-посадкового майданчика, які можуть живитися від ФЕМ та АКБ в автономному режимі;

- мінімальне втручання в структуру існуючого ГРЩ та щита живлення ЗПМ, використання окремого проміжного щита для СЕС.

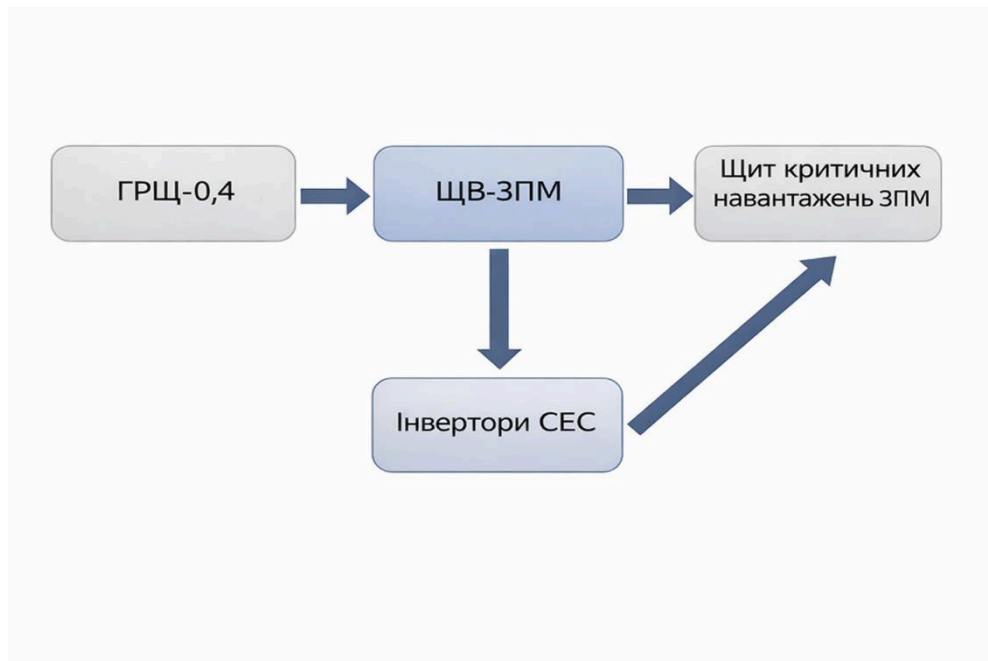


Рис.3.3. Структурна схема приєднання сонячної системи до мережі 0,4 кВ ЗПМ «Дніпро-1»

#### Приєднання по стороні постійного струму

По стороні постійного струму (DC) фотоелектричний масив конфігурується відповідно до результатів підрозділу 3.2:

- 168 модулів по 450 Вт кожен,
- 12 модулів послідовно в одному стрінгу,
- 14 стрінгів загалом.

Стрінги ФЕМ об'єднуються через комбінаторні (string) коробки, де розміщуються:

- запобіжники / автоматичні вимикачі по кожному стрінгу;
- апаратура захисту від перенапруги по DC;
- пристрої для відключення масиву (DC-вимикачі).

Від комбінаторних коробок кабелі постійного струму підводяться до гібридних інверторів, розташованих у технічному приміщенні поблизу ГРЩ або щита злітно-посадкового майданчика. Для кожного інвертора формується свій набір стрінгів з урахуванням допустимих струмів та вхідної напруги виробника.

Приєднання по стороні змінного струму та розподіл навантажень

По стороні змінного струму (АС) виходи трьох гібридних інверторів 0,4 кВ приєднуються до окремого щита сонячної системи – ЩС-СЕС. У цьому щиті встановлюються:

- вхідні автоматичні вимикачі по кожному інвертору;
- апаратура захисту від перенапруги по АС;
- лічильники/вимірювальні трансформатори (за потреби).

Далі реалізуються два основні напрямки живлення:

1. Паралельна робота з мережею ЩС-СЕС через ввідний автомат приєднується до шин 0,4 кВ ГРЩ або до секції щита живлення злітно-посадкового майданчика (ЩВ-ЗПМ). У нормальному режимі електроенергія від інверторів:

- частково покриває навантаження ЗПМ (у т.ч. критичні та некритичні споживачі);
- при нестачі потужності СЕС решта береться з мережі;
- при надлишку сонячної генерації – зменшується відбір потужності з мережі.

2. Живлення виділених критичних навантажень Від ЩС-СЕС живиться щит критичних навантажень ЗПМ – ЩКР, до якого підключаються:

- частина світлосигнальної системи;
- засоби зв'язку та диспетчеризації;
- метеобладнання;
- вибрані лінії систем безпеки.

У разі відсутності напруги на стороні мережі 0,4 кВ інвертори переходять у режим живлення ЩКР від ФЕМ/АКБ (автономна робота), забезпечуючи заданий час резерву.

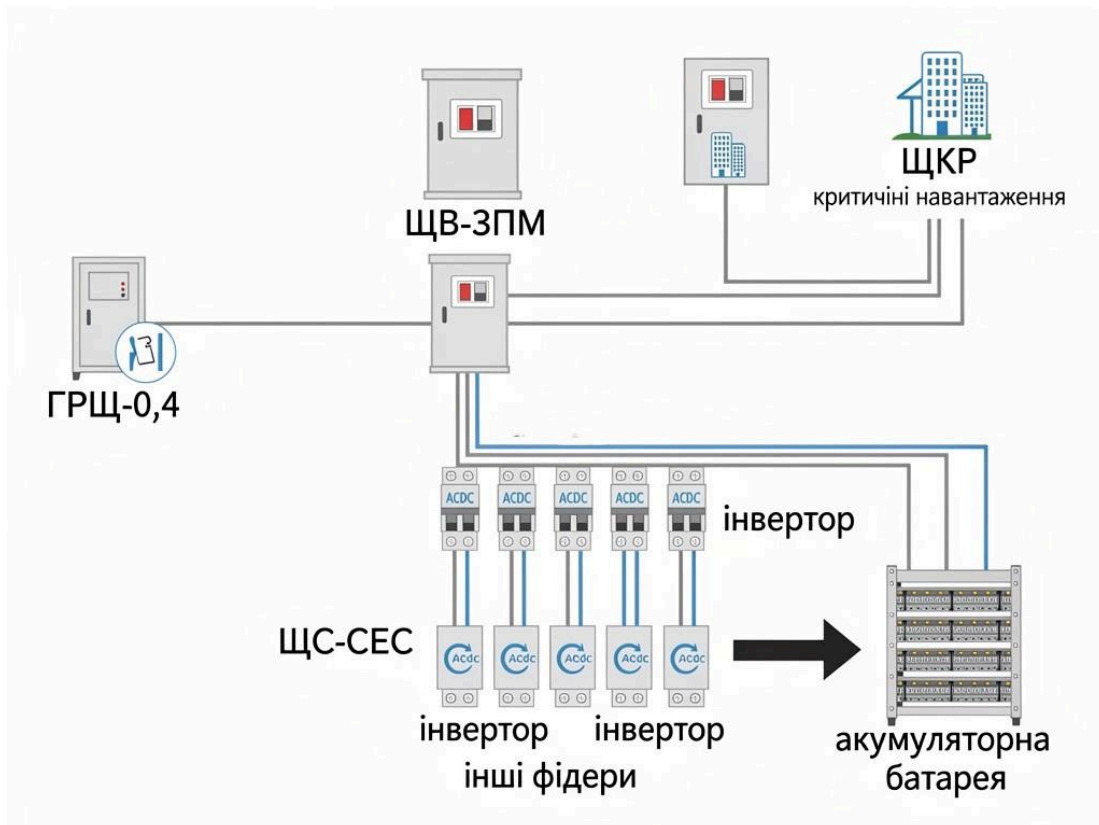


Рис. 3.4. Однолінійна схема приєднання гібридної сонячної системи до мережі 0,4 кВ ЗПМ «Дніпро-1»

Захист, автоматика та облік

У схемі приєднання сонячної системи передбачаються:

- захисти по DC-стороні – запобіжники/автомати по стрінгах, SPD по постійному струму, роз'єднувачі для безпечного відключення полів ФЕМ;
- захисти по AC-стороні – автоматичні вимикачі на виходах інверторів і на вводі ЩС-СЕС, SPD по змінному струму, захист від перевантаження і КЗ;
- автоматичне відключення при відсутності напруги в мережі (антиострівні функції інверторів) та кероване перемикання режимів «мережа / СЕС / АКБ» для критичних навантажень;
- у вузлі приєднання до ГРЩ або ЩВ-ЗПМ – встановлення засобів обліку виробленої СЕС та споживання з мережі (за потреби роздільного комерційного обліку).

3.5. Розробка комплексу енергозберігаючих заходів в системі електропостачання злітно-посадкового майданчика

Комплекс енергозберігаючих заходів для злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» базується на результатах аналізу енергоспоживання (розділ 2) та рішень щодо впровадження сонячної гібридної системи (розділ 3). Мета заходів – зменшення річного споживання електроенергії з мережі, скорочення втрат, підвищення ефективності використання встановленої потужності та одночасне збереження/підвищення надійності електропостачання.

#### Загальні принципи формування енергозберігаючого комплексу

При формуванні комплексу енергозберігаючих заходів для злітно-посадкового майданчика враховуються такі принципи:

- пріоритизація критичних навантажень (світлосигнальне обладнання, зв'язок, метео, безпека) – для них енергозбереження не повинно погіршувати рівень безпеки польотів;
- заміна застарілих технологічних рішень на енергоефективні (особливо в частині освітлення, інженерних систем, перетворювачів);
- оптимізація режимів роботи замість «жорсткої економії» – максимум енергії у потрібний час, мінімум у періоди простою;
- інтеграція відновлюваних джерел енергії (сонячна система) в загальний баланс об'єкта;
- впровадження систем моніторингу та керування навантаженням, які дозволяють оперативно реагувати на зміни режимів.

#### Технічні енергозберігаючі заходи

До технічних заходів належать рішення, які безпосередньо змінюють конструкцію системи електропостачання або її обладнання.

1. Впровадження сонячної гібридної системи електропостачання. Реалізація сонячної установки потужністю близько 75 кВт з акумуляторною батареєю ємністю 60 кВт·год дозволяє покривати до 30 % річного електроспоживання майданчика, знизити навантаження на мережу 0,4 кВ та трансформатори, а також зменшити частину технічних втрат. Особливо відчутний ефект досягається в період денних та вечірніх піків навантаження в літній сезон.

## 2. Модернізація систем освітлення

Заміна традиційних джерел світла на світлодіодні (LED) для службового, технічного та загального освітлення, а також використання енергоефективних світильників у допоміжних зонах дозволяє знизити споживання електроенергії на освітлення на 30–50 %. Додаткове впровадження датчиків руху та датчиків освітленості в зонах із нерегулярним перебуванням персоналу дає додаткову економію.

## 3. Оптимізація режимів роботи інженерних систем

Використання частотних перетворювачів для насосів, вентиляторів, систем вентиляції/кондиціонування, а також перехід до автоматизованого керування за температурою, тиском, присутністю людей дозволяє зменшити витрати електроенергії без погіршення умов роботи персоналу та обладнання.

## 4. Зменшення втрат у мережі 0,4 кВ

Оптимізація перерізів кабелів при реконструкції ліній, перевірка схем розподілу навантажень між фазами, можливе введення компенсації реактивної потужності на стороні ЗПМ (за необхідності) зменшує втрати в кабелях і апаратурі, а також покращує режим роботи трансформаторів.

### Організаційні та експлуатаційні заходи

Крім технічних рішень, важливу роль відіграють організаційні та експлуатаційні заходи:

1. Впровадження системи обліку та моніторингу енергоспоживання  
Встановлення вузлів обліку на окремі групи навантажень (критичні, некритичні, інженерні системи, освітлення) і підключення їх до системи диспетчеризації дозволяє аналізувати профілі навантаження та оперативно виявляти зони перевитрат.

2. Розробка та дотримання графіків роботи обладнання  
На основі даних обліку та добових/сезонних графіків навантаження формуються раціональні графіки включення/відключення інженерних систем і освітлення, що дозволяє уникати роботи обладнання «на всякий випадок».

3. Навчання персоналу основам енергоефективної експлуатації. Проведення інструктажів та внутрішніх регламентів щодо вимкнення непотрібного обладнання, правильного налаштування систем вентиляції і кондиціонування, використання режимів очікування тощо допомагає закріпити енергозберігаючу поведінку на рівні щоденних операцій.

#### Керування навантаженням та резервування

З огляду на впровадження гібридної сонячної системи ключовим елементом комплексу енергозбереження є інтелектуальне керування навантаженням і резервуванням:

- виділення пріоритетних навантажень, які в першу чергу живляться від сонячної системи та АКБ (зв'язок, метео, частина світлосигнального обладнання);
- реалізація зонального керування освітленням, коли в аварійних режимах працює лише мінімально необхідний набір світильників;
- використання функцій гібридних інверторів для обмеження потужності, що відбирається з мережі, та максимально можливого використання власної генерації;
- налаштування сценаріїв автоматичного відключення некритичних навантажень при роботі від АКБ, що дозволяє збільшити час резерву для ключових систем.

таблиця 3.7

#### «Основні енергозберігаючі заходи та очікуваний ефект»

№	Захід	Очікуваний ефект
1	Впровадження сонячної системи 75 кВт	-30 % споживання з мережі
2	LED-освітлення + автоматика	-30...50 % витрат на освітлення
3	Оптимізація режимів інженерних систем	-10...20 % їхнього споживання
4	Облік та моніторинг	Контроль та виявлення перевитрат
5	Інтелектуальне керування навантаженням	Збільшення часу резерву, зниження піків

### 3.6. Техніко-економічний розрахунок ефективності впровадження сонячної системи (строк окупності, економія електроенергії, показники ефективності)

Метою даного підрозділу є оцінка економічної доцільності впровадження сонячної гібридної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1», а саме: визначення річної економії електроенергії, строку окупності капітальних вкладень та основних показників ефективності проєкту.

Вихідні економічні дані

Для розрахунків приймаються такі вихідні припущення (умовні, для розрахункового прикладу):

- встановлена потужність сонячної системи (за 3.2):

$P_{ФЕМ}=75$  кВт;

- річна генерація СЕС (питома 1030 кВт·год/кВт·рік):

$W_{СЕС}\approx 75\cdot 1030\approx 77000$  кВт·год/рік;

- орієнтовний середній тариф на електроенергію для споживача (умовно):

$сел=5,0$  грн/кВт год;

- капітальні витрати на впровадження сонячної системи (ФЕМ + інвертори + АКБ 60 кВт·год + монтаж, кабельне господарство, проєкт):

$I_0\approx 3000000$  грн;

- річні експлуатаційні витрати (обслуговування, діагностика, заміна дрібних елементів) – умовно:

$Сексп=0,015\cdot I_0\approx 45000$  грн/рік.

Вихідні економічні дані для техніко-економічного розрахунку сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Встановлена потужність сонячної системи	РФЕМ	75	кВт
Орієнтовна річна генерація сонячної системи	W <sub>СЕС</sub>	77 000	кВт·год/рік
Річне електроспоживання ЗПМ	W <sub>річ</sub>	255 865	кВт·год/рік
Частка покриття річного споживання за рахунок СЕС	$\eta W$	$\approx 30$	%
Середній тариф на електроенергію	сел	5,0	грн/кВт·год
Орієнтовні капітальні витрати на впровадження СЕС	I <sub>0</sub>	3 000 000	грн
Орієнтовні річні експлуатаційні витрати на обслуговування СЕС	Сексп	45 000	грн/рік

Річна економія електроенергії та коштів

Річна економія електроенергії за рахунок роботи сонячної системи дорівнює річній генерації СЕС (за умови, що вся вироблена енергія використовується самим об'єктом):

$$\Delta W = W_{\text{СЕС}} \approx 77000 \text{ кВт год/рік.}$$

Річна економія коштів (зменшення витрат на купівлю електроенергії з мережі):

$$E_{\text{річ}} = \Delta W \cdot \text{сел} = 77000 \cdot 5,0 \approx 385000 \text{ грн/рік.}$$

Чиста річна економія з урахуванням експлуатаційних витрат на СЕС:

$$E_{\text{чист}} = E_{\text{річ}} - \text{Сексп} \approx 385000 - 45000 = 340000 \text{ грн/рік}$$

Строк окупності та прості показники ефективності

Найпростішим показником є простий строк окупності проекту:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{I_0}{E_{\text{чист}}} = \frac{3\,000\,000}{340\,000} \approx 8,8 \text{ років.}$$

Таким чином, за прийнятих вихідних припущень орієнтовний строк окупності проєкту впровадження сонячної системи потужністю 75 кВт із АКБ 60 кВт·год становить близько 9 років. З урахуванням прогнозованого строку служби фотоелектричних модулів 20–25 років та акумуляторних батарей 8–12 років можна очікувати позитивний сумарний економічний ефект протягом життєвого циклу системи.

Для більш детальної оцінки ефективності можуть використовуватися також:

- чистий дисконтований дохід (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{E_{\text{чист.т.}}}{(1+r)^t} - I_0,$$

де  $r$  – ставка дисконту,  $n$  – розрахунковий період (роки);

- індекс рентабельності (PI):

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{E_{\text{чист.т.}}}{(1+r)^t}}{I_0};$$

внутрішня норма рентабельності (IRR) – значення ставки дисконту, при якій  $NPV=0$ .

У межах даної роботи основна увага приділяється простому строку окупності та річній економії, як найбільш наочним показникам для порівняння варіантів.

Узагальнення результатів техніко-економічного аналізу

Проведений техніко-економічний розрахунок дозволяє зробити такі висновки:

- сонячна гібридна система електропостачання потужністю близько 75 кВт із акумуляторною батареєю ємністю 60 кВт·год забезпечує орієнтовно 77 тис. кВт·год/рік генерації, що відповідає близько 30 % річного електроспоживання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1»;

- річна економія витрат на електроенергію (за прийнятого тарифу 5 грн/кВт·год) становить близько 385 тис. грн/рік, а чиста економія з урахуванням експлуатаційних витрат – близько 340 тис. грн/рік;

- орієнтовний простий строк окупності проєкту становить ~8,8 років, що є прийнятним для проєктів у сфері відновлюваної енергетики та відповідає строкам служби основного обладнання;

- крім прямого економічного ефекту, проєкт забезпечує додаткові нематеріальні переваги: підвищення енергетичної незалежності, зменшення технічних втрат, покращення екологічних показників та іміджу об'єкта.

Таблиця 3.9

Зведені економічні показники ефективності впровадження сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»

Показник	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання	Коментар
Річна генерація сонячної системи	WSEC	77 000	кВт·год/рік	Близько 30 % річного споживання ЗПМ
Річна економія електроенергії з мережі	$\Delta W$	77 000	кВт·год/рік	За рахунок власної генерації
Річна економія коштів (брутто)	Еріч	385 000	грн/рік	$\Delta W \cdot \text{сел}$
Річна чиста економія (з урахуванням експлуатації)	Ечист	340 000	грн/рік	Еріч–СекспЕ
Орієнтовний простий строк окупності проєкту	Токуп	$\approx 8,8$	років	IO/Ечист

### 3.7. Оцінка надійності та безперервності електропостачання злітно-посадкового майданчика при використанні сонячної системи

Метою даного підрозділу є оцінка впливу впровадження сонячної гібридної системи електропостачання потужністю 75 кВт з акумуляторною батареєю ємністю 60 кВт·год на надійність та безперервність живлення злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1».

Вимоги до надійності електропостачання злітно-посадкових майданчиків

До електропостачання злітно-посадкових майданчиків висуваються підвищені вимоги, оскільки від безперервності живлення ряду систем безпосередньо залежить безпека польотів. До критичних споживачів належать:

- світлосигнальне обладнання посадкових полів;
- системи радіозв'язку та диспетчеризації;
- метеорологічні комплекси;
- системи відеоспостереження та безпеки.

Такі споживачі, як правило, відносяться до I категорії за надійністю електропостачання і повинні мати не менше двох незалежних джерел живлення та/або можливість резервування за рахунок автономних джерел (UPS, ДГУ, АКБ тощо).

Стан надійності до впровадження сонячної системи

До впровадження сонячної системи злітно-посадковий майданчик «Дніпро-1» отримує електроенергію:

- від міської мережі через трансформаторну підстанцію будівлі та ГРЩ 0,4 кВ;
- для окремих критичних ланцюгів – через джерела безперебійного живлення (UPS) з обмеженим часом роботи.

Такий підхід забезпечує підвищений, але не максимальний рівень надійності:

- при тривалому відключенні зовнішньої мережі та вичерпанні ресурсу UPS частина критичних систем може бути вимушено відключена;
- відсутнє локальне генерування електроенергії, яке дозволило б компенсувати аварійні ситуації в мережі.

Отже, схема має характер «мережа + короткочасний резерв», що обмежує час безперервної роботи майданчика в умовах тривалих порушень електропостачання.

Вплив сонячної гібридної системи на надійність

Запропонована гібридна сонячна система включає:

- фотоелектричне поле потужністю  $\approx 75$  кВт;
- акумуляторну батарею ємністю  $\approx 60$  кВт·год;
- три гібридні інвертори по 25 кВт, підключені до мережі 0,4 кВ та до щита критичних навантажень.

Для критичних споживачів сумарною потужністю  $P_{кр} \approx 20$  кВт забезпечується:

- автономна робота від АКБ протягом не менше 2 годин при повній відсутності напруги в зовнішній мережі;

- у денний час – часткове підживлення від ФЕМ, що фактично збільшує реальний час резерву.

Таким чином, з'являється додаткове незалежне джерело живлення – комбінація «СЕС + АКБ», яке працює паралельно з міською мережею і може підтримувати живлення критичних навантажень при аваріях.

Умовно можна виділити такі характерні режими:

- Нормальний режим – мережа + СЕС; частина навантаження покривається сонячною генерацією, надлишок споживається іншими споживачами будівлі, АКБ підтримується у стані готовності.

- Аварія в мережі вдень – критичні навантаження живляться від СЕС + АКБ, що дозволяє зберегти працездатність основних систем безпеки.

- Аварія в мережі вночі – критичні навантаження живляться від АКБ протягом розрахункового часу; при цьому некритичні споживачі можуть бути відключені автоматично для збільшення часу резерву.

У порівнянні з базовою схемою, де критичні споживачі залежать лише від мережі та UPS, ймовірність повної втрати живлення критичних навантажень істотно зменшується, а час допустимої автономної роботи збільшується.

За потреби можна оформити невелику таблицю «Порівняння стану надійності до та після впровадження СЕС» – до/після, кількість джерел живлення, орієнтовний час резерву, наявність локальної генерації.

Безперервність електропостачання та роль керування навантаженням

Важливою складовою підвищення надійності є не лише наявність додаткового джерела, а й правильна організація керування навантаженням:

- при роботі від АКБ та СЕС пріоритет надається критичним навантаженням – непотрібні та некритичні споживачі відключаються;

- у системі автоматики інверторів формуються сценарії аварійної роботи, що дозволяє уникнути перевантаження батареї та продовжити час безперервної роботи основних систем;

- добове профілювання навантажень та генерації СЕС дозволяє зменшити пікові навантаження на мережу, що знижує ймовірність аварійних відключень через перевантаження.

У сукупності це дає змогу:

- підвищити функціональну готовність злітно-посадкового майданчика;
- забезпечити більш стійкий режим роботи в умовах зовнішніх збурень (відключення, обмеження потужності в мережі тощо);
- наблизити систему електропостачання ЗПМ до вимог, що висуваються до об'єктів із високою категорією надійності.

## **РОЗДІЛ 4.**

# ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА

## 4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час виконання робіт

Робочими місцями персоналу, що обслуговує сонячну систему електропостачання ЗПМ «Дніпро-1», є інверторна/щитова зона (електротехнічне приміщення), диспетчерська (робоче місце чергового) та ділянки покрівлі КВЦ, де розміщені фотоелектричні модулі і кабельні траси. У цих зонах одночасно діють шкідливі й небезпечні виробничі фактори, що потребує їх системного аналізу.

Внутрішні приміщення характеризуються тепловиділеннями від інверторів, щитового обладнання та акумуляторів, що за недостатньої вентиляції може спричиняти перегрів робочих зон. На покрівлі персонал працює в умовах зовнішнього мікроклімату: влітку — висока температура й інтенсивне сонячне випромінювання, взимку — низькі температури, вітер, опади та ожеледиця, що підвищує ризики перегріву/переохолодження і зниження уваги.

Виробниче освітлення є важливим чинником безпеки. У приміщеннях недостатня або нерівномірна освітленість ускладнює контроль і роботу з маркуванням та клемними з'єднаннями, а засліплення й відблиски збільшують зорове навантаження. На покрівлі сонячні відблиски від поверхні ФЕМ можуть погіршувати огляд і підвищувати ризик помилкових дій або падіння.

До фізичних факторів належать шум і вібрація: у приміщеннях — від вентиляції та систем охолодження інверторів, на покрівлі — додатково від міського середовища та роботи вертольотів. Тривалий шум спричиняє втому й зниження концентрації, а вібрації можуть впливати як на працівника, так і на стан кріплень та з'єднань.

Окремо виділяються ризики робіт на висоті: падіння з покрівлі, ковзання через опади/лід, падіння інструменту чи елементів конструкцій, а також травмування через виступаючі елементи (антени, опори, кабельні лотки), що створюють ризик ударів і спотикання.

Ключовим небезпечним фактором є електробезпека в колах змінного струму (мережа 0,4 кВ, інвертори, щити) та постійного струму від фотоелектричних модулів. Ризики включають прямий/непрямий дотик до струмоведучих частин, пошкодження ізоляції, неправильну комутацію та помилкове вмикання. Важливо, що ФЕМ генерують напругу при освітленні навіть за відсутності мережевої напруги, тому небезпека на стороні DC зберігається протягом світлового дня; можливі КЗ та електрична дуга, що підвищує ризик опіків і пожежі.

До хімічних і пожежонебезпечних факторів належать пошкодження або перегрів акумуляторів, кабелів і контактних з'єднань. В аварійних режимах можливе виділення газів/диму та локальне займання, а перевантаження, невідповідний переріз кабелів і погані контакти можуть спричинити перегрів, іскріння та загоряння матеріалів покрівлі або елементів приміщень, що ускладнює евакуацію і гасіння.

Суттєву роль відіграють психофізіологічні та організаційні фактори: підвищена напруга уваги, робота в умовах обмеженого простору, вплив погодних умов на покрівлі, необхідність одночасного контролю за власною безпекою та якістю операцій. Вдома, стрес, дефіцит часу, недостатнє навчання з питань електробезпеки й охорони праці, відсутність навичок робіт на висоті та нехтування засобами індивідуального захисту (страхувальні системи, каски, діелектричні рукавички, спецодяг, засоби захисту органів зору і слуху) значно підвищують ймовірність помилок та нещасних випадків. Додаткові ризики створює нераціональна організація робочого місця: захаращені проходи, відсутність чітких маршрутів руху, безладне розміщення інструментів та матеріалів.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, актуальні для монтажу та експлуатації сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1», узагальнено у таблиці 4.1.

**Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при монтажі та експлуатації сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»**

<b>Група факторів</b>	<b>Конкретний фактор</b>	<b>Можливі наслідки</b>	<b>Приклади необхідних заходів захисту</b>
Мікроклімат	Підвищена температура в приміщеннях, спека/холод на покрівлі, вітер, опади	Перегрів, переохолодження, зниження уваги, нездужання	Вентиляція, кондиціонування, перерви, спецодяг, обмеження робіт у екстремальних умовах
Виробниче освітлення	Недостатнє освітлення щитів, відблиски, засліплення від світильників або ФЕМ	Помилки при роботі, зорове перенапруження, травми	Нормоване освітлення, протиосліплювальна арматура, раціональне розташування світильників
Шум і вібрація	Шум від вентиляторів, обладнання, вертольотів; локальні вібрації	Втома, дратівливість, зниження концентрації	Шумоізоляція, техобслуговування обладнання, регламентація часу перебування
Роботи на висоті та на покрівлі	Падіння з висоти, падіння предметів, слизькі та нерівні поверхні	Травми, переломи, летальні випадки	Страховальні системи, огороження, знаки безпеки, інструктаж, порядок складського зберігання
Електробезпека (DC та AC)	Дотик до струмоведучих частин, КЗ, електрична дуга, напруга від ФЕМ	Ураження струмом, опіки, пожежа	Відключення і блокування, ЗІЗ з електробезпеки, дотримання інструкцій, використання ізольованого інструменту
Хімічні та пожежні фактори	Пошкодження АКБ, перегрів кабелів, погані контакти, загоряння ізоляції	Виділення шкідливих речовин, пожежа, задимлення	Правильний вибір АКБ і кабелів, захист від КЗ, системи пожежогасіння, інструкції щодо дій при пожежі
Психофізіологічні та організаційні фактори	Втома, стрес, нехтування ЗІЗ, нерозроблені інструкції, безлад на робочому місці	Помилки, травми, підвищення ризику аварій	Навчання, чіткі регламенти, контроль, організація робочих місць, використання ЗІЗ

#### **4.2. Вимоги техніки безпеки при монтажі, обслуговуванні та експлуатації фотоелектричних модулів і електрообладнання**

Під час монтажу, технічного обслуговування та експлуатації сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» необхідно виконувати вимоги охорони праці та техніки безпеки, спрямовані на запобігання ураженню струмом, падінню з висоти, впливу несприятливих метео- і мікрокліматичних факторів, а також пожежним і хімічним ризикам. Вимоги поширюються на роботи на покрівлі (ФЕМ, кабельні траси) і у внутрішніх електротехнічних приміщеннях (інверторна, щитова, приміщення АКБ, диспетчерська).

Роботи на покрівлі. Основні ризики — падіння з висоти та падіння предметів. Перед початком робіт перевіряють огороження/парапети, тимчасові бар'єри та точки анкерування. До робіт допускаються навчені працівники із застосуванням страхувальних систем, касок, нековзного взуття і спецодягу. Переміщення — визначеними маршрутами; матеріали й інструмент не розміщують біля краю. За сильного вітру, ожеледиці, грози чи інтенсивних опадів роботи припиняють.

Електробезпека. Електромонтаж і налагодження виконують працівники з відповідною групою з електробезпеки за нарядом-допуском/розпорядженням. Перед роботами знімають напругу, перевіряють її відсутність і виконують заземлення; у колах DC — від'єднують стрінги від інверторів через роз'єднувачі/автомати в комбінаторних коробках. Враховують, що ФЕМ генерують напругу при освітленні навіть за відключених інверторів; роботи з оголеними з'єднаннями та несанкціоновані зміни схем заборонені. Використовують ізольований інструмент і діелектричні ЗІЗ.

Обладнання 0,4 кВ та доступ. Забезпечують коректний вибір і налаштування захистів (автомати, ПЗВ, запобіжники), справність заземлення та зрівнювання потенціалів. Не допускаються відкриті щити без нагляду, тимчасові підключення поза проєктом і зберігання сторонніх предметів у електротехнічних приміщеннях. Доступ сторонніх обмежують, приміщення замикають, встановлюють попереджувальні знаки.

АКБ. Дотримуються вимог виробника щодо температури, монтажу, захисту від пошкоджень і перезаряду. Приміщення АКБ оснащують вентиляцією; відкритий вогонь та іскроутворюючі роботи заборонені без спеціальних заходів. Персонал має бути навчений діям у разі перегріву/димлення та використанню первинних засобів пожежогасіння.

Пожежна безпека. Застосовують кабелі з негорючою/важкогорючою ізоляцією, забезпечують захист від КЗ і перенапруг, наявність вогнегасників у електротехнічних приміщеннях і на шляхах евакуації. Проходи тримають вільними, плани евакуації та інструкції розміщують на видимих місцях, персонал проходить навчання і тренування.

Організаційні заходи. Проводять вступний і періодичні інструктажі, стажування, допуск після медоглядів і навчання з ОП та електробезпеки; призначають відповідальних за електрогосподарство й роботи на висоті. Ведуть журнали інструктажів/нарядів, контролюють стан ЗІЗ і виконують ТО обладнання за регламентами.

Таблиця 4.2

Основні вимоги техніки безпеки при монтажі, обслуговуванні та експлуатації фотоелектричних модулів і електрообладнання ЗПМ «Дніпро-1»

Напрямок вимог	Зміст вимог
Роботи на висоті	Навчання, страхувальні системи, огороження, заборона робіт при небезпечних погодних умовах
Електробезпека (DC, AC)	Допуск за групою, відключення і перевірка відсутності напруги, ЗІЗ, ізолюваний інструмент, блокування
Робота з ФЕМ	Послідовність відключення стрінгів, урахування генерації при освітленні, заборона робіт на оголених клемах
Робота з інверторами та щитами	Справні апарати захисту, заземлення, обмежений доступ, заборона тимчасових підключень, знаки безпеки
Робота з АКБ	Дотримання інструкцій виробника, вентиляція, захист від пошкоджень, заборона відкритого вогню
Пожежна безпека	Вибір негорючих кабелів і матеріалів, захист від КЗ, наявність вогнегасників, плани евакуації
Організація та навчання	Інструктажі, наряди-допуски, призначення відповідальних, облік і контроль стану ЗІЗ та обладнання

Ці вимоги є основою для подальшої розробки конкретних інструкцій з охорони праці, посадових інструкцій персоналу та локальних нормативних документів, що регламентують безпечне виконання робіт із сонячною системою електропостачання злітно-посадкового майданчика.

### 4.3. Засоби індивідуального та колективного захисту персоналу

Безпечне виконання робіт з монтажу, технічного обслуговування та експлуатації сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» забезпечується застосуванням засобів індивідуального (ЗІЗ) та колективного захисту. Їх вибір визначається характером небезпечних і шкідливих виробничих факторів (підрозділ 4.1) та вимогами безпеки виконання робіт (підрозділ 4.2).

#### Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

ЗІЗ призначені для безпосереднього захисту працівника під час робіт на покрівлі та в електротехнічних приміщеннях. До обов'язкового комплексу належать:

- захисна каска (ризик падіння предметів, удари об конструкції);
- страхувальна система (пояс/прив'язь, карабіни) для робіт на висоті;
- спецодяг і взуття з неслизькою підошвою та захистом від погодних впливів;
- діелектричні рукавички, килимки, ізольований інструмент для робіт в електроустановках;
- захисні окуляри/щиток (пил, частки, відблиски, аварійне іскріння);
- захист органів слуху (за підвищеного шуму: вентиляція, інвертори, авіаційна техніка);
- захист органів дихання (пил, дим, можливі виділення при обслуговуванні АКБ або аваріях).

ЗІЗ мають видаватися персоналу під відповідальність, проходити регулярний огляд, очищення та своєчасну заміну. Працівники повинні бути навчені правильному підбору та застосуванню ЗІЗ, а для страхувальних систем — обов'язково також правилам регулювання і контролю кріплень. Вважаю важливим акцентувати, що «наявність ЗІЗ» не дорівнює «реальній безпеці» — вирішальним є саме дисципліна використання та контроль справності.

#### Засоби колективного захисту

Засоби колективного захисту знижують ризики для групи працівників і включають технічні та організаційні рішення, зокрема:

- огороження, парапети, поручні на покрівлі та біля небезпечних прорізів;

- тимчасові огороження, сигнальні стрічки для зон робіт і маршрутів пересування;
- попереджувальні знаки та маркування (висока напруга, роботи на висоті, обмеження доступу, евакуація);
- вентиляція/кондиціонування в інверторній та приміщенні АКБ (мікроклімат, відведення тепла, можливих газів/диму);
- заземлення та вирівнювання потенціалів (зменшення ризику ураження та крокової напруги);
- захисти від КЗ і перенапруг (автомати, запобіжники, ПЗВ, ОПН) як елемент пожежопротипілактики;
- пожежна сигналізація та первинні засоби пожежогасіння у доступних місцях;
- системи оповіщення (світлова/звукова сигналізація) для оперативного інформування та евакуації.

Окрему роль відіграють організаційні заходи колективного захисту: інструкції з охорони праці, плани евакуації, журнали інструктажів, наряди-допуски на роботи підвищеної небезпеки (висота, електроустановки, АКБ). На практиці саме поєднання технічних засобів і чіткої організації робіт дає найвищий рівень безпеки.

Основні ЗІЗ та засоби колективного захисту, рекомендовані для робіт із сонячною системою електропостачання ЗПМ «Дніпро-1», узагальнено в таблиці 4.3.

**Засоби індивідуального та колективного захисту персоналу при роботах із сонячною системою електропостачання ЗПМ «Дніпро-1»**

Вид засобу	Приклад засобу	Призначення / від яких факторів захищає	Де застосовується
Засоби індивідуального захисту	Захисна каска	Захист голови від ударів і падіння предметів	Покрівля, щитові, інверторна
	Страхувальний пояс, прив'яз, карабіни	Запобігання падінню з висоти	Роботи на покрівлі, біля краю, на драбинах
	Спецодяг і спеціальне взуття	Захист від механічних пошкоджень, опадів, слизьких поверхонь	Покрівля, внутрішні приміщення
	Діелектричні рукавички, килимки, ізолюваний інструмент	Захист від ураження електричним струмом	Роботи в електроустановках, біля інверторів і щитів
	Захисні окуляри (щитки)	Захист очей від пилу, відблисків, можливих іскор	Монтаж/демонтаж, аварійні роботи
	Засоби захисту органів слуху (беруші, навушники)	Захист від підвищеного шуму	Приміщення з обладнанням, зона роботи вертольота
	Респіратор (за необхідності)	Захист органів дихання від диму, газів, пилу	Приміщення з АКБ, аварійні ситуації
Засоби колективного захисту	Огородження, парапети, поручні	Запобігання падінню з висоти	По периметру покрівлі, біля небезпечних зон
	Сигнальні огороження, знаки безпеки	Попередження про небезпеку, обмеження доступу	Зона робіт, щитові, інверторна
	Вентиляція та кондиціонування	Нормалізація мікроклімату, відведення тепла й газів	Інверторна, приміщення з АКБ
	Заземлювальні пристрої та вирівнювання потенціалів	Зменшення небезпеки ураження струмом, відведення перенапруг	Усі електроустановки, металоконструкції
	Аварійні вимикачі, апарати захисту, ПЗВ	Автоматичне відключення при КЗ та витоках струму	Щити, інверторна, вводи СЕС
	Пожежна сигналізація, вогнегасники	Виявлення пожежі, локальне гасіння загорянь	Електротехнічні приміщення, шляхи евакуації
	Система оповіщення та евакуаційні виходи	Попередження персоналу про небезпеку, організація евакуації	Уся будівля, у т.ч. зони доступу до покрівлі

Комплексне застосування засобів індивідуального та колективного захисту, поєднане з належною організацією робіт та навчанням персоналу, є ключовою умовою забезпечення безпечної експлуатації сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1».

#### 4.4. Організаційні заходи з охорони праці та інструктажі для персоналу

Організаційні заходи з охорони праці під час монтажу, обслуговування та експлуатації сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» спрямовані на запобігання травматизму, аваріям і профзахворюванням шляхом належної організації управління ОП, розподілу відповідальності, навчання персоналу та системного контролю.

На рівні підприємства призначають відповідальних за охорону праці та безпечну експлуатацію електроустановок. До їх функцій належать організація робіт з ОП, розробка/перегляд інструкцій, контроль виконання вимог безпеки, організація навчання та інструктажів, технічних оглядів і ТО обладнання, а також участь у розслідуванні інцидентів і впровадженні коригувальних заходів.

Персонал (електромонтери, інженери, монтажники, чергові) проходить попередні та періодичні медогляди з підтвердженням придатності до робіт на висоті та в електроустановках до 1000 В. Допуск до робіт підвищеної небезпеки здійснюють за наявності посвідчень і перевірки знань з ОП та електробезпеки, після стажування і закріплення за досвідченим працівником.

Система інструктажів включає: вступний (загальні вимоги), первинний на робочому місці (конкретні ризики покрівлі, щитових/інверторних, ФЕМ, інверторів, АКБ), повторний (зазвичай не рідше 1 разу на 6 місяців), позаплановий (при змінах технологій/обладнання або після порушень та інцидентів) і цільовий (перед разовими небезпечними роботами). Усі інструктажі реєструють у журналах установленної форми.

Роботи підвищеної небезпеки виконують за нарядами-допусками із визначенням меж робочого місця, складу бригади, заходів безпеки, порядку підготовки, контролю та закриття робіт.

Додатково розробляють і доводять до персоналу інструкції дій при аваріях (пожежа, пошкодження кабелів/АКБ, загроза ураження струмом), забезпечують наявність планів евакуації, схем електропостачання та розміщення засобів пожежогасіння. Регулярні тренування (протипожежні, аварійне відключення, евакуація) закріплюють практичні навички безпечної роботи.

У сукупності організаційні заходи, разом із технічними засобами захисту, забезпечують необхідний рівень безпеки та стабільну експлуатацію сонячної системи на об'єкті.

## РОЗДІЛ 5.

# ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОГО МАЙДАНЧИКА

### 5.1. Аналіз впливу традиційних систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків на довкілля

Традиційні системи електропостачання злітно-посадкових майданчиків, як правило, базуються на централізованому живленні від зовнішніх електричних мереж (районних або міських), а також на використанні резервних дизель-генераторних установок для забезпечення надійності живлення критичних споживачів. Незважаючи на високий рівень технічної надійності таких систем, їх функціонування супроводжується низкою негативних впливів на навколишнє природне середовище як на глобальному, так і на локальному рівні.

Основна частина електроенергії, що споживається злітно-посадковим майданчиком, надходить із централізованої енергосистеми, де значна частка генерації традиційно пов'язана зі спалюванням викопного палива. Це опосередковано формує викиди парникових газів (передусім CO<sub>2</sub>) та супутніх забруднювачів повітря (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, тверді частинки тощо). Навіть за відсутності локального джерела викидів на території об'єкта, його електроспоживання створює попит на виробництво електроенергії з відповідним «вуглецевим слідом».

Додаткові екологічні наслідки пов'язані з функціонуванням теплової генерації, зокрема утворенням золошлакових відходів та потребою у спеціальному поводженні з побічними продуктами виробництва електроенергії. Таким чином, кожна кВт·год, спожита у межах традиційної схеми електропостачання, супроводжується певним рівнем навантаження на екосистеми (глобально та регіонально).

Окремий фактор — застосування резервних дизель-генераторних установок (ДГУ) для критичних споживачів. Під час роботи ДГУ формують локальні викиди ( $\text{NO}_x$ , CO, незгорілі вуглеводні, сажа), а також шум і вібрації, що негативно впливає на прилегле середовище і персонал. Додатково виникають ризики екологічних інцидентів, пов'язаних із зберіганням палива, заміною мастильних матеріалів і фільтрів (ймовірність проливів та забруднення ґрунту/вод).

Традиційна система електропостачання також має ресурсно-матеріальний вплив, оскільки потребує кабельних ліній, підстанцій, РП і комутаційної апаратури. Виробництво, ремонт і заміна цього обладнання пов'язані з використанням металів та полімерів, енергоспоживанням і формуванням потоку електротехнічних відходів, які потребують належної утилізації.

На локальному рівні високі навантаження систем освітлення й інженерного обладнання (вентиляція, кондиціонування тощо) можуть посилювати теплові виділення та формувати передумови до локального «теплого острова», особливо в умовах міської забудови. Крім того, нераціональне зовнішнє освітлення здатне спричинити світлове забруднення (надмірне підсвічування території та неба).

Узагальнено традиційні системи електропостачання ЗПМ:

- опосередковано збільшують викиди парникових газів і забруднювачів через споживання електроенергії традиційної генерації;
- створюють локальні навантаження через роботу ДГУ (викиди, шум, ризики проливів);
- формують ресурсне навантаження та відходи через виробництво/обслуговування електроінфраструктури;
- можуть посилювати світлове та теплове забруднення за низької енергоефективності обладнання.

На мою думку, саме сукупність цих факторів є достатнім обґрунтуванням для переходу до більш екологічно орієнтованих рішень — насамперед локальної сонячної генерації у поєднанні з енергозберігаючими заходами.

## 5.2. Екологічні переваги застосування сонячних систем електропостачання

Впровадження сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» має низку екологічних переваг порівняно з традиційним електропостачанням (мережа + резервні ДГУ). Ключовий ефект полягає в тому, що фотоелектрична генерація під час експлуатації не потребує спалювання палива і практично не створює прямих викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> та твердих частинок. Відповідно, кожна кВт·год, вироблена СЕС замість спожитої з мережі, зменшує умовні викиди та «вуглецевий слід» об'єкта.

З урахуванням запропонованої встановленої потужності (орієнтовно 75 кВт) частина електроспоживання майданчика може бути заміщена електроенергією, виробленою безпосередньо на об'єкті. Це зменшує потребу в електроенергії з централізованої мережі та, в довгостроковому аспекті, підтримує цілі енергоефективності й декарбонізації.

Важливою перевагою є зменшення часу роботи дизель-генераторів у резервних і пікових режимах, особливо за наявності акумуляторного резерву. Це забезпечує скорочення локальних викидів, зниження шумового навантаження та зменшення ризиків, пов'язаних із зберіганням і використанням пального та мастильних матеріалів.

Сонячні системи мають також менше ресурсне навантаження в експлуатаційній фазі: вони не вимагають регулярного підвезення палива, не утворюють золошлакових відходів і, як правило, мають тривалий строк служби (порядку 20+ років). Основні екологічні впливи зміщуються на етапи виробництва та утилізації обладнання, які можуть бути мінімізовані за рахунок належної організації переробки та повторного використання матеріалів.

Для умов міської забудови суттєвою перевагою є раціональне використання простору: розміщення модулів на покрівлі (зокрема на будівлі КВЦ «Парковий») не потребує додаткових земельних ділянок, що зменшує ризики порушення ґрунтового покриву та трансформації ландшафту.

У поєднанні з енергозберігаючими заходами (модернізація освітлення, оптимізація режимів інженерних систем, зменшення втрат у мережі) СЕС сприяє зниженню світлового та теплового забруднення. Перехід на LED-освітлення та керування режимами дозволяє скоротити надлишкове підсвічування й небажане світлорозсіювання.

Окремо слід відзначити іміджевий та соціально-екологічний ефект: використання ВДЕ на інфраструктурному об'єкті демонструє орієнтацію на сталий розвиток і підвищує екологічну відповідальність експлуатації.

Узагальнюючи, екологічні переваги застосування сонячних систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків, зокрема ЗПМ «Дніпро-1», можна сформулювати так:

- зменшення умовних викидів парникових газів і шкідливих забруднювачів повітря;
- скорочення використання дизельного палива та роботи резервних генераторів;
- зниження шумового, теплового та світлового навантаження на навколишнє середовище;
- раціональне використання наявної інфраструктури та відсутність додаткового впливу на земельні ресурси;
- зменшення ресурсного навантаження і утворення відходів у порівнянні з традиційними джерелами енергії;
- підвищення екологічної привабливості й відповідності сучасним тенденціям сталого розвитку.



Рис. 5.1. Інфографіка зміни основних екологічних показників системи електропостачання злітно-посадкового майданчика до і після впровадження сонячної системи

На рисунку 5.1 узагальнено показано екологічні показники системи електропостачання ЗПМ до та після впровадження СЕС: зменшується частка споживання з мережі, зростає частка ВДЕ та скорочуються умовні викиди CO<sub>2</sub>. Це підтверджує доцільність СЕС як елемента екологізації ЗПМ «Дніпро-1» і обґрунтовує необхідність заходів мінімізації впливів на довкілля на етапах монтажу, експлуатації та виведення з експлуатації.

### **5.3. Заходи мінімізації впливу на довкілля при монтажі та експлуатації СЕС і АКБ**

1. Особливістю систем електропостачання злітно-посадкових майданчиків є те, що енергозбереження має оцінюватися у взаємозв'язку з надійністю, резервуванням і якістю електроенергії. Тому ефективність запропонованих заходів доцільно визначати за комплексом взаємодоповнювальних критеріїв:

2. енергетичних (економія електроенергії, зниження втрат, підвищення ККД та  $\cos \varphi$ );

3. економічних (зменшення витрат, строк окупності інвестицій);

4. експлуатаційних (надійність, ремонтпридатність, гнучкість режимів роботи);

5. екологічних (скорочення викидів та зменшення споживання викопного палива).

6. У межах даної роботи енергозбереження розглядається не лише як зниження відбору електроенергії з мережі, а як формування оптимальної структури електропостачання, у якій сонячна генерація, системи накопичення та традиційні джерела живлення працюють узгоджено, забезпечуючи необхідний рівень безпеки й надійності за максимального енергозберігального ефекту.

7. Зниження шуму й відблисків. Враховувати відбивні властивості панелей/кріплень, а шумне обладнання (вентилятори, вентиляція) — розміщувати з урахуванням норм, за потреби застосовувати шумо- та віброзахист.

На етапі виведення з експлуатації сонячної системи особливого значення набувають питання утилізації та переробки елементів. Фотоелектричні модулі, металоконструкції, кабелі та інше обладнання повинні спрямовуватися на спеціалізовані підприємства, які займаються переробкою електронних і електротехнічних відходів, з можливим виділенням скла, металів, кремнію та інших компонентів для повторного використання. Запобігання їхньому потраплянню на звичайні полігони твердих побутових відходів є важливою умовою зменшення довгострокового негативного впливу на довкілля.

Таким чином, система заходів щодо мінімізації впливу на навколишнє природне середовище при монтажі та експлуатації сонячних панелей і акумуляторних батарей для злітно-посадкового майданчика «Дніпро-1» включає:

- екологічно безпечну організацію будівельно-монтажних робіт та поводження з відходами;
- захист покрівлі та будівельних конструкцій від протікань і руйнування;
- безпечну експлуатацію акумуляторних батарей та їхню правильну утилізацію;
- запобігання пожежам, витокам небезпечних речовин, локальним забрудненням;
- раціональну організацію очищення й обслуговування фотоелектричних модулів;
- зниження візуального, шумового та ресурсного навантаження на довкілля;
- екологічно відповідальне виведення системи з експлуатації з урахуванням можливості переробки та повторного використання матеріалів.

Реалізація цих заходів забезпечує не лише відповідність проєкту екологічним вимогам, але й підвищує загальну стійкість та привабливість злітно-посадкового майданчика як сучасного інфраструктурного об'єкта, орієнтованого на принципи сталого розвитку.

#### **5.4. Утилізація та переробка відпрацьованих фотоелектричних модулів та акумуляторних батарей**

Впровадження сонячної системи електропостачання ЗПМ «Дніпро-1» передбачає тривалий строк служби обладнання (ФЕМ — понад 15–20 років, АКБ — орієнтовно 8–12 років), після чого виникає потреба в екологічно безпечному збиранні, зберіганні, транспортуванні та переробці/утилізації. Некоректне поводження з відпрацьованими елементами може призвести до забруднення ґрунтів і вод, а також втрати цінних матеріалів.

Фотоелектричні модулі належать до електронного та електротехнічного обладнання і містять скло, алюміній, провідники та полімерні шари. Захоронення таких модулів на звичайних полігонах є недоцільним, оскільки створює довгострокові екологічні ризики та призводить до втрати вторинної сировини. Тому відпрацьовані ФЕМ доцільно передавати спеціалізованим підприємствам для розбирання і переробки з вилученням скла та металів і поверненням значної частки матеріалів у виробничий цикл.

Підвищені вимоги висуваються до акумуляторних батарей, зокрема літій-іонних, які містять метали та електроліт і можуть бути джерелом небезпеки при пошкодженні, перегріві або неконтрольованому зберіганні. Відпрацьовані АКБ необхідно тимчасово зберігати у сухому провітрюваному приміщенні з твердим хімічно стійким покриттям, захищати від механічних впливів, нагрівання та відкритого вогню, а також забезпечити наявність попереджувальних знаків і первинних засобів пожежогасіння. Подальшу утилізацію/переробку слід виконувати лише через ліцензовані організації, здатні вилучати корисні компоненти та мінімізувати обсяг небезпечних відходів.

Організаційно необхідно передбачити договори зі спеціалізованими компаніями, облік кількості переданих ФЕМ і АКБ та документальний супровід (акти списання, приймання-передачі, журнали обліку відходів, підтвердження переробки). Персонал має бути проінструктований щодо ризиків і порядку дій при збиранні, тимчасовому зберіганні та передачі відпрацьованого обладнання.

Отже, належно організована система переробки й утилізації ФЕМ та АКБ є обов'язковою складовою екологічно відповідальної експлуатації СЕС ЗПМ «Дніпро-1», забезпечує мінімізацію впливів на довкілля та підтримує раціональне використання ресурсів.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на тему «Енергозбереження сонячної системи електропостачання злітно-посадкового майданчика» розглянуто теоретичні, технічні, економічні, екологічні та організаційні аспекти підвищення енергоефективності й надійності електропостачання злітно-посадкових майданчиків. Як практичний приклад досліджено ЗПМ «Дніпро-1», розташований на покрівлі КВЦ «Парковий» у м. Києві.

Показано, що електропостачання ЗПМ є критичним для безпеки польотів, оскільки забезпечує роботу світлосигнального обладнання, зв'язку, метеосистем, відеоспостереження та інших відповідальних споживачів. Узагальнено структуру систем електропостачання аеродромних об'єктів, розглянуто принципи побудови фотоелектричних систем, їх склад та режими роботи у складі гібридних схем.

На основі аналізу існуючої системи «Дніпро-1», структури електроприймачів і графіків навантаження обґрунтовано доцільність впровадження сонячної гібридної системи. Запропоновано технічні рішення щодо інтеграції СЕС у мережу 0,4 кВ із виділенням щита критичних навантажень. Для об'єкта визначено орієнтовні параметри: встановлена потужність ФЕМ близько 75 кВт та ємність АКБ близько 60 кВт·год для резервування критичних навантажень (~20 кВт) протягом не менше 2 годин.

Техніко-економічні розрахунки показали, що за річної генерації близько 77 тис. кВт·год економія витрат на електроенергію становить орієнтовно 385 тис. грн/рік, а з урахуванням експлуатаційних витрат — близько 340 тис. грн/рік; простий строк окупності — близько 8,8 року. Оцінено, що впровадження СЕС+АКБ підвищує рівень резервування та зменшує ризик повної втрати живлення критичних споживачів. Додатково сформовано комплекс енергозберігаючих заходів: модернізація освітлення (LED і автоматика), оптимізація роботи інженерних систем, зниження втрат у мережі 0,4 кВ, удосконалення обліку й моніторингу та керування навантаженнями.

У розділі з охорони праці проаналізовано основні небезпеки (роботи на висоті, електронебезпека, пожежні ризики, мікроклімат, освітлення, шум/вібрація) та визначено вимоги безпеки, ЗІЗ/ЗКЗ і організаційні заходи (інструктажі, наряди-допуски). В екологічній частині підтверджено переваги СЕС порівняно з традиційним живленням і ДГУ, а також наведено заходи мінімізації впливу під час монтажу/експлуатації та рекомендації щодо утилізації і переробки ФЕМ та АКБ через спеціалізовані організації.

Загалом результати роботи підтверджують технічну обґрунтованість та економічну й екологічну доцільність впровадження сонячної гібридної системи електропостачання для ЗПМ, а запропоновані підходи можуть бути застосовані для інших подібних об'єктів.

## СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua (555-15). (дата звернення: 30.11.2025).
2. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua (2019-19). (дата звернення: 13.11.2025).
3. Про енергозбереження : Закон України від 01.07.1994 № 74/94-ВР // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua (74/94-ВР). (дата звернення: 10.11.2025).
4. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua (2694-12). (дата звернення: 03.12.2025).
5. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua (1264-12). (дата звернення: 18.11.2025).
6. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – 6-е вид., перероб. і допов. – Харків : Індустрія, 2017. – 800 с. – Режим доступу: PDF: ПУЕ (6-е вид.). (дата звернення: 17.11.2025).
7. Правила улаштування електроустановок : офіційний сайт Міністерства енергетики України. – Режим доступу: mev.gov.ua: ПУЕ. (дата звернення: 17.11.2025).
8. Нормативно-правова база, що регулює функціонування ринку електричної енергії : офіційний сайт НКРЕКП. – Режим доступу: nerc.gov.ua: нормативна база. (дата звернення: 14.11.2025).
9. Інструкція з електропостачання аеродромів цивільної авіації : наказ Міністерства інфраструктури України (реквізити згідно чинної редакції). – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua: пошук документа. (дата звернення: 03.12.2025).

10. Як скоротити енергоспоживання в будівлях державних органів : посібник енергоменеджера. – К. : Держенергоефективності, 2019. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: saee.gov.ua: посібник (PDF). (дата звернення: 13.11.2025).

11. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту на рівні громади : практичний посібник. – К., 2021. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: ukriee.org.ua: EnMS guide (PDF). (дата звернення: 02.12.2025).

12. Дзяди́кевич Ю.В. Енергетичний менеджмент : навч. посіб. / Ю.В. Дзяди́кевич, М.В. Буряк, Р.І. Розум. – Тернопіль : Економічна думка, 2010. – 295 с. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: dspace.wupn.edu.ua: посібник (PDF). (дата звернення: 30.11.2025).

13. Самойленко І.О. Основи енергетичного менеджменту : навч. посіб. / І.О. Самойленко, О.Г. Гриб, А.О. Запорожець. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: vntu.edu.ua: посібник (PDF). (дата звернення: 30.11.2025).

14. Дудюк Д.Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч. посіб. / Д.Л. Дудюк, С.С. Мазепа, Я.М. Гнатишин. – Львів : Магнолія 2006, 2015. – 188 с. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: socrates.vsau.org: PDF. (дата звернення: 09.12.2025).

15. Колонтаєвський Ю.П. Фотоенергетика : навч. посіб. / Ю.П. Колонтаєвський. – Харків : ХНУМГ, 2019. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: eprints.kname.edu.ua: PDF. (дата звернення: 14.11.2025).

16. Сонячна енергетика : програма навчальної дисципліни та методичні матеріали. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2023. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: lnu.edu.ua: Soniachna-Enerhetyka (PDF). (дата звернення: 29.11.2025).

17. Посібник з сонячних фотоелектричних технологій. – К. : Фонд розвитку підприємництва, 2022. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: bdf.gov.ua: Solar PV manual (PDF). (дата звернення: 08.12.2025).

18. Вамболь С.О. Енергоефективність фотоелектричних перетворювачів для забезпечення екологічно чистої енергетики : монографія / С.О. Вамболь, Я.О. Сучикова, Н.В. Дейнеко. – Бердянськ : Ткачук О.В., 2016. – 256 с. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: ResearchGate: публікація. (дата звернення: 11.11.2025).

19. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / J.A. Duffie, W.A. Beckman, N. Blair. – 5th ed. – Hoboken : Wiley, 2020. – 888 p. – Режим доступу: Wiley Online Library: книга. (дата звернення: 10.11.2025).

20. Чичуліна К.В. Виклики енергоефективності : навч. посіб. / К.В. Чичуліна. – Тернопіль : ТНЕУ, 2020. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: reposit.nupr.edu.ua: PDF. (дата звернення: 12.12.2025).

21. Очеретний В.П. Енергозбереження в будівництві на основі використання сонячних фотоелектричних модулів / В.П. Очеретний // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2018. – № 1. – С. 83–90. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: stmkvb.vntu.edu.ua: завантажити. (дата звернення: 09.12.2025).

22. Яровий І.П. Дослідження режимів роботи сонячної енергосистеми з режимом енергозбереження : магістерська дисертація / І.П. Яровий. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2021. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: ela.kpi.ua: Yarovyі (PDF). (дата звернення: 26.11.2025).

23. Норець О.О. Дослідження фотоелектричних систем електропостачання об'єктів : магістерська дисертація / О.О. Норець. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2018. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: ela.kpi.ua: Norets (PDF). (дата звернення: 29.11.2025).

24. Фарина О.Р. Проєкт автономної фотоелектричної системи електропостачання об'єкта : кваліфікаційна робота / О.Р. Фарина. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: elartu.tntu.edu.ua: PDF. (дата звернення: 10.11.2025).

25. Діденко Р.І. Аналіз системи електропостачання підприємства та заходи з енергозбереження : магістерська робота / Р.І. Діденко. – Запоріжжя : ЗНУ, 2021. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: dspace.znu.edu.ua: PDF. (дата звернення: 11.11.2025).

26. Дубровська В.В. Розрахунок системи електрозабезпечення об'єкта : навч. посіб. / В.В. Дубровська. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2015. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: ela.kpi.ua: FER-RR (PDF). (дата звернення: 13.11.2025).

27. Кириченко В.В. Перспективні технології сонячних панелей та їх вплив на ефективність фотоелектричних систем : кваліфікаційна робота / В.В. Кириченко. – Полтава : НУПП, 2025. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [reposit.nupp.edu.ua: Kurychenko \(PDF\)](https://reposit.nupp.edu.ua/kurychenko). (дата звернення: 30.11.2025).

28. Воробець С.Б. Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні : магістерська робота / С.Б. Воробець. – Тернопіль : ЗУНУ, 2024. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [dspace.wunu.edu.ua: PDF](https://dspace.wunu.edu.ua/). (дата звернення: 28.11.2025).

29. Szkirka L.P. Складання проєкту геоінформаційного та картографічного забезпечення для аналізу сонячних енергетичних систем : кваліфікаційна робота / L.P. Szkirka. – Чернівці : ЧНУ, 2023. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [archer.chnu.edu.ua: Szkirka \(PDF\)](https://archer.chnu.edu.ua/). (дата звернення: 14.11.2025).

30. Юрченко Л.І. Екологія : навч. посіб. для студентів ВНЗ / Л.І. Юрченко. – К. : Центр учбової літератури, 2017. – 304 с. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [old.bdpu.org.ua: PDF](https://old.bdpu.org.ua/). (дата звернення: 07.12.2025).

31. Васюкова Г.Т. Екологія : підручник для студентів ВНЗ / Г.Т. Васюкова, О.І. Ярошева. – К. : Кондор, 2016. – 524 с.

32. Законодавство України про охорону праці : збірник нормативних актів / Держпраці України. – К., 2024. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [education.profiteh.kiev.ua: сторінка](https://education.profiteh.kiev.ua/). (дата звернення: 04.12.2025).

33. Законодавство України про охорону праці : лекційні матеріали / Луганський національний університет. – 2025. – Електрон. ресурс. – Режим доступу: [luguniv.edu.ua: suor\\_lect1 \(PDF\)](https://luguniv.edu.ua/). (дата звернення: 03.12.2025).