

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

«Оптимізація системи резервного електропостачання
електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії»

Виконав: студент VII курсу
групи Ен – 61 спеціальності
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

÷

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____ **Било В.В.**
(підпис) (прізвище та

ініціали)

Керівник: _____ **Марущак Я.Ю.**
(підпис) (прізвище та

ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

к.т.н., доцент

Левонюк В. Р.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

_____ Било Володимир Романович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оптимізація системи резервного електропостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії»

керівник роботи д.т.н., професор Марущак Я.Ю.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 140 / к - с від 28.02.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані
технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ МАЙСТЕРНІ

3 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	Гошко М.О., старший викладач			
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>1 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ</u>	28.02.2025 – 1.05.2025	
2	<u>2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ МАЙСТЕРНІ</u>	2.05.2025 – 1.08.2025	
3	<u>3 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ</u>	2.08.2025 – 1.10.2025	
4	<u>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</u>	2.10.2025 – 1.11.2025	
5	<u>5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА</u>	2.11.2025 – 1.12.2025	
6	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації	2.12.2025 – 6.12.2025	
7	Завершення роботи в цілому	7.12.2025 – 11.12.2025	

Студент

Било В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Марущак Я.Ю.

УДК 631.01

Било Володимир Романович. Оптимізація системи резервного електропостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії 2025. Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО, 2025 р. 60 с. текстової частини, 14 таблиця, 12 рисунків, 12 джерел.

У кваліфікаційній роботі представлено результати оптимізації системи резервного електропостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії. Представлено теоретичні аспекти розрахунку мережі електропостачання з використанням сонячної енергії. Представлено теоретичні аспекти розрахунку силової мережі електропостачання. Розраховано основні параметри силової мережі електропостачання майстерні. Розраховано основні параметри резервного електропостачання на базі сонячних батарей. Розраховано основні параметри вентиляційної установки. Здійснено економічний аналіз.

МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ,
ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Вступ

Сучасний розвиток електроенергетики України відбувається в умовах глибоких трансформацій та викликів, зумовлених як технологічними змінами, так і воєнними діями на території держави. Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України, що розпочалася у 2022 році, призвела до масштабних руйнувань енергетичної інфраструктури — теплових, гідро- та електростанцій, підстанцій, ліній електропередач. Цілеспрямовані ракетні та дроніві атаки на енергосистему спричиняють дефіцит електроенергії, аварійні та планові відключення, що негативно впливають на функціонування промислових підприємств, об'єктів критичної інфраструктури, навчальних закладів і виробничих майстерень.

В умовах регулярних перебоїв з енергопостачанням особливого значення набувають питання забезпечення енергонезалежності та резервного живлення об'єктів, від яких залежить безперервність освітнього процесу, наукових досліджень та виробничих експериментів. Електротехнічні майстерні — це об'єкти, де здійснюється виготовлення, налагодження та тестування електронних і електромеханічних систем, тому стабільне електропостачання є ключовою умовою їхньої ефективної роботи. Навіть короткочасна втрата живлення може призвести до пошкодження обладнання, втрати даних або переривання важливих технологічних процесів.

Зважаючи на ці обставини, особливої актуальності набуває оптимізація систем резервного електропостачання, яка дозволяє забезпечити безперебійну роботу електротехнічних майстерень навіть у випадках відключень основної мережі. Одним із найперспективніших напрямів розвитку таких систем є використання відновлюваних джерел енергії, насамперед сонячної енергії. Сонячні електростанції (СЕС) дозволяють отримувати екологічно чисту електроенергію, зменшувати залежність від централізованого енергопостачання та підвищувати енергетичну стійкість локальних об'єктів.

Використання сонячних панелей у системах резервного живлення має низку переваг:

- автономність роботи в умовах аварійних відключень;
- можливість накопичення енергії у батарейних системах для подальшого використання;
- зниження витрат на електроенергію у довгостроковій перспективі;
- екологічність та відповідність принципам сталого розвитку.

Водночас, для досягнення максимальної ефективності таких систем необхідно здійснювати оптимізацію їхньої структури та параметрів — зокрема вибір оптимальної кількості сонячних модулів, ємності акумуляторів, типу інверторів, схеми підключення та алгоритму керування енергоспоживанням. Це дозволить не лише забезпечити надійне живлення електротехнічної майстерні, але й мінімізувати вартість системи при збереженні її функціональних характеристик.

Таким чином, тема магістерської роботи «Оптимізація системи резервного електропостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії» є надзвичайно актуальною як у науковому, так і в практичному контексті. Вона спрямована на пошук ефективних технічних рішень, що сприятимуть підвищенню енергетичної безпеки, надійності та автономності роботи об'єктів у сучасних умовах нестабільності енергосистеми України.

Метою роботи є розроблення та оптимізація структури системи резервного електропостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячних модулів і накопичувачів енергії, здатної забезпечити стабільну роботу основного обладнання в умовах перебоїв з електроенергією.

Завданнями дослідження є:

Аналіз існуючих схем резервного електропостачання та відновлюваних джерел енергії.

Розрахунок енергоспоживання електротехнічної майстерні.

Вибір оптимальної конфігурації системи сонячного резервного живлення.

Розроблення математичної моделі для оцінки ефективності системи.

Проведення техніко-економічного аналізу запропонованого рішення.

1. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1 Типи та характеристики сучасних сонячних батарей

Сонячна енергія є одним із найперспективніших відновлюваних джерел енергії, яке може забезпечити стабільне, екологічно чисте та відносно дешеве електропостачання. Вона базується на використанні фотогальванічного ефекту, при якому світлова енергія перетворюється в електричну за допомогою сонячних елементів (фотоелементів). Сукупність фотоелементів, з'єднаних у єдину панель, утворює сонячну батарею.

На сучасному ринку існує широкий спектр типів сонячних батарей, що різняться за матеріалом, технологією виробництва, ефективністю, терміном служби та вартістю. Нижче наведено основні типи сучасних сонячних модулів, які найчастіше використовуються у системах резервного електропостачання.

1. Монокристалічні сонячні батареї (Monocrystalline Silicon, Mono-Si)

Монокристалічні сонячні батареї виготовляються з цілісного кристалу кремнію, який вирощується методом Чохральського. Така структура забезпечує високу однорідність матеріалу, що дозволяє досягти найвищого рівня ефективності серед усіх типів кремнієвих модулів.

Основні характеристики:

- ККД: 18–24%;
- Робоча напруга одного елемента: близько 0,6 В;
- Термін служби: 25–30 років;
- Температурний коефіцієнт потужності: $-0,3 \dots -0,4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$;
- Висока ефективність при прямому сонячному випромінюванні.

Переваги:

- Найвищий коефіцієнт корисної дії серед усіх типів;
- Довговічність і стабільність роботи;
- Компактність (менша площа для тієї ж потужності).

Недоліки:

- Висока вартість виробництва;
- Чутливість до затінення — навіть часткове затемнення знижує потужність усього модуля.



Рисунок 1. 1 - Монокристалічна сонячна панель з чорними елементами та срібними контактними доріжками.

2. Полікристалічні сонячні батареї (Polycrystalline Silicon, Poly-Si)

Полікристалічні батареї виготовляються із злитків кремнію, що складаються з багатьох дрібних кристалів. Ця технологія є простішою і дешевшою у виробництві, хоча й поступається за ефективністю монокристалічним аналогам.

Основні характеристики:

- ККД: 15–18%;
- Термін служби: 20–25 років;
- Менша чутливість до перегріву;
- Оптимальна робота при розсіяному світлі.

Переваги:

- Нижча ціна у порівнянні з монокристалічними;
- Достатньо стабільна робота у різних кліматичних умовах;
- Простота технології виготовлення.

Недоліки:

- Менша ефективність;

- Більша площа для досягнення тієї ж потужності;
- Слабша робота при високих температурах.



Рисунок 1.2 - Полікристалічна сонячна панель з характерним “синім кристалічним блиском”.

3. Тонкоплівкові сонячні батареї (Thin-Film Solar Cells)

Тонкоплівкові батареї виготовляються шляхом нанесення тонкого шару фотоактивного матеріалу на скло, метал або полімерну основу. До цієї групи належать такі підтипи:

- аморфний кремній (a-Si);
- телурид кадмію (CdTe);
- мідно-індієво-галієвий диселенід (CIGS).

Основні характеристики:

- ККД: 8–14%;
- Низький температурний коефіцієнт;
- Гнучкість (у деяких типах);
- Мала маса, зручність монтажу.

Переваги:

- Можливість встановлення на криволінійні поверхні;
- Хороша робота при розсіяному освітленні;
- Найнижча собівартість серед усіх типів панелей.

Недоліки:

- Нижчий ККД;
- Менший термін служби (15–20 років);
- Займають більше місця.



Рисунок 1.3 - Гнучкі або тонкі сонячні панелі, встановлені на даху або поверхні транспорту.

4. Перспективні типи сонячних батарей

Окрім традиційних кремнієвих і тонкоплівкових елементів, сучасна наука активно розвиває нові технології сонячних батарей, які мають потенціал значно підвищити ефективність і знизити собівартість виробництва.

До таких типів належать:

- Пероскітні батареї (Perovskite Solar Cells) — новий тип фотоелементів, що демонструє ККД понад 25%, але поки що має проблеми зі стабільністю.
- Органічні фотоелементи (Organic PV) — надлегкі, гнучкі, але з відносно низьким ККД (до 12%) і коротким терміном служби.
- Гібридні батареї — поєднання кремнієвих та пероскітних шарів, які можуть забезпечити ККД понад 30%.

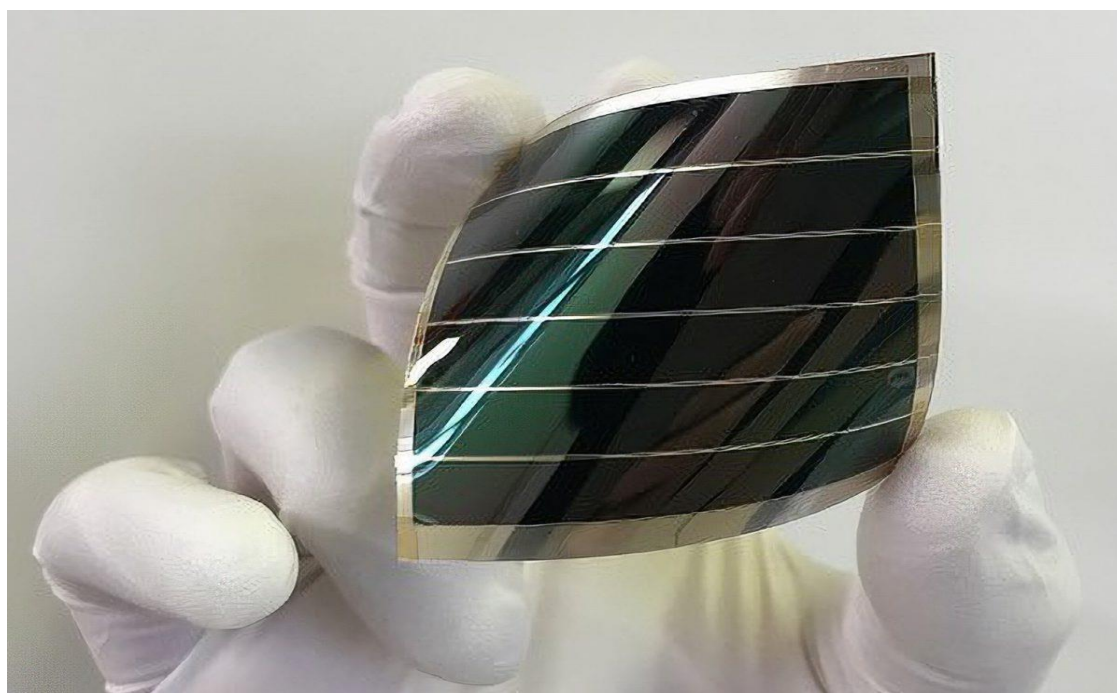
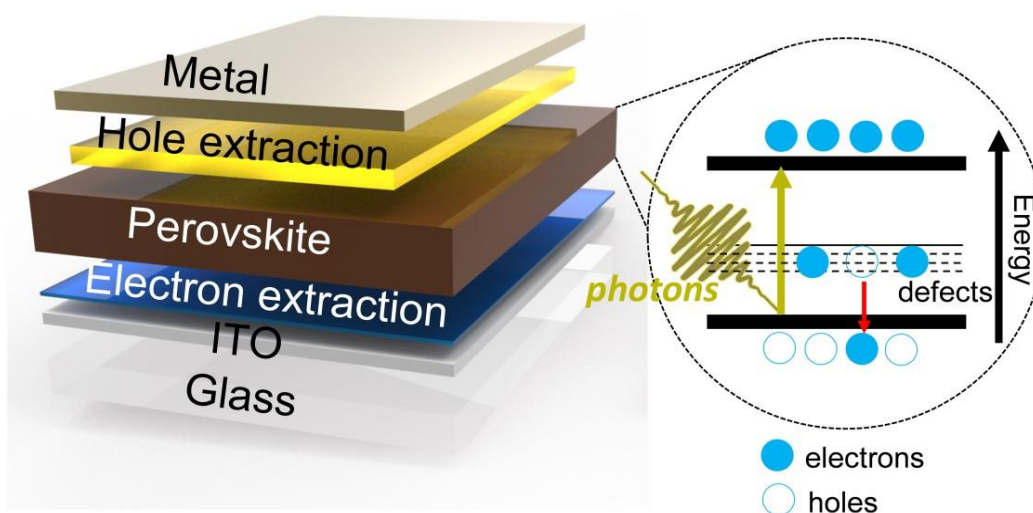


Рисунок 1.4 - Лабораторні зразки пероскітних сонячних елементів або гнучкі органічні панелі.

Таблиця 1.1 - Порівняльна таблиця основних типів сонячних батарей

Тип батареї	ККД, %	Термін служби, років	Температурна стабільність	Вартість	Особливості
Монокристалічна	18–24	25–30	Висока	Висока	Висока ефективність, компактність
Полікристалічна	15–18	20–25	Середня	Середня	Оптимальне співвідношення “ціна–якість”
Тонкоплівкова	8–14	15–20	Висока	Низька	Гнучкість, мала маса
Пероскітна	20–28	5–10	Середня	Низька (прототипи)	Високий потенціал, нестабільність
Органічна	8–12	5–10	Середня	Низька	Гнучкість, легкість, нестійкість

Сучасний ринок сонячних батарей пропонує широкий спектр рішень, придатних як для промислових, так і для індивідуальних систем електропостачання.

Для резервної системи електропостачання електротехнічної майстерні оптимальним вибором є монокристалічні або полікристалічні батареї, які поєднують високу ефективність, довговічність і надійність.

Тонкоплівкові чи пероскітні модулі можуть застосовуватися в допоміжних або мобільних системах, де ключовими є легкість і гнучкість конструкції.

1.2 Типи та характеристики систем електропостачання на базі сучасних сонячних батарей

Системи електропостачання, побудовані на основі сонячних батарей, мають широке застосування як у промисловості, так і в побуті. Їхня головна перевага полягає у здатності забезпечувати автономне або частково автономне живлення, що особливо важливо для об'єктів, які можуть зазнавати перебоїв у постачанні електроенергії.

Залежно від способу взаємодії з електромережею, наявності накопичувачів енергії та призначення, розрізняють три основні типи сонячних енергосистем:

- мережеві (on-grid);
- автономні (off-grid);
- гібридні (hybrid).

1. Мережеві (on-grid) системи сонячного електропостачання

Мережеві сонячні системи призначені для роботи **паралельно** з централізованою електромережею. Основна функція таких систем — зменшення споживання електроенергії з мережі або продаж надлишків енергії (за умов дії «зеленого тарифу»).

У мережевих системах не використовуються акумуляторні батареї, а енергія, що генерується сонячними модулями, безпосередньо подається до інвертора, який перетворює постійний струм у змінний та синхронізує його з мережею.

Основні елементи мережевої системи:

1. Сонячні панелі (фотоелектричні модулі).
2. Мережевий інвертор (grid-tie inverter).
3. Двонаправлений лічильник електроенергії.
4. Захисна автоматика (контактори, вимикачі, запобіжники).

Переваги:

- Висока енергоефективність і простота конструкції.

- Мінімальні втрати енергії завдяки відсутності акумуляторів.
- Можливість продавати надлишкову енергію в мережу.

Недоліки:

- Неможливість роботи під час відключення електромережі.
- Залежність від стабільності мережевої напруги.

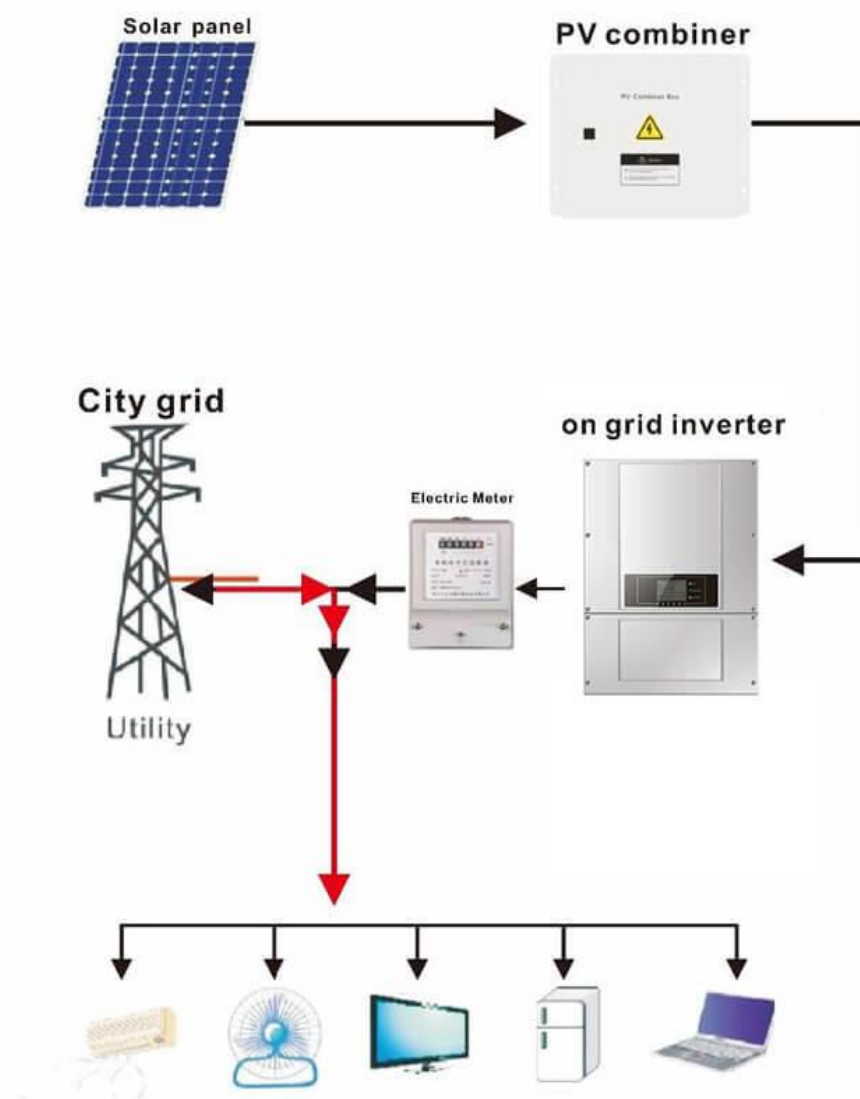


Рисунок 1.5 - Схема мережевої сонячної системи (панелі → інвертор → мережа)

2. Автономні (off-grid) системи сонячного електропостачання

Автономні системи функціонують незалежно від централізованої електромережі. Вони використовуються в місцях, де підключення до мережі

неможливе або економічно недоцільне (сільська місцевість, польові бази, військові об'єкти, мобільні лабораторії тощо).

Такі системи обов'язково містять акумуляторні батареї, які накопичують енергію, вироблену сонячними модулями, для подальшого використання у нічний час або за несприятливих погодних умов.

Основні елементи автономної системи:

1. Сонячні батареї;
2. Контролер заряду (MPPT або PWM);
3. Акумуляторна батарея (LiFePO₄, AGM, GEL);
4. Інвертор автономного типу (off-grid inverter);
5. Розподільчий щит і захисна автоматика.

Переваги:

- Повна енергетична незалежність від централізованої мережі;
- Можливість використання в польових умовах або зонах бойових дій;
- Гнучкість конфігурації (можна масштабувати систему).

Недоліки:

- Необхідність у дорогих акумуляторах і регулярному їх обслуговуванні;
- Менша ефективність через втрати під час зарядки/розрядки;
- Вища початкова вартість.

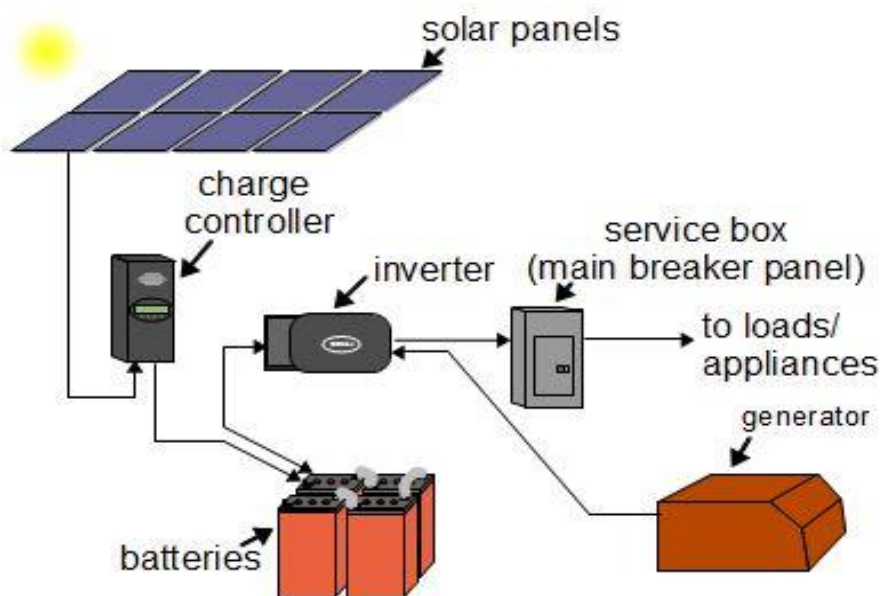


Рисунок 1.6 - Автономна сонячна система з акумуляторними батареями
(панелі → контролер → АКБ → інвертор → споживачі).

Гібридні (hybrid) системи сонячного електропостачання

Гібридні системи поєднують переваги мережевих і автономних. Вони одночасно можуть працювати з мережею, забезпечуючи живлення об'єкта, та накопичувати енергію в акумуляторах для використання під час відключень.

У таких системах застосовуються гібридні інвертори, які мають функції як мережевих, так і автономних приладів. Вони автоматично перемикають режими роботи, забезпечуючи резервне живлення у разі зникнення напруги в мережі.

Основні елементи гібридної системи:

1. Сонячні батареї;
2. Контролер заряду (вбудований або окремий);
3. Гібридний інвертор;
4. Акумуляторні батареї;
5. Підключення до централізованої електромережі та локальних

споживачів.

Переваги:

Забезпечення безперервного живлення (UPS-функція);

- Гнучкість у налаштуванні режимів роботи (з мережею, без неї, комбіновано);
- Можливість продавати надлишкову енергію.

Недоліки:

- Вища вартість обладнання (інвертори, АКБ);
- Складніша система керування;
- Потреба в грамотному проектуванні та балансуванні енергопотоків.

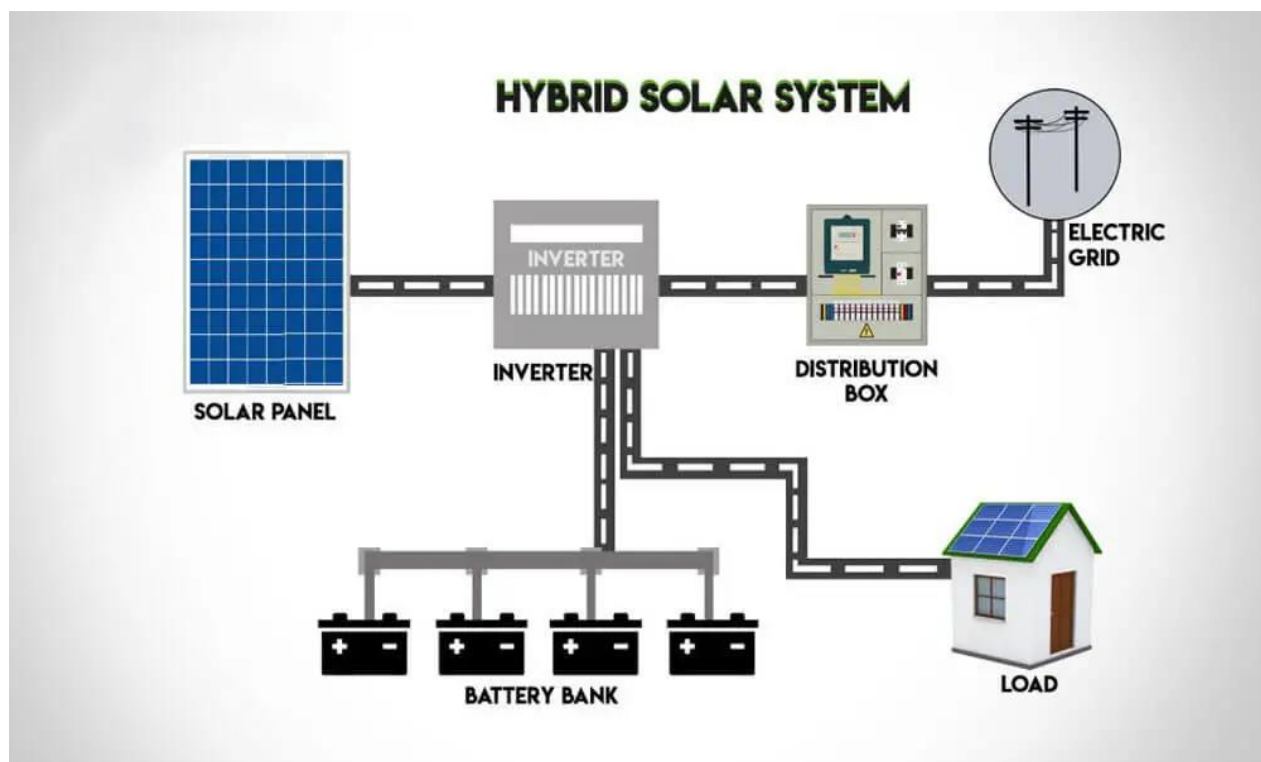


Рисунок 1.7 - Схема гібридної сонячної системи із двостороннім потоком енергії (панелі ↔ АКБ ↔ мережа ↔ споживач).

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз типів сонячних систем

Тип системи	Наявність акумуляторів	Підключення до мережі	Можливість роботи при відключенні мережі	Вартість	Сфера застосування
Мережева (on-grid)	Ні	Так	Ні	Низька	Міські будівлі, підприємства з надійною мережею
Автономна (off-grid)	Так	Ні	Так	Висока	Віддалені об'єкти, військові бази, майстерні

Гібридна (hybrid)	Так	Так	Так	Висока	Критичні об'єкти, лабораторії, лікарні, майстерні
-------------------	-----	-----	-----	--------	---

Практичне застосування у резервних системах

Для електротехнічної майстерні, що працює в умовах нестабільного електропостачання, найдоцільнішим є використання гібридної системи. Вона дозволяє:

- використовувати енергію сонця для щоденного живлення обладнання;
- автоматично перемикається на акумуляторний резерв у разі відключення мережі;
- підключати зовнішній генератор або мережу для зарядки АКБ у критичних ситуаціях.

Таке рішення поєднує надійність автономних систем і ефективність мережевих, що робить його ідеальним варіантом для оптимізації резервного електропостачання майстерні.



Рисунок 1.8 - Реальна гібридна сонячна станція в майстерні чи лабораторії.

Висновки до підпункту

Розглянуті типи систем електропостачання на базі сонячних батарей відрізняються рівнем автономності, складністю реалізації та вартістю. Для систем резервного живлення в умовах частих відключень електроенергії найбільш ефективним рішенням є гібридна сонячна система, що забезпечує безперервність живлення, енергетичну незалежність та можливість гнучкого керування енергопотоками.

Її впровадження дозволяє не лише підтримати працездатність електротехнічної майстерні під час відключень, а й зменшити споживання електроенергії з централізованої мережі у звичайному режимі.

2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ МАЙСТЕРНІ

2.1 Розрахунок мережі електропостачання електротехнічної майстерні

2.1.1 Аналіз силового обладнання та електричних двигунів

У силовій майстерні уже є підібране обладнання тому будемо вважати, що проводити вибір силового обладнання та електродвигунів є недоцільним в курсовому проекті. Тому ми наведемо технічні характеристики обладнання в табличній формі.

Таблиця 2.1 - Перелік силового обладнання та їх технічні характеристики

№ п/п	Найменування та марка обладнання	Тип електродвигуна	K_i	Номінальна потужність, кВт	Номінальний струм
1	Бетономішалка (Limeх LS190)	AIP71B2	6	1,1	3,9
2	Столярний верстат (Bosch)	AIP90L2	6,5	3,0	3,46
3	Електрозварювальна установка MMA - 200	--	--	7,6	20-200
4	Свердлильний верстат (CB-12)	AIP80B4	2,3	1,5	3,95
5	Генератор бензиновий GBG8000TE	Genpower190 FD	--	6,4	26
6	Токарний станок	AIP71B4	6,1	0,75	1,77
7	Шліфувальний станок	AIP56B2	5,3	0,25	0,73
8	Компресор FORTE ZA65 – 100	AIP80B2	7,0	2,2	4,85

Проаналізоване електрообладнання з електродвигунами заносимо в розрахунково-монтажну схему силової мережі, яка зображена та позначаємо місце розташування електроприводів на плані приміщень.

2.1.2 Вибір пуско-захисного обладнання та розподільних пристроїв

Вибирають апарати за величиною напруги, родом і величиною струму, кліматичним виконанням, умовами захисту від впливу навколишнього середовища, його відносності технологічним вимогам та іншими показниками.

Для прикладу виберемо пуско-захисну апаратуру для пневмомолата.

Дані електродвигуна наведені в таблиці 3.1.

Визначаємо пускові струми електродвигунів за формулою:

$$I_n = I_n K_i \quad (2.1)$$

$$I_n = 4,85 \cdot 7,0 = 33,95 \text{ A}$$

Вибираємо автоматичний вимикач QF5 за умовами:

$$U_{a.ном} \geq U_{мер} \quad (2.2)$$

$$I_{a.ном} \geq \sum I_n \quad (2.3)$$

$$I_{р.ном} \geq \sum I_n \quad (2.4)$$

Вибираємо автоматичний вимикач ВА61F29-3С

$$380 = 380 \text{ В}$$

$$16 > 4,85 \text{ А}$$

$$25 > 4,85 \text{ А}$$

Визначаємо кількість поділок на спрацювання теплового розчіплювача за формулою:

$$n = \frac{I_n}{I_{р.н}} \quad (2.5)$$

$$n = \frac{4,85}{10} = 0,5$$

Вибираємо електромагнітний пускач КМ1 за умовами:

$$U_{н.ном} \geq U_{мер} \quad (2.6)$$

$$I_{р.ном} \geq \sum I_{н.дв} \quad (2.7)$$

$$I_{р.ном} \geq \frac{\sum I_n}{6} \quad (2.8)$$

Вибираємо електромагнітний пускач серії ПМ-S-09

$$380 = 380 \text{ В}$$

$$10 > 4,85 \text{ А}$$

$$10 > 4,85 \cdot 7,0/6 \text{ А}$$

$$10 > 5,6 \text{ А}$$

Вибираємо електротеплове реле за умовами:

$$U_{p.ном} \geq U_{мер} \quad (2.9)$$

$$I_{p.ном} \geq I_{н.дв} \quad (2.10)$$

$$I_{н.б} \geq I_{н.дв} \quad (2.11)$$

Вибираємо електротеплове реле РТ-S-21($I_n = 12 \dots 18 \text{ А}$).

Аналогічно вибираємо інше пуско-захисне обладнання та заносимо його у таблицю 2.2. У таблиці вказано вид і марку електроспоживача та його параметри, а також вид та параметри пуско-захисного обладнання.

Таблиця 2.2 - Перелік пуско-захисного обладнання

Марки електродвигунів	Рн, кВт	Ін, А	Марки електромагнітних пускачів	Ін, А	Марки автоматичних вимикачів	Ін.а., А	Ін.р., А
АИР71В2	1,1	3,9	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20
АИР90L2	3,0	3,46	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20
ММА - 200	7,6	20-200	-	-	АВ3003/3Б*	225	15
АИР80В4	1,5	3,95	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20
Genpower190FD	6,4	26	-	-	АВ3002/3Н	63	32
АИР71В4	0,75	1,77	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20
АИР56В2	0,25	0,73	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20
АИР80В2	2,2	4,85	ПМЛ - 1210	10	ВА-51-25	25	20

Всі автоматичні вимикачі розміщені в розподільних щитках. Їх маркування та пристрої захисту, що знаходяться у них, зазначено в таблицю 23.3.

Таблиця 23.3 - Технічні характеристики розподільних щитків

Розподільний пункт	Тип щитка	Кількість вимикачів		Ступінь захисту	Кліматичне виконання
		ВА-51-25	АВ3003/3Б АВ3002/3Н		
СЦ1	CRN.BS4Z	3	1	IP54	У3
СЦ2	CRN.BS4Z	3	1	IP54	У3

Розподільні пункти розміщують у місці де доступ до них найбільш зручний. Шлях до пункту повинен бути вільний від по сторонніх предметів.

2.1.3 Вибір марок і перерізів проводів, кабелів та способів їх прокладання

У промислово виробничих установках здебільшого використовують проводи і кабелі з алюмінієвими жилами перерізом $2,5 \text{ мм}^2$ і вище. При цьому, як правило, потрібно застосовувати такі види електропроводок, які не потребують сталених труб. Електропроводку в сталених трубах застосовують лише тоді, коли за умовами навколишнього середовища або місця прокладання недопустима або недоцільна. Тому вся електропроводка силової мережі буде прокладена у сталених трубах, щоб уникнути механічних пошкоджень ізоляції і жил провідників.

Площу перерізу жил провідників або кабелю в кожному випадку вибираємо так, щоб тривало допустимий для нього за нагрівом струм навантаження $I_{\text{доп}}$ був не меншим максимального тривалого робочого струму електричного кола $I_{\text{макс.р}}$, тобто

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{макс.р}}$$

Максимальний робочий струм магістралі, від якої живиться кілька електроприймачів, визначають за формулою:

$$I_{\text{макс.р}} = K_o \sum_1^n I_{\text{ном}} \quad (2.12)$$

Вибраний за нагрівом провід або кабель необхідно перевірити на відповідність його перерізу апарату захисту за умовою:

$$I_{\text{доп}} \geq K_3 I_3, \quad (2.13)$$

де K_3 - кратність допустимого струму провідника по відношенню до номінального струму спрацювання захисного апарату, $K_3=1$;

I_3 - сила номінального струму або струму спрацювання захисного апарату.

Для прикладу вибираємо кабель, який буде жити від мережі асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який приводить в дію компресор АВВГ 4х2,5 з $I_{доп} = 19$ А.

$$I_{\text{макс.р}} = 1 \cdot 4,85 = 4,85 \text{ А}$$

$$I_{\text{доп}} = 1 \cdot 19 = 19 \text{ А}$$

$$19 > 4,85$$

Інші кабелі вибираємо аналогічно.

Таблиця 2.4 - Марки кабелів для живлення електрообладнання

№ п/п	Найменування обладнання	Р _н , кВт	I _н , А	Марка кабеля, провода	I _{доп} , А
1	Бетономішалка (Limex LS190)	1,1	3,9	АВВГ 4х2,5	19
2	Столярний верстат (Bosch)	3,0	3,46	АВВГ 4х2,5	19
3	Електрозварювальна установка ММА - 200	7,6	20-200	АВВГ 4х150	235
4	Свердлильний верстат (СВ-12)	1,5	3,95	АВВГ 4х2,5	19
5	Генератор бензиновий GBG8000TE	6,4	26	АВВГ 4х6	30
6	Токарний станок	0,75	1,77	АВВГ 4х2,5	19
7	Шліфувальний станок	0,25	0,73	АВВГ 4х2,5	19
8	Компресор FORTE ZA65 – 100	2,2	4,85	АВВГ 4х2,5	19

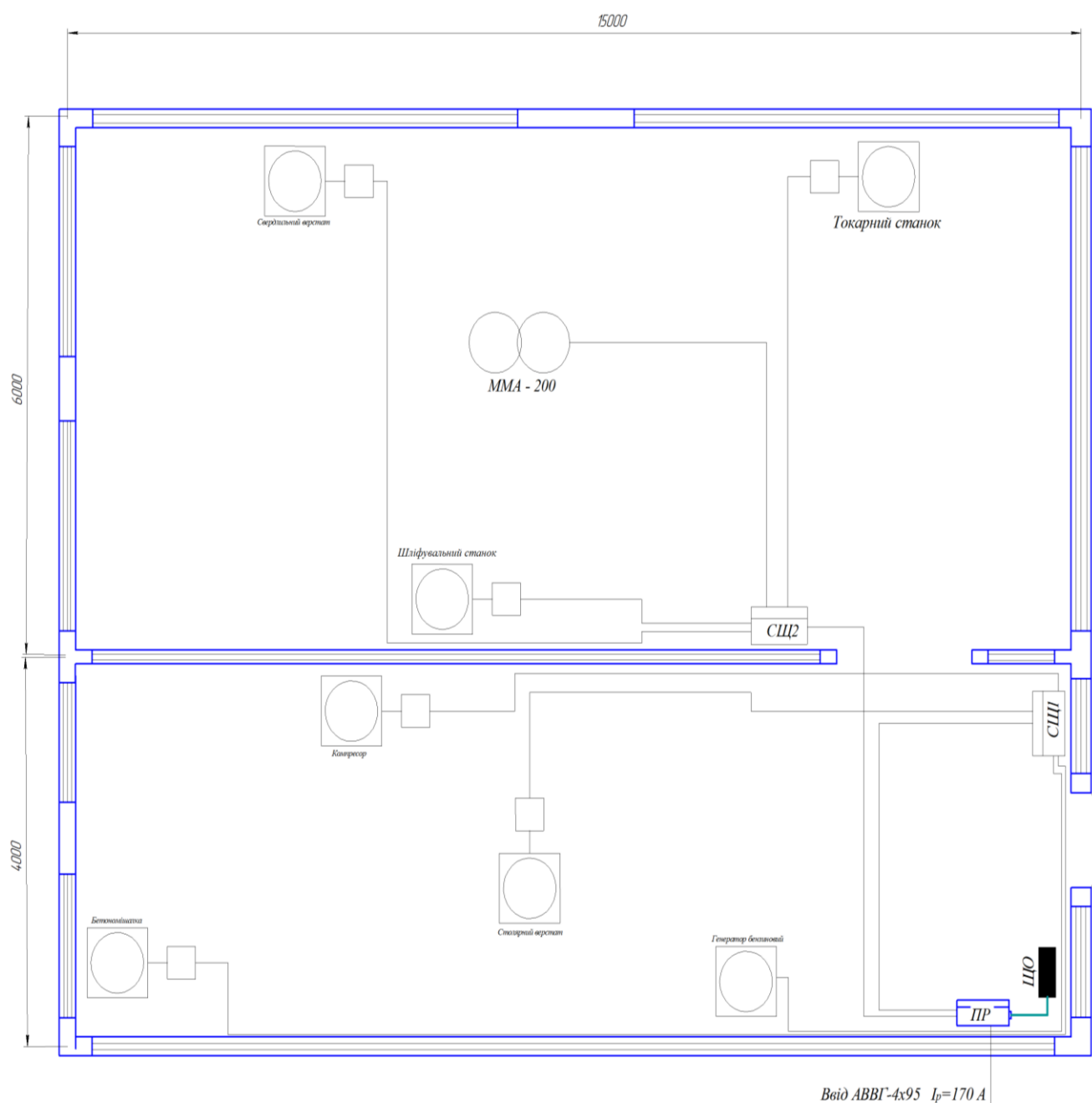


Рисунок 2.1 Схема силової мережі та розміщенням обладнання.

2.2 Оптимізація резервної системи

Резервна система електропостачання повинна забезпечувати безперебійну роботу обладнання у разі аварійного відключення мережі. Її оптимізація полягає в підборі потужності сонячних панелей, ємності акумуляторів, типу інвертора та схеми з'єднання, щоб досягти максимальної надійності та енергоефективності при мінімальних витратах.

У даному розділі розглядається приклад оптимізації гібридної системи резервного електропостачання для електротехнічної майстерні з добовим енергоспоживанням близько 10 кВт·год.

1. Основні принципи оптимізації

Оптимізація передбачає баланс між такими факторами:

- Потужністю сонячних батарей (P_{solar}) — повинна забезпечувати заряд акумуляторів і живлення споживачів у світлий час доби.
- Ємністю акумуляторів ($C_{\text{акб}}$) — визначає тривалість автономної роботи системи при відсутності сонячного випромінювання.
- Типом інвертора — залежить від максимальної потужності навантаження та потреби в синхронізації з мережею.
- Режимом пріоритетів живлення — наприклад, “спочатку сонце”, “спочатку батарея”, або “мережа + сонце”.

Таблиця 2.5 - Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Добове споживання майстерні	E	10	кВт·год
Напруга системи	U	48	В
Тривалість автономної роботи	$t_{\text{авт}}$	6	год
ККД інвертора	η_{inv}	0.9	-
Середня сонячна інсоляція для м. Львів (влітку)	H	4.5	кВт·год/м ² · доба
ККД сонячних панелей	η_{panel}	0.18	-

2.2.1 Розрахунок необхідної потужності сонячних панелей

Необхідна потужність панелей визначається за формулою:

$$P_{\text{сб}} = \frac{E}{H \cdot \eta_{\text{панель}} \cdot \eta_{\text{інв}}}$$

$$P_{\text{сб}} = \frac{10}{4.5 \cdot 0.18 \cdot 0.9} \approx 13.7 \text{ кВт}$$

Отже, рекомендована потужність сонячної установки — 14 кВт (з урахуванням запасу на похмурі дні).



Рисунок 2.2 - Фото поля сонячних панелей 14 кВт на даху або в полі.

2.2.2. Розрахунок ємності акумуляторів

$$C_{\text{акб}} = \frac{E_{\text{авт}}}{U \cdot DOD \cdot \eta_{\text{інв}}}$$

де:

- $E_{\text{авт}}$ — необхідна енергія на період автономної роботи (кВт·год),
- DOD — глибина розряду (для $\text{LiFePO}_4 \approx 0.8$).

$$C_{\text{акб}} = \frac{10}{48 \cdot 0.8 \cdot 0.9} \approx 289 \text{ А·год}$$

Тобто потрібно акумуляторну батарею ємністю не менше 300 А·год при 48 В.

Практично це може бути, наприклад:

- 8 акумуляторів LiFePO_4 3.2В × 300А·год, з'єднаних послідовно (дають 25.6 В),
- або дві такі гілки паралельно (для 51.2 В, 300 А·год).



Рисунок 2.3 - Акумуляторна батарея LiFePO_4 у шафі чи корпусі.

2.2.3 Вибір типу інвертора

Для даної конфігурації підходить гібридний інвертор потужністю 10–15 кВт, наприклад:

- Growatt SPH 10000TL3,
- Deye SUN-10K-SG04LP3,
- Victron Quattro 10kVA.

Такі інвертори дозволяють одночасно:

- живити споживачів від сонячних панелей і мережі,
- заряджати АКБ,

- автоматично перемикає живлення при відключенні мережі.



Рисунок 2.4 - Гібридний інвертор Deye або Growatt у стіновому монтажі.

2.2.4 Енергетична схема системи

Нижче подано узагальнену схему оптимізованої резервної системи електропостачання:

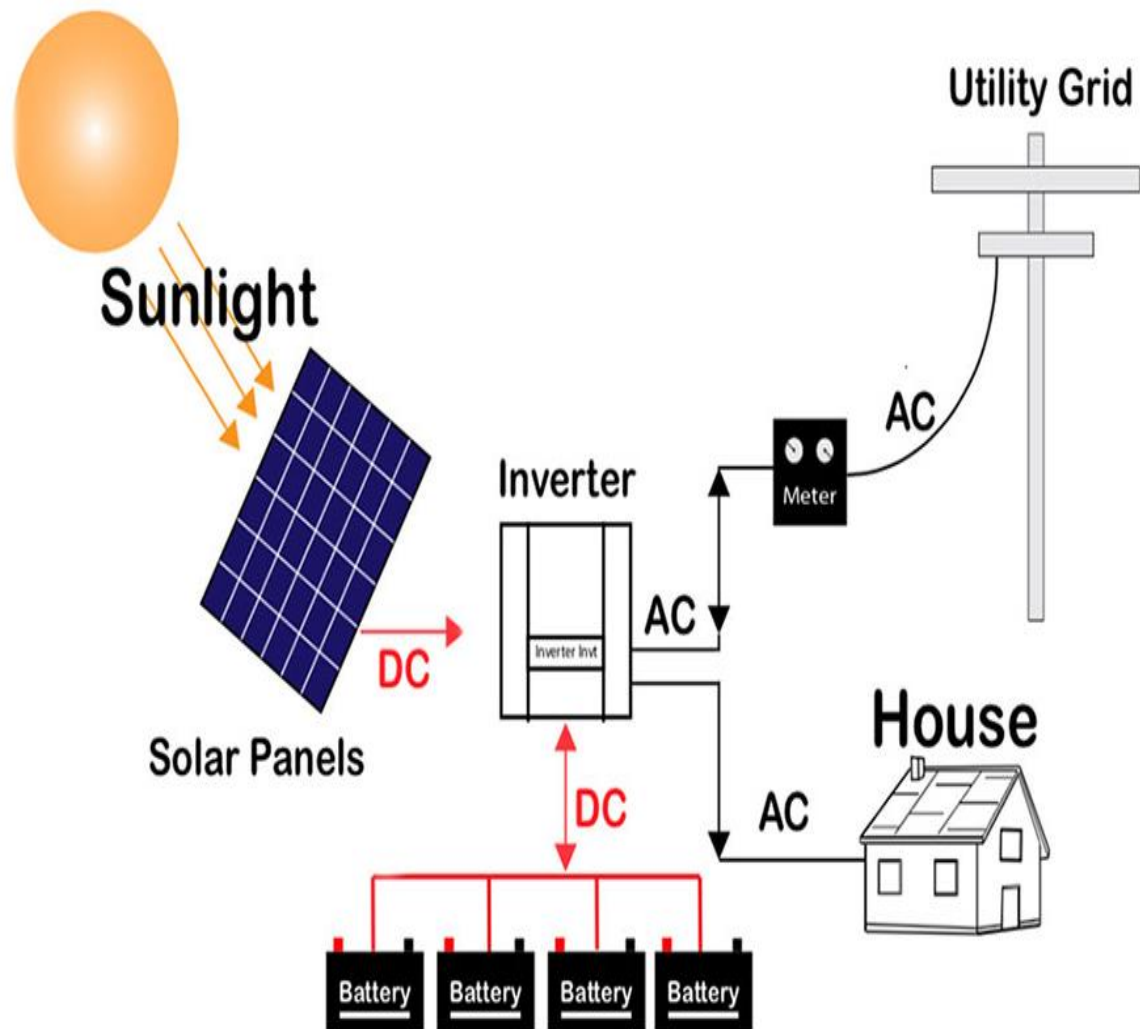


Рисунок 2.5 - Схема гібридної системи: Сонячні панелі → Контролер → АКБ → Інвертор ↔ Електромережа ↔ Споживачі.

3 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

3.1 Загальна характеристика резервованих систем

Надійність — одна з ключових характеристик будь-якої технічної системи, зокрема систем електропостачання. Вона визначає здатність системи виконувати задані функції впродовж певного часу за встановлених умов експлуатації. Для електротехнічних об'єктів, таких як виробничі або навчальні майстерні, від надійності живлення безпосередньо залежить безперервність технологічних процесів, збереження обладнання та безпека персоналу.

У сучасних умовах, коли енергетична система України зазнає постійних атак і пошкоджень, питання забезпечення надійного електропостачання набуває особливої ваги. Одним із найефективніших способів підвищення надійності електротехнічних систем є використання резервування — тобто впровадження додаткових елементів або шляхів, що дозволяють підтримувати працездатність системи навіть у разі відмови одного або кількох її компонентів.

Поняття резервування та його мета

Під резервуванням розуміють введення до складу системи додаткових (резервних) елементів, які дублюють або частково замінюють основні елементи з метою забезпечення заданої надійності функціонування. У загальному випадку резервування може здійснюватися як на рівні елементів, так і на рівні підсистем або навіть цілих ліній електропостачання.

Основна мета резервування полягає у зменшенні ймовірності відмови системи. Якщо відмова одного елемента не призводить до втрати працездатності всієї системи, то така система вважається резервованою. Залежно від способу взаємодії основних і резервних елементів розрізняють активне та пасивне резервування, що будуть розглянуті у наступних підрозділах.

Класифікація резервованих систем

Резервовані системи можна класифікувати за кількома ознаками:

За типом резерву:

- Повне резервування — коли резервний елемент повністю дублює функції основного (наприклад, друге джерело живлення, аналогічне головному).
- Часткове резервування — резерв забезпечує лише критичні функції або частину навантаження.
- Спеціальне резервування — передбачає використання альтернативних шляхів або інших фізичних принципів для забезпечення працездатності (наприклад, дизель-генератор або сонячна батарея як резерв до мережі).

За принципом дії резерву:

- Активне резервування — резервні елементи працюють паралельно з основними.
- Пасивне резервування — резерв вводиться в роботу лише після відмови основного елемента.
- Змішане резервування — поєднання активного та пасивного підходів.

За структурою з'єднання елементів:

- Послідовне з'єднання, коли відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи.
- Паралельне з'єднання, при якому працездатність зберігається доти, доки працює хоча б один елемент.

За кількістю резервних елементів:

- Однократне (один резервний елемент);
- Багатократне (декілька резервних елементів).

Показники надійності резервованих систем

Для кількісної оцінки ефективності резервування використовують такі основні показники надійності:

- Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ — імовірність того, що система залишиться працездатною протягом часу t .

- Інтенсивність відмов λ — кількість відмов елемента або системи за одиницю часу.
- Середній час безвідмовної роботи (MTBF) — математичне очікування часу до першої відмови.
- Коефіцієнт готовності (Кг) — частка часу, протягом якого система знаходиться у працездатному стані.

Резервування, як правило, збільшує значення цих показників, але водночас підвищує складність системи, її вартість і потребу в обслуговуванні. Тому завдання проєктанта полягає не лише у створенні максимально надійної системи, а у оптимізації співвідношення між надійністю та економічними витратами.

Резервування в системах електропостачання

В електроенергетичних системах резервування є одним із основних способів підвищення надійності живлення споживачів. Воно може бути реалізоване на різних рівнях:

- На рівні джерела живлення — використання декількох незалежних джерел (наприклад, мережа + сонячна електростанція + акумулятор).
- На рівні ліній передачі — застосування дублюючих кабельних або повітряних ліній.
- На рівні розподілу — використання схем з кільцевим або радіально-резервним підключенням.
- На рівні споживача — введення автономних систем безперебійного живлення, інверторів, акумуляторних батарей тощо.

Особливо важливим резервування є для об'єктів, що не допускають перерв у живленні — медичних установ, серверних центрів, систем зв'язку, а також електротехнічних майстерень, де зберігається дороге вимірювальне й випробувальне обладнання.

Переваги та недоліки резервування

Переваги:

- підвищення надійності та безперервності роботи системи;
- зменшення ризику простою обладнання;
- можливість планового технічного обслуговування без

відключення навантаження;

- підвищення безпеки експлуатації.

Недоліки:

- збільшення початкових капітальних витрат;
- ускладнення схеми керування;
- підвищення ймовірності помилок персоналу при ручному

перемиканні;

- зростання витрат на технічне обслуговування.

Сучасні тенденції у резервуванні систем електропостачання

У сучасних умовах активно розвиваються інтелектуальні системи резервування, що включають мікропроцесорне керування, автоматичне перемикання джерел живлення (ATS), а також інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії. Впровадження сонячних панелей та акумуляторних накопичувачів у резервні системи дозволяє створювати гібридні енергетичні комплекси, які забезпечують не лише резервування, але й енергетичну автономію об'єкта.

Для електротехнічної майстерні такий підхід є особливо доцільним, оскільки дозволяє:

- забезпечити стабільну роботу лабораторного обладнання;
- зменшити витрати на електроенергію у денний час;
- використовувати накопичену енергію для аварійного живлення в

нічні години або при відключеннях мережі.

Отже, резервування є невід'ємною складовою системи підвищення надійності електропостачання. Воно дозволяє забезпечити працездатність критичних об'єктів у будь-яких умовах, а у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії стає ще більш ефективним і гнучким інструментом енергетичної стійкості.

3.2 Розрахунок надійності при пасивному резервуванні

Поняття пасивного резервування

Пасивним резервуванням називають такий спосіб підвищення надійності системи, при якому резервний елемент не бере участі в роботі доти, доки основний елемент є справним. Тобто резерв залишається в «очікувальному» або «холодному» стані й підключається лише після відмови основного елемента.

Такий підхід характерний для більшості систем резервного електроживлення, де основне джерело живлення працює постійно (наприклад, мережа 220 В), а резервне — (наприклад, акумулятор або генератор) — активується лише при зникненні напруги.

Перевагою пасивного резервування є зменшене навантаження на резервні елементи та подовжений термін їхньої служби, оскільки вони перебувають у режимі очікування. Недоліком є затримка перемикавання та можливість відмови механізму перемикавання в момент переходу на резерв.

Математична модель пасивного резервування

Розглянемо систему, що складається з одного основного елемента та одного резервного, які працюють за принципом пасивного резервування.

Нехай:

- λ_1 — інтенсивність відмов основного елемента;
- λ_2 — інтенсивність відмов резервного елемента;
- t — час роботи системи.

Імовірність безвідмовної роботи основного елемента визначається як:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}$$

Після відмови основного елемента роботу системи бере на себе резервний, який до цього моменту не працював. Його імовірність безвідмовної роботи після активації дорівнює:

$$P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}$$

Оскільки резерв підключається лише після відмови основного елемента, імовірність безвідмовної роботи всієї системи з пасивним резервуванням можна записати як:

$$P_c(t) = P_1(t) + \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 \tau} e^{-\lambda_2(t-\tau)} d\tau$$

де інтеграл враховує ситуації, коли основний елемент відмовив у момент часу τ , але резервний продовжив роботу до моменту t .

Після інтегрування отримаємо:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Цей вираз описує імовірність безвідмовної роботи системи при наявності одного пасивного резерву.

Приклад розрахунку

Нехай у системі електроживлення основним джерелом є мережа, а резервним — акумуляторна батарея з інвертором. Інтенсивності відмов мають значення:

$$\lambda_1 = 2 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}, \quad \lambda_2 = 1 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Потрібно визначити імовірність безвідмовної роботи системи протягом $t = 1000$ годин.

Підставимо у формулу:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Після підстановки отримаємо:

$$P_c(1000) = e^{-0.2} + \frac{2 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}} (e^{-0.2} - e^{-0.1})$$

$$P_c(1000) = 0.8187 - 2 \times (0.8187 - 0.9048) = 0.8187 + 0.1722 = 0.9909$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи системи з пасивним резервом протягом 1000 годин становить 0.991, тобто надійність системи зросла з 0.819 (без резерву) до 0.991 (з резервом).

Загальний випадок для n резервів

Якщо система має n пасивних резервів, то імовірність безвідмовної роботи визначається як сума імовірностей того, що відмовлять не більше ніж n елементів за час t. У цьому випадку використовується **розподіл Пуассона**:

$$P_c(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

де λ — інтенсивність відмов кожного елемента, а k — кількість елементів, що відмовили.

Ця формула показує, що з кожним додатковим резервом надійність системи наближається до 1, проте збільшення кількості резервних елементів супроводжується зростанням вартості та складності системи.

Практичне застосування пасивного резервування

У системах електроживлення електротехнічних майстерень пасивне резервування часто реалізується через джерела безперебійного живлення (UPS), акумуляторні батареї, або дизель-генератори, які автоматично вмикаються після зникнення напруги основної мережі.

Типова схема виглядає так:

- основне джерело — міська електромережа;
- пристрій автоматичного ввімкнення резерву (АВР);
- резервне джерело — інвертор з АКБ або генератор;
- навантаження — обладнання майстерні.

Перевага такого підходу полягає в тому, що система споживає енергію з мережі у штатному режимі, а при зникненні напруги автоматично перемикається на резерв протягом кількох секунд.

Оцінка ефективності резервування

Ефективність резервування можна оцінити за коефіцієнтом підвищення надійності:

$$K_{\text{еф}} = \frac{P_{\text{рез}}(t)}{P_{\text{без}}(t)}$$

де $P_{рез}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи з резервом, а $P_{без}(t)$ — без резерву.

Для наведеного вище прикладу:

$$K_{эф} = \frac{0.991}{0.819} = 1.21$$

Тобто надійність системи підвищилася приблизно на 21% при введенні одного пасивного резерву.

Пасивне резервування є одним із найпоширеніших методів підвищення надійності систем електропостачання. Його основні переваги — простота, економічність та тривалий термін служби резервного обладнання. Недоліками є затримка перемикавання та залежність від справності пристроїв керування.

Для електротехнічної майстерні така схема є доцільною, оскільки дозволяє забезпечити живлення критичного обладнання за допомогою автономних джерел (сонячних панелей з АКБ) при зникненні напруги основної мережі. Отримані формули та розрахунки можуть бути використані для подальшої оптимізації структури резервного електропостачання.

3.3 Розрахунок надійності при активному резервуванні

Поняття активного резервування

Активним резервуванням називається такий тип організації системи, при якому основні та резервні елементи одночасно беруть участь у роботі. Це означає, що резервні елементи не очікують відмови основних, а постійно працюють паралельно з ними, виконуючи ту саму функцію або частину функцій системи.

У системах електропостачання активне резервування реалізується, наприклад, через паралельну роботу двох джерел живлення (мережа + сонячна електростанція, або дві батарейні групи, що одночасно живлять навантаження). У разі відмови одного з джерел інше продовжує забезпечувати

живлення без помітних перебоїв, що робить такий спосіб резервування найбільш надійним.

Переваги активного резервування:

- відсутність часу перемикання (резерв уже в роботі);
- плавний перехід навантаження при відмові одного з елементів;
- підвищення загальної надійності системи без втрати

функціональності.

Недоліки:

- одночасне навантаження на всі елементи, що призводить до зменшення терміну служби;
- підвищена складність системи керування;
- вища вартість реалізації.

Математична модель активного резервування

Розглянемо систему, що складається з двох незалежних елементів, які працюють паралельно. Система залишається працездатною, якщо хоча б один з елементів не відмовив.

Позначимо:

- λ_1, λ_2 — інтенсивності відмов обох елементів;
- $P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}, P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}$ — імовірності безвідмовної роботи кожного елемента.

Імовірність того, що система буде працездатною (тобто працює хоча б один елемент), дорівнює:

$$P_c(t) = 1 - [1 - P_1(t)][1 - P_2(t)]$$

Розкривши дужки, отримаємо:

$$P_c(t) = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t)$$

Якщо обидва елементи однакові ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$), формула спрощується:

$$P_c(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

Приклад розрахунку

Нехай два інвертори одночасно живлять навантаження в електротехнічній майстерні. Інтенсивність відмов кожного інвертора становить:

$$\lambda = 2 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}$$

Потрібно визначити імовірність безвідмовної роботи системи протягом 1000 годин.

Підставимо у формулу:

$$P_c(1000) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$P_c(1000) = 2e^{-0.2} - e^{-0.4} = 2(0.8187) - 0.6703 = 0.9671$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи системи з активним резервуванням протягом 1000 годин становить 0.967. Для порівняння, без резерву цей показник був би лише 0.819. Таким чином, активне резервування підвищило надійність системи приблизно на 18%.

Загальний випадок для n паралельно працюючих елементів

Якщо система містить nnn елементів, з яких працездатність вимагає роботи хоча б одного, імовірність безвідмовної роботи визначається формулою:

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^n$$

Цей вираз показує, що зі збільшенням кількості паралельно працюючих елементів загальна надійність системи зростає експоненційно. Проте у практичних умовах збільшення кількості елементів понад 2–3 рідко є доцільним, оскільки складність та вартість системи зростають швидше, ніж приріст надійності.

Порівняння з пасивним резервуванням

Розглянемо порівняння на прикладі систем з однаковими параметрами:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}, \quad t = 1000 \text{ год.}$$

- Без резервування:

$$P_0 = e^{-\lambda t} = 0.8187$$

- Пасивне резервування (з формули підрозділу 1.2):

$$P_{\text{пас}} = 0.991$$

- Активне резервування:

$$P_{\text{акт}} = 0.967$$

На перший погляд, пасивне резервування дає трохи вищу надійність, однак у реальних умовах активне має суттєву перевагу — відсутність часу перемикавання та миттєва реакція на відмову. У випадках, коли навіть коротка перерва у живленні є неприпустимою (наприклад, під час роботи з вимірювальними стендами чи програмованими контролерами), саме активне резервування є найкращим вибором.

Практична реалізація активного резервування

В електротехнічних майстернях активне резервування може бути реалізоване кількома способами:

1. Паралельна робота інвертора та сонячного контролера. Сонячна система виробляє енергію, яка безпосередньо живить навантаження, а надлишок іде в акумулятор. У разі недостатнього сонячного ресурсу підключається мережа.

2. Двоканальна система живлення. Навантаження підключається одночасно до двох джерел через діодні розв'язки або автоматичні реле, що дозволяє одному джерелу миттєво взяти на себе навантаження.

3. Гібридна система з інвертором подвійного вводу (AC-DC-AC). Такі інвертори одночасно підключені до мережі та акумулятора, автоматично балансують потоки енергії і забезпечують безперервне живлення навіть при повній відмові одного з джерел.

Усі ці рішення активно використовуються у сучасних системах безперебійного живлення, а також у мікромережах (microgrid), де поєднуються відновлювані джерела та резервні лінії.

Оцінка ефективності активного резервування

Ефективність можна охарактеризувати коефіцієнтом підвищення надійності:

$$K_{\text{еф}} = \frac{P_{\text{акт}}(t)}{P_0(t)} = \frac{0.967}{0.819} = 1.18$$

Отже, активне резервування збільшує імовірність безвідмовної роботи приблизно на 18% у порівнянні з нерезервованою системою. Але головна його перевага — повна відсутність простоїв при відмові елемента, що є критично важливим для чутливих електротехнічних процесів.

Активне резервування забезпечує високу надійність і безперервність роботи системи, оскільки резервні елементи беруть участь у роботі постійно. У системах електроживлення воно дозволяє уникнути втрат часу на перемикання, що особливо важливо для електротехнічних майстерень, де використовуються високоточні прилади, програмовані контролери та комп'ютеризовані установки.

Хоча активне резервування є дорожчим і складнішим у реалізації, його використання виправдане у випадках, коли будь-яка зупинка процесу недопустима. У подальшому розділі буде виконано порівняльний аналіз пасивного та активного резервування для оцінки їхньої ефективності та доцільності застосування у системах резервного електропостачання з використанням сонячної енергії.

3.4 Порівняльний аналіз надійності при пасивному та активному резервуванні

Резервування є одним із найефективніших методів підвищення надійності систем електропостачання. Залежно від принципу використання резервних

елементів розрізняють пасивне та активне резервування. Вибір між цими двома підходами визначається вимогами до безперервності живлення, економічними можливостями, а також особливостями функціонування об'єкта, для якого створюється система резервування.

Основна різниця між пасивним та активним резервуванням полягає у способі включення резервного елемента в роботу системи. У пасивних системах резерв залишається у вимкненому або очікувальному стані до моменту відмови основного елемента. В активних системах усі елементи працюють одночасно, розподіляючи навантаження між собою. Такий підхід забезпечує вищу надійність, але потребує складнішої схеми керування і більшої кількості ресурсів.

Таблиця 3.1 - Порівняння характеристик активного та пасивного резервування

Ознака порівняння	Пасивне резервування	Активне резервування
Принцип дії	Резервний елемент не працює до моменту відмови основного.	Усі елементи працюють одночасно, розподіляючи навантаження.
Надійність системи	Залежить від надійності основного елемента та швидкості підключення резерву.	Вища, оскільки навіть при відмові одного елемента система продовжує функціонувати.
Коефіцієнт готовності	Нижчий, через можливу затримку в підключенні резерву.	Вищий, оскільки резерв завжди в роботі.
Складність системи керування	Проста, потребує лише пристрою автоматичного перемикавання.	Складна, вимагає синхронізації роботи кількох елементів.
Енергоспоживання	Менше, оскільки резерв не споживає енергію у спокої.	Більше, через одночасну роботу всіх елементів.

Вартість реалізації	Нижча, потребує менше обладнання та простішого обслуговування.	Вища, через паралельну роботу та складнішу автоматику.
Область застосування	Системи з допустимими короткочасними перервами живлення (наприклад, побутові чи допоміжні).	Критичні системи, де недопустимі збої (медичне обладнання, дата-центри, військові об'єкти).

Як видно з таблиці, активне резервування забезпечує вищу надійність і безперервність роботи системи, проте вимагає більших фінансових витрат і складнішого технічного обслуговування. Пасивне резервування, навпаки, є економічнішим, але менш надійним у випадках, коли навіть короткочасна зупинка системи є неприпустимою.

Порівняння за показниками надійності

Для об'єктивної оцінки ефективності обох типів резервування порівняємо значення імовірності безвідмовної роботи системи ($P(t)$), середнього часу безвідмовної роботи ($T_{ср}$) та коефіцієнта готовності (K_r).

Для пасивного резервування:

$$P_{\text{пас}}(t) = e^{-\lambda_1 t} + \lambda_1 t e^{-\lambda_2 t}$$

де

λ_1, λ_2 — інтенсивності відмов основного і резервного елементів.

Для активного резервування (за паралельною схемою двох елементів):

$$P_{\text{акт}}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

При рівних інтенсивностях відмов ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$) порівняння показує, що:

$$P_{\text{акт}}(t) > P_{\text{пас}}(t)$$

для будь-якого значення $t > 0$. Це означає, що активне резервування завжди забезпечує вищу імовірність безвідмовної роботи.

Крім того, середній час безвідмовної роботи для активного резервування становить:

$$T_{\text{акт}} = \frac{3}{2\lambda}$$

тоді як для пасивного — лише:

$$T_{\text{пас}} = \frac{2}{\lambda}$$

При цьому активна система має більший коефіцієнт готовності:

$$K_{\text{г,акт}} = \frac{T_{\text{акт}}}{T_{\text{акт}} + T_{\text{відн}}}$$

де $T_{\text{відн}}$ — середній час відновлення системи після відмови.

Для пасивної системи цей коефіцієнт буде меншим через наявність часу перемикавання та можливу затримку в підключенні резервного елемента.

Практичні аспекти вибору типу резервування

У реальних умовах вибір між активним і пасивним резервуванням визначається балансом між вартістю, складністю реалізації та вимогами до безперервності електроживлення. Наприклад:

- Для електротехнічної майстерні, де важливим є безперебійний процес паяння, налаштування або калібрування обладнання, перевагу може бути надано активному резервуванню з використанням інверторів подвійного перетворення або паралельного підключення джерел енергії (сонячна станція + акумуляторна батарея + мережа).
- Для підсобних приміщень чи допоміжних цехів, де не критичні короткі перерви живлення, цілком достатньо пасивного резервування — наприклад, із автоматичним перемиканням на акумулятор або генератор.

Таким чином, оптимальний варіант резервування визначається індивідуально для кожного об'єкта, з урахуванням його технологічних потреб, режимів роботи та економічних можливостей.

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. Пасивне резервування характеризується простою структурою, нижчою вартістю, але меншою надійністю через часові затримки при перемиканні.
2. Активне резервування забезпечує найвищий рівень надійності, проте потребує складної системи керування та більших енергетичних і фінансових ресурсів.
3. Для об'єктів із підвищеними вимогами до безперервності живлення, таких як електротехнічні майстерні, доцільно застосовувати комбіновані схеми резервування, що поєднують елементи обох підходів.
4. Проведений теоретичний аналіз є основою для подальших розрахунків оптимальної системи резервного електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, що розглядатимуться у наступних розділах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз стану охорони праці на підприємстві

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці. Створення цієї системи здійснюється шляхом послідовного визначення мети і об'єкта управління, завдання і заходів щодо охорони праці, функцій і методів управління, побудови організаційної структури управління, складання нормативно-методичної документації. Головна мета управління охороною праці є створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Заходи для забезпечення створення СУОП:

- розробити і затвердити на підприємстві положення про організацію управління охорони праці;
- щорічно оформляти наказ про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці в галузях і на ділянках, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів і посудин, що працюють під тиском, експлуатація вантажопідйомних машин, газового господарства, пестицидів);
- оформлення наказу про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників ділянок та інших службових осіб;
- щорічне проведення паспортизації умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць;
- складання планів роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування;

- організація заходів матеріально і морального стимулювання щодо охорони праці;
- впровадження державних, галузевих стандартів, а також розроблення на їх основі стандартів підприємства;
- проведення розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробка заходів щодо їх застосування;
- вивчення узагальнення, впровадження передового досвіду з охорони праці;
- організація аудиту охорони праці, лабораторні дослідження умов праці, оцінку технічного стану виробничого плану, атестація робочих місць.

Суб'єктом управління в СУОП на підприємстві в цілому є керівник, а в цехах, на виробничих дільницях і в службах – керівники відповідних структурних підрозділів і служб. Організаційно - методичну роботу по управлінню охороною праці, підготовку управлінських рішень і контроль за їх своєчасною реалізацією здійснює служба хорони праці підприємства, що підпорядкована безпосередньо керівнику підприємства. Суб'єкт управління аналізує інформацію про стан охорони праці на структурних підрозділах підприємства та приймає рішення спрямовані на проведення фактичних показників охорони праці у відповідність з нормами. Об'єктом управління СУОП є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

Згідно Закону України „Про охорону праці” фінансування охорони праці здійснюється власником підприємства. Працівник не несе ніяких витрат на заходи щодо охорони праці. У господарстві створенні фонди охорони праці відповідно до Положення про державний, галузеві, регіональні фонди охорони праці та фонди охорони праці.

Власники підприємства визначає порядок управління фондами підприємства, призначає відповідальних за це осіб. Кошти фондів

підприємства використовуються на виконання комплексних заходів, що забезпечують досягнення встановлених нормативів з охорони праці, а також на подальше підвищення рівня охороною праці на виробництві відповідно до визначеного переліку.

Фінансування профілактичних заходів з охорони праці, виконання загальнодержавної, галузевих та регіональних програм поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, інших державних програм, спрямованих на запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням, передбачається, поряд з іншими джерелами фінансування, визначеними законодавством, у державному і місцевих бюджетах, що виділяються окремим рядком. Фінансування заходів по охороні праці здійснюється у відповідності нормам і зображено у таблиці 4. 1.

Таблиця 4. 1 - Фінансування заходів з охорони праці

Показники	Рік	
	2023	2024
Загальні витрати по господарству, грн.:	1922	2150
- на ЗІЗ	620	755
- на лікувально-профілактичне оздоровлення	1302	1495

Виходячи з даних таблиці 4.1 можна зробити висновок, що фінансування охорони праці за останні роки збільшується на 15%, це пов'язано із збільшенням реалізованої продукції, оскільки щорічно від суми реалізованої продукції господарство виділяє 0,8% коштів на фінансування заходів з охорони праці. Отже, згідно чинного законодавства ця сума не повинна бути меншою 0,5%.

Аналіз умов праці, побуту і профілактики травматизму дозволяє виявити причини і визначити закономірності їх виникнення. На основі такої інформації розробляються заходи та засоби щодо профілактики виробничого травматизму. Для аналізу виробничого травматизму застосовують такі основні

методи: статистичний, топографічний, монографічний, економічний, метод анкетування, метод експертних оцінок.

На основі даних показників визначають динаміку виробничого травматизму, професійної та загальної захворюваності за відповідний період, яка дозволяє оцінити стан охорони праці на підприємстві, правильність обраних напрямків щодо забезпечення здорових та безпечних умов праці.

Таблиця 4. 2. - Аналіз умов праці та травматизму

Показники	2022	2023	2024
Середньомісячна кількість працівників, чол	324	335	352
Число потерпілих з втратою працездатності, чол	2	1	1
Число потерпілих з смертельним наслідком, чол	-	-	-
Кількість днів непрацездатності, днів	80	40	35
Показник частоти травматизму	6,17	2,99	2,84
Показник важкості травматизму	40	40	35
Показник непрацездатності	246,9	119,4	99,43

У господарстві на відповідному рівні організовані всі виробничі процеси та побут працівників для підвищення продуктивності праці. Для безпечної роботи персоналу з працівниками проводяться інструктажі по охороні праці. На кожному об'єкті та на робочих місцях розміщено інструктажі з вимогами техніки безпеки.

Для профілактики виробничого травматизму у господарстві впроваджують нові технології які сприяють охороні праці. На відповідних об'єктах впроваджують автоматичні блокуючі пристрої, створюють місцеву вентиляцію і систему кондиціонування повітря, освітлення окремих робочих місць на даний момент перебуває у належному стані, за рахунок модернізації освітлювального обладнання. Аналіз стану виробничого травматизму проводиться щорічно і за остання три роки наведені у таблиці 5.2.

4.2 Розробка заходів щодо покращення стану охорони праці

Розрізняють такі основні заходи щодо покращення стану охорони праці у господарстві:

- обладнати кабінет з охорони праці, з метою ефективного навчання персоналу, встановити необхідні плакати, стенди;
- удосконалення нормативної бази з питань охорони праці;
- укомплектування щитів пожежної безпеки ящиками з піском і необхідним інвентарем;
- встановлення відсутності освітлювальних приладів, покращення освітленості робочих мість;
- відновлення заземлення корпусів та відновити пошкоджену ізоляцію струмоведучих частин електроустановок;
- забезпечення працівників ЗІЗ ;
- покращити природу і при необхідності створити штучну вентиляцію;
- професійний добір працівників з окремих професій;
- провести паспортизацію та атестацію необхідних робочих місць.

4.3 Пожежна безпека

Правовою основою діяльності в галузі пожежної безпеки є Конституція, Закон України „Про пожежну безпеку”, та інші закони, постанови, укази.

Попередження розповсюдження пожеж, в основному забезпечується пожежною безпекою будівель і споруд і забезпечується; правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівель та споруд, розташування приміщень з урахуванням вимог пожежної безпеки, встановлення протипожежних перешкод, проектування шляхів евакуації. Згідно діючого законодавства відповідальність за утримання промислового підприємства у

належному протипожежному стані покладається безпосередньо на керівника підприємства.

Власником розробленні комплексні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки, розробленні та затвердженні положення, інструкції, інші нормативні акти, що діють в межах підприємства, здійснює постійний контроль за їх додержанням, забезпечено додержання протипожежних вимог приписів і постанов органів державного пожежного нагляду, утримання в справному стані засобів протипожежного захисту, пожежну безпеку, обладнання та інвентар.

Для запобігання пожежам на складах нафтопродуктів останні зберігають у спеціально обладнаних резервуарах, які встановлені на фундаментах. Усі заправні ємності заземлені, а вся територія нафтоскладу обнесена земляним валом.

4.4 Розробка заходів щодо захисту цивільного населення

Забезпечення захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій є одним з найважливіших завдань не лише підприємства, але й цілої держави.

Актуальність проблеми забезпечення природо-техногенної безпеки населення і території зумовлена тенденціями зростання втрат людей і шкоди територіям, що спричиняються небезпечними природними явищами, промисловими аваріями і катастрофами.

Забезпечення безпеки та захисту населення, об'єктів економіки і національного надбання держави від негативних наслідків надзвичайних ситуацій повинно розглядатися як невід'ємна частина державної політики національної безпеки і державного будівництва, як одна з найважливіших функцій центральних органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, місцевих державних адміністрацій, виконавчих органів рад.

Захист населення є системою загальнодержавних заходів, які реалізуються центральними і місцевими органами виконавчої влади, виконавчими органами влад, органами управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення, підпорядкованими їм силами та підприємств, що забезпечують виконання організаційних, інженерно-технічних, санітарно-гігієнічних, протиепідемічних та інших заходів у сфері запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Загрози життєво важливих інтересів громадян, держави, суспільства поділяються на зовнішні та внутрішні і виникають під час надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру та воєнних конфліктів.

Зовнішні загрози безпосередньо пов'язані з безпекою життєдіяльності населення і держави у разі розв'язання сучасної війни або локальних збройних конфліктів, виникнення глобальних техногенних екологічних катастроф за межами України, які можуть спричинити негативний вплив на населення та територію держави.

Внутрішні загрози пов'язані з надзвичайними ситуаціями техногенного і природного характеру або можуть бути спровоковані терористичними діями.

Принципи захисту впливають з основних положень Женевської конвенції щодо захисту жертв війни та додаткових протоколів до неї, можливого характеру воєнних дій, реальних можливостей держави щодо створення матеріальної бази захисту. З метою захисту населення, зменшення втрат та шкоди економіці в разі виникнення надзвичайних ситуацій має право проводитися спеціальний комплекс заходів.

Оповіщення та інформування, яке досягається завчасним створенням і підтримкою в постійній готовності загальнодержавної, територіальних та об'єктових систем оповіщення населення.

Спостереження і контроль за довкіллям, продуктами харчування і водою забезпечується створенням і підтримкою в постійній готовності загальнодержавної і територіальних систем спостереження і контролю з

включенням до існуючих сил та засобів контролю незалежно від підпорядкованості.

Укриття в захисних спорудах, якому підлягає усе населення відповідно до приналежності, досягається створенням фонду захисних споруд.

Евакуаційні заходи, які проводяться в містах та інших населених пунктах, які мають об'єкти підвищеної небезпеки, а також у воєнний час, основним способом захисту населення є евакуація і розміщення його у позаміській зоні.

Інженерний захист проводиться з метою виконання вимог ІТЗ із питань забудови міст, розміщення ПНО, будівлі будинків, інженерних споруд та інше.

Медичний захист проводиться для зменшення ступеня ураження людей, своєчасного надання допомоги постраждалим та їх лікування, забезпечення епідеміологічного благополуччя в районах надзвичайних ситуацій.

Біологічний захист включає своєчасне виявлення чинників біологічного зараження, їх характеру і масштабів, проведення комплексу адміністративно-господарських, режимно-обмежувальних і спеціальних протиепідемічних та медичних заходів.

Радіаційний і хімічний захист включає заходи щодо виявлення і оцінки радіаційної та хімічної обстановки, організацію і здійснення дозиметричного та хімічного контролю, розроблення типових режимів радіаційного захисту, забезпечення засобами індивідуального захисту, організацію і проведення спеціальної обробки .

5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОПТИМІЗАЦІЇ

Оцінка ефективності системи

Розрахуємо орієнтовну частку покриття споживання від сонячної енергії (літній період):

$$K_{\text{сонця}} = \frac{P_{\text{сб}} \cdot H \cdot \eta_{\text{панель}} \cdot \eta_{\text{інв}}}{E} = \frac{14 \cdot 4.5 \cdot 0.18 \cdot 0.9}{10} \approx 1.02$$

Отже, система здатна повністю забезпечити енергопотребу майстерні влітку без підключення до мережі.

У зимовий період цей коефіцієнт зменшиться приблизно до 0.4–0.5, тому передбачено резервне живлення від мережі або генератора.

Таблиця 5.1- Економічна оцінка оптимізації

Компонент	Кількість	Вартість за одиницю, \$	Сума, \$
Сонячні панелі 550 Вт	26 шт.	100	2600
Гібридний інвертор 10 кВт	1	1200	1200
АКБ LiFePO ₄ 48В 300А·год	1	2500	2500
Контролер/автоматика/кабелі	-	700	700
Разом:			≈ 7000 \$

З урахуванням середньої вартості електроенергії 0.25 \$/кВт·год, термін окупності системи становитиме 6–7 років, при цьому система забезпечує повну енергетичну автономність та резерв живлення у критичних ситуаціях.

Оптимізація резервної системи електропостачання на базі сонячних батарей передбачає комплексний підхід, що враховує енергетичний баланс, умови експлуатації та надійність компонентів.

Проведений розрахунок показує, що для майстерні з середнім споживанням $10 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на добу оптимальним рішенням є гібридна система потужністю 14 кВт з акумулятором $300 \text{ А} \cdot \text{год}$. Вона забезпечує:

- повну автономність у літній період;
- резервне живлення у разі відключення мережі;
- можливість розширення потужності у майбутньому.

Таким чином, застосування оптимізованої гібридної сонячної системи значно підвищує надійність та енергоефективність резервного електропостачання електротехнічної майстерні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Було проведено комплексний аналіз систем електропостачання, що використовують сонячну енергію, та розглянуто їхні типи, конструктивні особливості й методи оптимізації для підвищення надійності резервного живлення електротехнічної майстерні.

У підпункті 1.1 розглянуто типи та характеристики сучасних сонячних батарей, зокрема монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Встановлено, що для умов України, а особливо для м. Львів, найефективнішими є монокристалічні кремнієві панелі з ККД 18–22 %, які забезпечують стабільну роботу навіть при помірному освітленні.

У підпункті 1.2 наведено типи систем електропостачання на базі сонячних батарей, зокрема автономні, мережеві та гібридні. Визначено, що гібридна система є найоптимальнішою для електротехнічної майстерні, оскільки вона дозволяє працювати як від сонячних панелей, так і від мережі або акумуляторів, забезпечуючи високу надійність і гнучкість роботи.

У підпункті 2.3 виконано оптимізацію резервної системи, у результаті якої встановлено, що для майстерні з добовим енергоспоживанням доцільно застосувати:

- сонячні панелі сумарною потужністю 14 кВт,
- акумуляторну батарею 300 А·год,
- гібридний інвертор потужністю 10–15 кВт.

Проведені розрахунки показали, що така система забезпечує повну автономність у літній період, знижує залежність від централізованої енергомережі та підвищує рівень енергетичної безпеки об'єкта.

З економічної точки зору, термін окупності системи становить приблизно 6–7 років, що є прийнятним показником для сучасних відновлюваних технологій. Крім того, система виконує функцію резервного джерела живлення, що особливо важливо в умовах можливих перебоїв

електропостачання, спричинених воєнними діями чи аваріями на енергетичній інфраструктурі.

Таким чином, розроблена система є технічно доцільним і економічно ефективним рішенням для забезпечення стабільного енергопостачання електротехнічної майстерні з використанням сонячної енергії. Отримані результати створюють основу для подальшого моделювання, техніко-економічного аналізу та впровадження системи резервного живлення у практичних умовах.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Безруких П.П. Економічні проблеми нетрадиційної енергетики / Енергія: Екон., техн., екол. 1995. №8.
2. Богуславский Е.И., Виссарионов В.И., Елистратов В.В., Кузнєцов М.В. Умови ефективності і комплексного використання геотермальної сонячної і вітрової енергії // Міжнародний симпозіум "Паливно-енергетичні ресурси ". Київ, 1995.
3. Дьяков А.Ф., Прокурорів Н.С., Перминов Е.М. Калмицька дослідна електростанція / Електричні станції 1995. № 2.
4. Логинов В.Б. Новак Ю.И. Високоєфективні вітроенергетичні установки / Проблеми машинобудування й автоматизації. 1995. №1-8.
5. Ципльонков П. С. Організація і планування електрифікації сільськогосподарського виробництва / П. С. Ципльонков. – К. : Вища школа 1980. – 544 с.
6. Романюк Ю. В. Електричні системи та мережі : навч. посіб. / Ю. В. Романюк. – Івано-Франківськ : Факел, 1997. – 248 с.
7. Саенко, Ю. Л. Реактивна потужність в системах електропостачання і нелінійним навантаженням / Ю. Л. Саенко// Автореф. дис. на здобуття наук, ступеня д-ра техн. наук, спец. 05.09.05 - теоретична електротехніка, НУ «Львівська політехніка», Львів, 2003.– 36 с.
8. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: підручник / М. С. Сегеда. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2007.– 488 с
9. Костін, М. О. Миттєва реактивна потужність у системах електричного транспорту постійною струму / М. О. Костін, О. І. Саблін, О. Г. Шейкіна, А. В. Петров // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб., 2007. – С. 3-8.
10. Щербина О. Енергія для всіх : технічний довідник / О. Щербина – Ужгород, вид-во В. Падяка, 2000. – 200 с.
11. Якимець В. Т. Методичні рекомендації до дипломного проектування для

студентів напрямку підготовки “Енергетика та електротехнічні системи в АПК” ОКР ”Бакалавр” / В. Т. Якимець, С. В. Сиротюк. – Львів: Львівський НАУ, 2009. – 40 с.

12. Добровольська Л. Н. Про стан автоматизації компенсувальних установок і перспективи їх оснащення пристроями нового технічного рівня / Л. Н. Добровольська, І. О. Віт, І. П. Сосенко // Промелектро : Пром. електроенергетика та електротехніка. – 2008. – № 4. – С. 26 – 30.