

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____/Каплун В.В./
(підпис)

_____/Антипов Є.О./
(підпис)

«____» _____ 2026 р.

«____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Обґрунтування енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства з метою продажу електроенергії за зеленим тарифом»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В. І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Макаревич С.С.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Бочко А.О.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н доцент Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«___» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Бочку Артему Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Обґрунтування енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства з метою продажу електроенергії за зеленим тарифом» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С».
Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: ПУЕ; ДСТУ, ДБН, каталоги електрообладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Огляд застосування відновлювальних джерел енергії на базі фотоелектричних систем; 2. Розробка енергоефективної системи електроживлення приватного домоволодіння; 3. Розрахунок параметрів фотоелектричної системи; 4. Дослідження ефективності роботи фотоелектричної системи; 5. Охорона праці та техніко-економічне обґрунтування.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному середовищі MS Power Point

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи	_____	<u>Макаревич С.С.</u>
	(підпис)	(ПІБ)
Завдання прийняв до виконання	_____	<u>Бочко А.О.</u>
	(підпис)	(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» виконана у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, м.Київ, 2026 рік.

Метою магістерської роботи є розроблення та техніко-економічне обґрунтування енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства на основі фотоелектричної станції з акумуляторною системою накопичення енергії, а також оцінювання ефективності її функціонування в умовах сучасного електроспоживання та можливості передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку фотоелектричних систем електроживлення;
- дослідити конструктивні особливості та принципи роботи основних елементів фотоелектричних систем;
- проаналізувати режими роботи мережевих та гібридних фотоелектричних систем;
- обґрунтувати структуру енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства;
- виконати розрахунок основних параметрів фотоелектричної станції;
- здійснити вибір фотоелектричних модулів, гібридного інвертора та акумуляторної системи накопичення енергії;
- провести розрахунок режимів роботи та резервування навантаження;
- оцінити прогнозовану генерацію електроенергії та ефективність роботи системи;
- виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження проєкту.

Об'єктом дослідження є система електроживлення приватного домогосподарства з використанням фотоелектричних модулів та акумуляторної системи накопичення енергії.

Предметом дослідження є процеси перетворення, накопичення, розподілу та використання електричної енергії в гібридній фотоелектричній системі електроживлення приватного домогосподарства.

У роботі виконано аналіз сучасних підходів до побудови енергоефективних систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії. Розглянуто особливості застосування фотоелектричних систем у приватному секторі, проаналізовано принципи роботи та технічні характеристики основного обладнання.

Розроблено структуру гібридної фотоелектричної системи потужністю 46,4 кВт з використанням фотоелектричних модулів JinKo Solar та гібридного інвертора Deue. Виконано розрахунок площі фотоелектричного поля, конфігурації стрингів, параметрів акумуляторної системи накопичення енергії, кабельних ліній та захисного обладнання.

Проведено дослідження прогнозованої генерації електроенергії, режимів роботи фотоелектричної системи та особливостей використання акумуляторної системи для резервного електроживлення. Виконано оцінювання економічної ефективності проєкту та визначено орієнтовний термін окупності системи.

Окрему увагу приділено питанням охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки, блискавкозахисту та заземлення фотоелектричної системи.

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки обсягом 80 сторінок формату А4, що містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та графічні матеріали.

Ключові слова: фотоелектрична система, сонячна електростанція, гібридний інвертор, акумуляторна батарея, відновлювані джерела енергії, електроживлення, енергетична незалежність, генерація електроенергії, зелений тариф, економічна ефективність.

Зміст

Реферат	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	10
1.1. Огляд стану та тенденцій розвитку сонячної енергетики.....	10
1.2. Аналіз існуючих типів фотоелектричних систем	11
1.3. Аналіз проблем ефективності роботи фотоелектричних систем	14
1.4. Обґрунтування напрямку дослідження та постановка задачі	16
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПРИВАТНОГО ДОМОВОЛОДІННЯ	19
2.1. Характеристика об'єкта проектування	19
2.2. Розробка структури фотоелектричної системи.....	20
2.3. Обґрунтування вибору фотоелектричних модулів.....	23
2.4. Обґрунтування вибору гібридного інвертора	25
2.5. Обґрунтування вибору акумуляторної системи.....	28
2.6. Аналіз режимів роботи фотоелектричної системи	31
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	35
3.1. Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної станції	35
3.2. Розрахунок площі фотоелектричного поля	36
3.3. Розрахунок конфігурації стрингів фотоелектричних модулів	38
3.4. Перевірка параметрів МРРТ та режимів роботи інвертора	40
3.5. Розрахунок акумуляторної системи накопичення енергії	42
3.6. Вибір кабельної продукції та захисного обладнання	44
3.7. Вибір системи обліку та моніторингу електроенергії.....	49
Висновки до розділу 3	51

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	52
4.1. Аналіз прогнозованої генерації електроенергії	52
4.2. Дослідження режимів роботи фотоелектричної системи	54
4.3. Аналіз роботи акумуляторної системи	55
4.4. Оцінка економічної ефективності роботи фотоелектричної системи	57
Висновки до розділу 4	60
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	61
5.1. Аналіз умов праці під час монтажу та експлуатації фотоелектричної системи	61
5.2. Заходи з електробезпеки та пожежної безпеки.....	63
5.3. Блискавкозахист та система заземлення фотоелектричної системи.....	65
5.4. Техніко-економічне обґрунтування проєкту.....	67
5.5. Розрахунок терміну окупності фотоелектричної системи.....	69
Висновки до розділу 5	70
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- BMS — система керування акумуляторами;
- EMS — система енергоменеджменту;
- PV — photovoltaic (фотоелектричний);
- АКБ — акумуляторна батарея;
- СЕС — сонячна електростанція;
- ФЕП — фотоелектричний перетворювач;
- ФЕМ — фотоелектричний модуль;
- ККД — коефіцієнт корисної дії;
- ПУЕ — правила улаштування електроустановок;
- ПЗВ — пристрій захисного відключення;
- ПС — підстанція;
- ЕРС — електрорушійна сила;
- ЗЕС — зовнішня електрична мережа;
- ІБП — джерело безперебійного живлення;
- MPPT — відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking);
- ШІМ — широтно-імпульсна модуляція;
- DC — постійний струм;
- AC — змінний струм;
- РЗА — релейний захист і автоматика;
- НД — нормативна документація;
- КЗ — коротке замикання;
- ТП — трансформаторна підстанція.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетичної галузі питання підвищення енергоефективності та впровадження відновлюваних джерел енергії набувають особливої актуальності. Зростання вартості електричної енергії, підвищення навантаження на енергосистему та необхідність забезпечення енергетичної незалежності споживачів зумовлюють активне впровадження фотоелектричних систем у приватному та комерційному секторі. Особливого значення набуває використання гібридних сонячних електростанцій, які здатні не лише забезпечувати власні потреби об'єкта в електричній енергії, але й накопичувати надлишкову енергію та здійснювати її передачу до загальної електромережі за умовами «зеленого тарифу».

Для приватних домогосподарств застосування гібридних фотоелектричних систем дозволяє зменшити залежність від централізованого електропостачання, забезпечити резервне живлення критично важливих споживачів та підвищити загальний рівень енергоефективності об'єкта. Крім того, використання акумуляторних систем накопичення енергії дозволяє підвищити стабільність роботи системи електроживлення в умовах аварійних або планових відключень електроенергії.

Актуальність роботи також обумовлена необхідністю технічно обґрунтованого вибору обладнання фотоелектричної станції, визначення оптимальної конфігурації сонячних панелей, аналізу режимів роботи гібридного інвертора та оцінки економічної доцільності впровадження системи з урахуванням особливостей об'єкта проєктування.

Об'єктом дослідження є система електроживлення приватного домогосподарства з використанням відновлюваних джерел енергії.

Предметом дослідження є процес проєктування та обґрунтування параметрів гібридної фотоелектричної системи з можливістю накопичення та продажу електричної енергії за «зеленим тарифом».

Метою магістерської роботи є обґрунтування енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства на базі гібридної фотоелектричної станції з накопиченням електричної енергії та можливістю передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз сучасних фотоелектричних систем та особливостей їх використання;
- визначити вихідні параметри об'єкта проектування;
- виконати розрахунок параметрів фотоелектричної станції;
- здійснити вибір основного обладнання гібридної системи;
- визначити оптимальну конфігурацію сонячних панелей та акумуляторних батарей;
- проаналізувати режими роботи системи електроживлення;
- виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження системи;
- розглянути питання охорони праці та електробезпеки під час експлуатації обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих технічних рішень під час проектування та впровадження гібридних сонячних електростанцій для приватних домогосподарств та об'єктів із підвищеними вимогами до надійності електропостачання.

Наукова новизна полягає в удосконаленні підходу до вибору параметрів гібридної фотоелектричної системи приватного домогосподарства шляхом комплексного врахування режимів генерації, акумуляування електроенергії та можливості передачі надлишкової електроенергії до мережі.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

1.1. Огляд стану та тенденцій розвитку сонячної енергетики

Відновлювана енергетика в останні роки стала одним із найбільш важливих напрямків розвитку енергетичної галузі. Постійне зростання вартості електроенергії, збільшення навантаження на електричні мережі та необхідність підвищення енергетичної незалежності сприяють активному впровадженню альтернативних джерел енергії.

Серед усіх видів відновлюваної енергетики найбільшого розвитку набула сонячна енергетика. Це пов'язано зі зниженням вартості фотоелектричних модулів, підвищенням їх коефіцієнта корисної дії та можливістю використання як для промислових об'єктів, так і для приватних домогосподарств.

У багатьох країнах світу сонячні електростанції вже стали важливою частиною енергетичної системи. Особливо активно сонячна енергетика розвивається в Китаї, США, Німеччині та Індії. Значне збільшення потужностей фотоелектричних станцій пояснюється не лише розвитком технологій, а і державною підтримкою відновлюваної енергетики.

Для України розвиток сонячної енергетики також має важливе значення. В умовах нестабільної роботи енергосистеми та зростання тарифів на електроенергію використання фотоелектричних систем дозволяє зменшити залежність від зовнішнього електропостачання та частково забезпечити власні потреби в електроенергії.

Одним із факторів розвитку приватних сонячних електростанцій стало впровадження «зеленого тарифу», який дозволяє передавати надлишок виробленої електроенергії до загальної мережі. Це сприяло активному встановленню дахових сонячних електростанцій у приватному секторі.

Щорічні встановлення сонячних фотоелектричних систем за регіонами



Рис. 1.1. Встановлення СЕС за регіонами

Важливою перевагою сучасних фотоелектричних систем є можливість роботи разом із системами накопичення енергії. Використання акумуляторних батарей дозволяє накопичувати надлишкову електроенергію та використовувати її в періоди недостатньої генерації або при аварійному відключенні мережі.

У сучасних умовах найбільш перспективними є гібридні фотоелектричні системи, які поєднують сонячні панелі, акумуляторні батареї та гібридні інвертори. Такі системи забезпечують більш ефективне використання виробленої електроенергії та дозволяють підвищити надійність електроживлення об'єкта.

Попри активний розвиток сонячної енергетики, існують і певні проблеми, пов'язані з нестабільністю сонячної генерації, впливом погодних умов та необхідністю правильного вибору обладнання. Саме тому питання підвищення ефективності фотоелектричних систем сьогодні є одним із актуальних напрямків розвитку відновлюваної енергетики.

1.2. Аналіз існуючих типів фотоелектричних систем

Фотоелектричні системи можуть працювати в різних режимах залежно від умов експлуатації, типу об'єкта та способу підключення до електричної мережі. Найбільш поширеними є мережеві, автономні та гібридні системи.

Мережеві фотоелектричні системи працюють паралельно із зовнішньою електричною мережею. У таких системах вироблена електроенергія використовується для живлення навантаження, а її надлишок може передаватися до загальної мережі. Основною перевагою мережевих систем є відносно проста конструкція та нижча вартість у порівнянні з іншими типами систем.

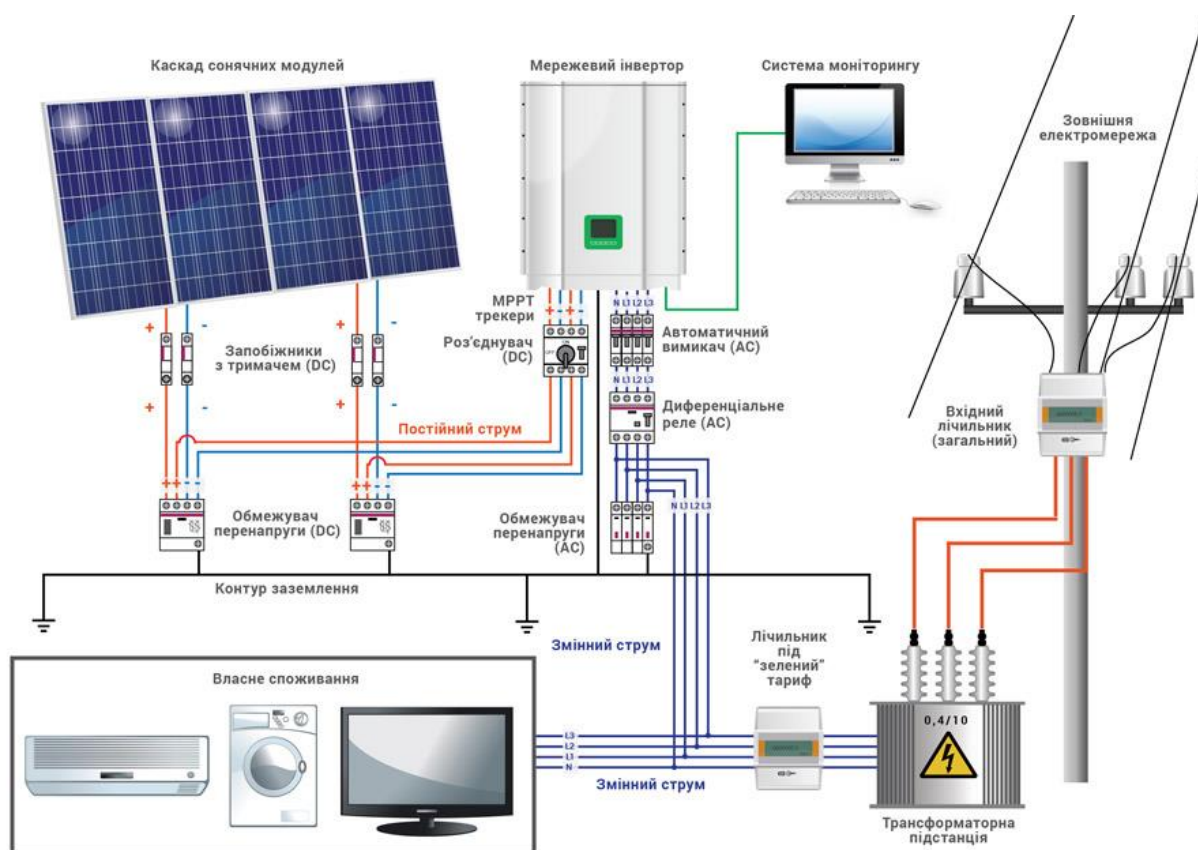


Рис. 1.2. Схема мережевої фотоелектричної системи

Недоліком мережевих станцій є відсутність резервного живлення при зникненні напруги у зовнішній мережі. У більшості випадків мережевий інвертор автоматично припиняє роботу, тому електропостачання об'єкта повністю відключається.

Автономні фотоелектричні системи використовуються переважно на об'єктах, які не мають підключення до централізованої мережі. У таких системах обов'язково використовуються акумуляторні батареї, які накопичують вироблену електроенергію для подальшого використання.

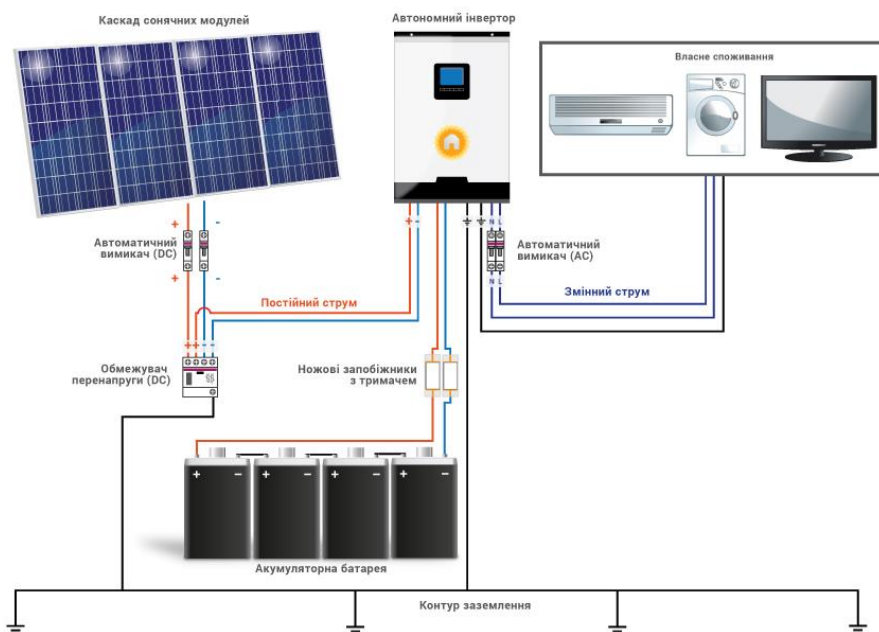


Рис. 1.3. Схема автономної фотоелектричної системи

Перевагою автономних систем є можливість повністю незалежної роботи від зовнішньої мережі. Разом із тим для забезпечення стабільного електроживлення необхідно використовувати акумуляторні батареї великої ємності, що значно збільшує вартість системи.

У сучасних умовах найбільшого поширення набули гібридні фотоелектричні системи. Вони поєднують переваги мережових та автономних систем і дозволяють працювати як паралельно із зовнішньою мережею, так і в режимі резервного живлення.

У складі гібридних систем використовуються гібридні інвертори та акумуляторні батареї. Такі системи дозволяють накопичувати надлишкову електроенергію та використовувати її у вечірній час або під час аварійних відключень електропостачання.

Гібридні системи є більш складними та дорогими у порівнянні зі звичайними мережевими станціями, проте вони забезпечують вищий рівень енергетичної незалежності та стабільності електроживлення.

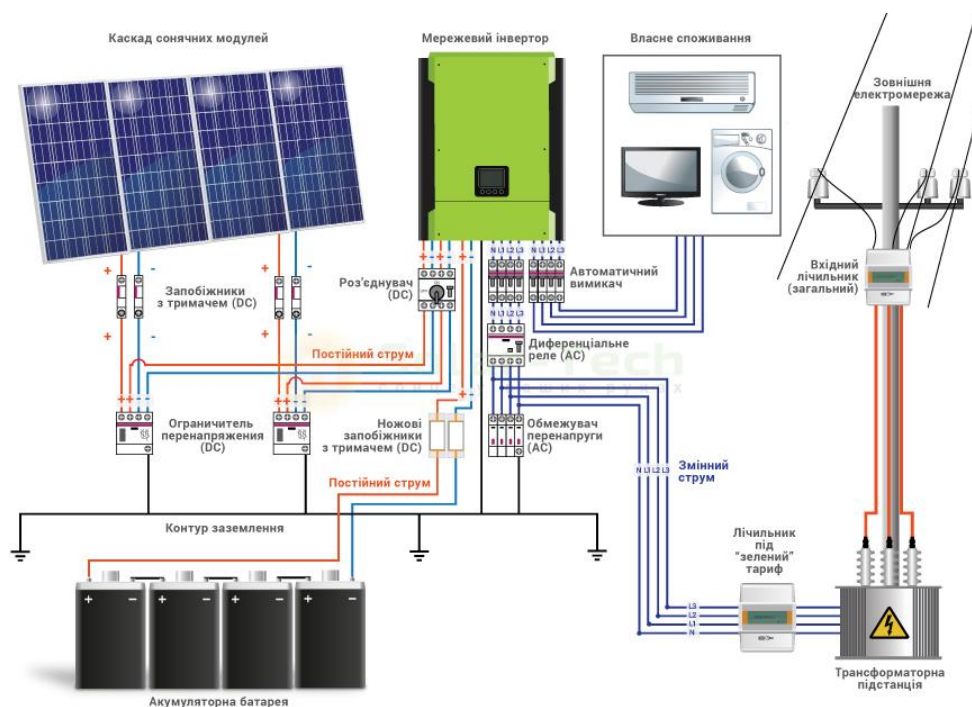


Рис. 1.4. Схема гібридної фотоелектричної системи

Для приватних домогосподарств використання саме гібридних фотоелектричних систем є одним із найбільш перспективних рішень. Це пов'язано з можливістю забезпечення резервного живлення, зменшенням споживання електроенергії із зовнішньої мережі та ефективним використанням сонячної генерації.

1.3. Аналіз проблем ефективності роботи фотоелектричних систем

Незважаючи на активний розвиток сонячної енергетики, ефективність роботи фотоелектричних систем значною мірою залежить від зовнішніх факторів та правильності підбору обладнання. Однією з основних проблем є нестабільність генерації електроенергії, оскільки виробіток напругу залежить від рівня сонячного випромінювання та погодних умов.

Продуктивність фотоелектричних модулів змінюється протягом доби та залежить від пори року. Найбільший рівень генерації спостерігається у денний період при високій сонячній активності, тоді як у ранкові та вечірні години потужність системи значно знижується.

Суттєвий вплив на ефективність роботи фотоелектричних модулів має температура навколишнього середовища. При підвищенні температури зменшується напруга модулів та знижується їх фактична потужність.

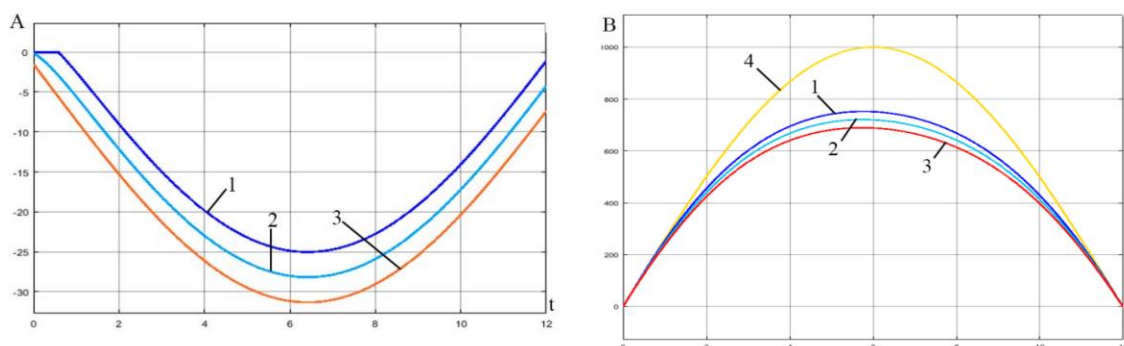


Рис. 1.5: термічне зниження потужності за швидкості вітру 0,6 м/с; А — відсоток зниження потужності; В — вироблення електроенергії; t — час, 1 — початкова температура модуля 15°C ; температура повітря — 21°C ; 2 — початкова температура модуля — 20°C , температура повітря — 28°C ; 3 — початкова температура модуля — 23°C , температура повітря — 35°C ; 4 — генерація без урахування термічного зниження потужності

Ще однією проблемою є затінення фотоелектричних модулів. Навіть часткове затінення окремих елементів може призвести до помітного зниження продуктивності всієї системи. Причинами затінення можуть бути сусідні будівлі, дерева, елементи покрівлі або неправильне розміщення панелей.

На ефективність роботи також впливають втрати в кабельних лініях, інверторному обладнанні та акумуляторних системах. При неправильному виборі перерізу кабелів або невідповідності параметрів обладнання частина виробленої енергії втрачається під час передачі та перетворення електроенергії.

Окрему увагу необхідно приділяти правильному вибору інвертора та конфігурації стрингів. Невідповідність робочих параметрів фотоелектричних модулів характеристикам інвертора може призвести до нестабільної роботи МРРТ-трекерів та зниження ефективності генерації.

Для гібридних систем важливим фактором є також ефективність роботи акумуляторних батарей. Неправильно підібрана ємність акумуляторної системи може призвести до недостатнього резервування електроживлення або до неефективного використання накопиченої енергії.

У сучасних фотоелектричних системах значна увага приділяється автоматизації та моніторингу роботи обладнання. Системи моніторингу дозволяють контролювати параметри генерації, виявляти втрати потужності та своєчасно виявляти несправності обладнання.

Таким чином, ефективність роботи фотоелектричної системи залежить не лише від потужності встановлених сонячних модулів, а і від правильного вибору конфігурації системи, умов розміщення обладнання та режимів експлуатації.

1.4. Обґрунтування напрямку дослідження та постановка задачі

Проведений аналіз показав, що використання фотоелектричних систем є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасних систем електроживлення. Особливо актуальним це питання є для приватних домогосподарств, де спостерігається постійне зростання споживання електроенергії та необхідність забезпечення резервного живлення.

У сучасних умовах найбільш доцільним рішенням є використання гібридних фотоелектричних систем, які дозволяють не лише генерувати електроенергію, але й накопичувати її за допомогою акумуляторних батарей. Такі системи забезпечують підвищення енергетичної незалежності об'єкта та дозволяють більш ефективно використовувати вироблену електроенергію.

Для підвищення ефективності роботи фотоелектричної системи важливе значення має правильний вибір основного обладнання, конфігурації стрингів, параметрів акумуляторної системи та режимів роботи інвертора. Значний вплив на ефективність роботи також мають умови встановлення фотоелектричних модулів, орієнтація панелей та режим споживання електроенергії об'єкта.

У даній магістерській роботі розглядається гібридна фотоелектрична система приватного домогосподарства з можливістю продажу надлишкової електроенергії за «зеленим тарифом». Основою роботи є реальний проєкт фотоелектричної станції, що включає фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, акумуляторну систему накопичення енергії та систему моніторингу.

Основною задачею роботи є розробка енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства з аналізом режимів її роботи та обґрунтуванням вибору основного обладнання.

У процесі виконання роботи необхідно:

- проаналізувати особливості сучасних фотоелектричних систем;
- виконати вибір основного обладнання;
- провести розрахунок параметрів системи;
- дослідити режими роботи фотоелектричної станції;
- оцінити ефективність використання акумуляторної системи;
- виконати техніко-економічне обґрунтування проєкту.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування сучасних гібридних фотоелектричних систем для приватних домогосподарств та об'єктів із необхідністю резервного електроживлення.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено аналіз сучасного стану розвитку сонячної енергетики та особливостей використання фотоелектричних систем у системах електроживлення. Встановлено, що сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики як у світі, так і в Україні.

Розглянуто основні типи фотоелектричних систем та визначено, що для приватних домогосподарств найбільш доцільним рішенням є використання гібридних систем, які поєднують сонячні модулі, акумуляторні батареї та гібридні інвертори.

Проведений аналіз показав, що ефективність роботи фотоелектричних систем залежить від умов експлуатації, правильності вибору обладнання, конфігурації стрингів та режимів роботи системи. Важливий вплив на генерацію електроенергії мають температурні режими, затінення фотоелектричних модулів та параметри інверторного обладнання.

На основі проведеного аналізу визначено основний напрямок дослідження, який полягає у розробці енергоефективної гібридної системи електроживлення приватного домогосподарства з можливістю накопичення та продажу електроенергії за «зеленим тарифом».

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПРИВАТНОГО ДОМОВОЛОДІННЯ

2.1. Характеристика об'єкта проєктування

Об'єктом проєктування у даній магістерській роботі є приватне домогосподарство, для якого передбачається встановлення гібридної фотоелектричної системи з можливістю накопичення електричної енергії та продажу надлишку електроенергії за «зеленим тарифом».

Необхідність впровадження фотоелектричної системи обумовлена зростанням вартості електроенергії, підвищенням навантаження на електричну мережу та потребою у резервному електроживленні споживачів у випадку аварійних відключень.

Фотоелектрична система проєктується для встановлення на покрівлі будівлі. Під час проєктування враховуються конструктивні особливості даху, допустимі навантаження, орієнтація поверхонь покрівлі та можливість розміщення фотоелектричних модулів.

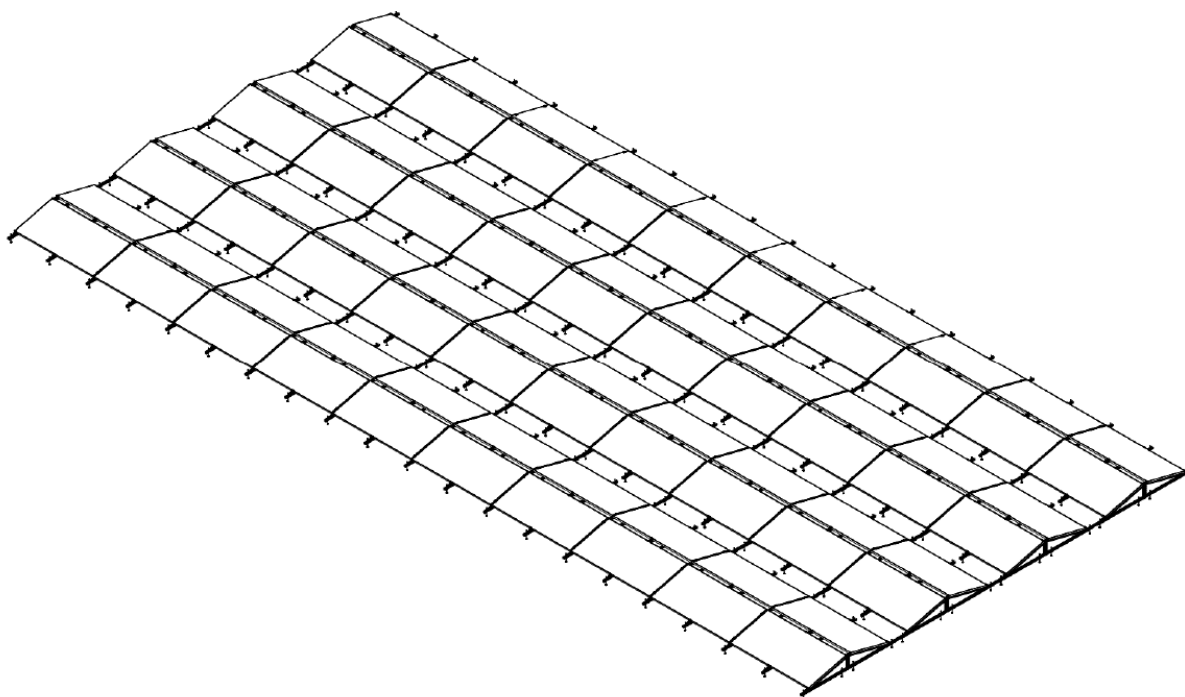


Рис. 2.1 Розкладка сонячних панелей в системі схід-захід

Основою системи є гібридна фотоелектрична станція, до складу якої входять фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, акумуляторна система накопичення енергії, система захисту та система моніторингу параметрів роботи.

Для генерації електричної енергії у проєкті використовуються фотоелектричні модулі JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR потужністю 580 Вт. Загальна кількість модулів становить 80 шт., а встановлена потужність фотоелектричної станції складає 46,4 кВт.

У якості основного інверторного обладнання використовується трифазний гібридний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт. Використання гібридного інвертора дозволяє забезпечити роботу системи як у мережевому режимі, так і в режимі резервного живлення.

Для накопичення електричної енергії передбачено використання акумуляторної системи Deye BOS-GM5.1 загальною ємністю 40,96 кВт·год. Акумуляторна система забезпечує накопичення надлишкової електроенергії та її подальше використання при недостатній генерації або під час аварійного вимкнення зовнішньої мережі.

Особливістю даного проєкту є використання гібридної системи електроживлення з можливістю резервування навантаження та продажу надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі. Таке рішення дозволяє підвищити енергетичну незалежність об'єкта та ефективність використання сонячної генерації.

2.2. Розробка структури фотоелектричної системи

Під час розробки системи електроживлення для приватного домогосподарства було обрано гібридну схему побудови фотоелектричної станції. Такий тип системи дозволяє одночасно використовувати сонячну генерацію, акумуляторне накопичення енергії та зовнішню електричну мережу.

Основною перевагою гібридної системи є можливість забезпечення резервного живлення споживачів у разі аварійного вимкнення зовнішнього

електропостачання. Крім того, система дозволяє накопичувати надлишкову електроенергію в акумуляторних батареях та передавати її до зовнішньої мережі за «зеленим тарифом».

До складу проєктованої системи входять:

- фотоелектричні модулі;
- гібридний інвертор;
- акумуляторна система накопичення енергії;
- система автоматичного захисту;
- система моніторингу;
- вузол комерційного обліку електроенергії.

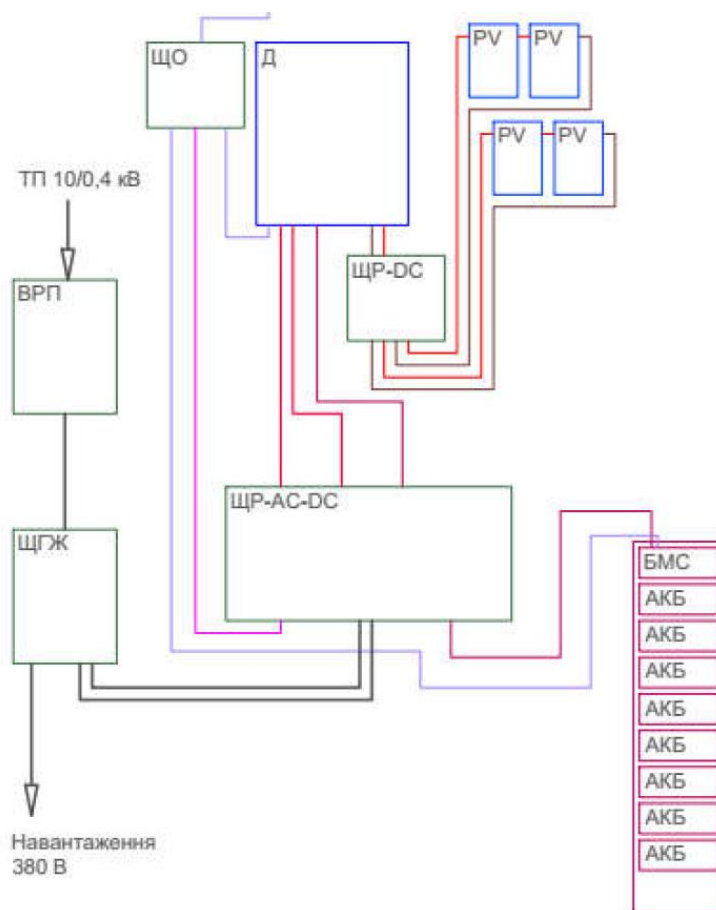


Рис. 2.2. Структурна схема фотоелектричної системи

Фотоелектричні модулі здійснюють перетворення сонячної енергії у постійний електричний струм. Вироблена електроенергія надходить до

гібридного інвертора, який забезпечує перетворення постійного струму у змінний та узгодження роботи системи із зовнішньою мережею.

Гібридний інвертор є основним елементом системи керування енергетичними потоками. Він забезпечує живлення навантаження, заряд та розряд акумуляторних батарей, передачу надлишкової електроенергії до мережі та автоматичне перемикавання режимів роботи системи.

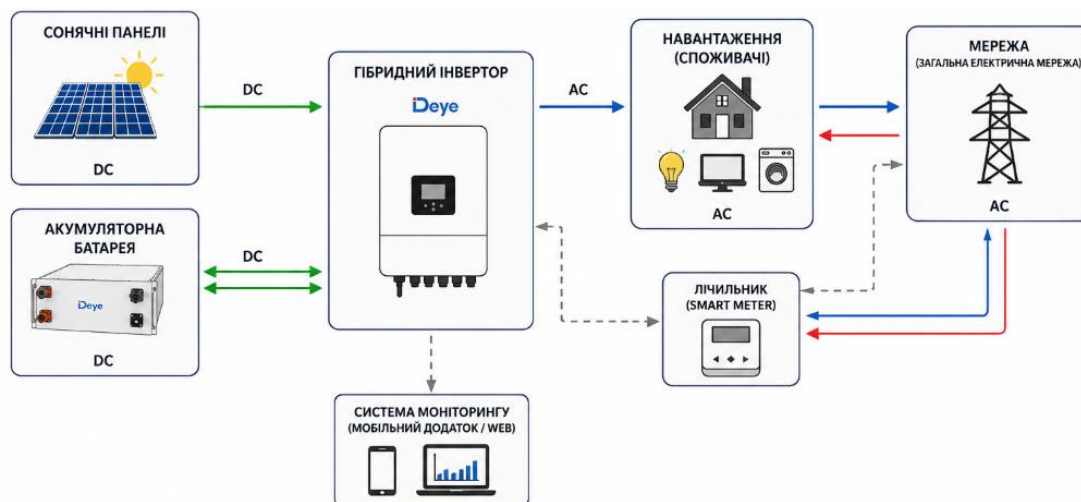


Рис. 2.3. Схема потоків енергії у гібридній системі

Акумуляторна система використовується для накопичення надлишкової електроенергії, виробленої фотоелектричними модулями. Накопичена енергія може використовуватись у вечірній час або при відсутності напруги у зовнішній мережі.

Для забезпечення безпечної роботи системи передбачається використання автоматичних вимикачів, пристроїв захисту від перенапруги та системи заземлення. Захисне обладнання забезпечує захист інвертора, акумуляторної системи та фотоелектричних модулів від аварійних режимів роботи.

Контроль параметрів роботи системи здійснюється за допомогою системи моніторингу, яка дозволяє контролювати генерацію електроенергії, рівень заряду акумуляторних батарей та режими роботи інвертора.

Розроблена структура фотоелектричної системи дозволяє забезпечити ефективне використання сонячної енергії, резервне живлення навантаження та

зменшення споживання електроенергії із зовнішньої мережі.

2.3. Обґрунтування вибору фотоелектричних модулів

Одним із основних елементів фотоелектричної системи є сонячні модулі, від параметрів яких залежить ефективність генерації електроенергії та загальна продуктивність системи. Під час вибору фотоелектричних модулів враховувались потужність, коефіцієнт корисної дії, температурні характеристики, надійність та можливість роботи у складі гібридної фотоелектричної системи. У проєкті використовуються фотоелектричні модулі JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR потужністю 580 Вт. Використання модулів великої потужності дозволяє зменшити загальну кількість панелей та оптимізувати площу їх розміщення на покрівлі будівлі.



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд фотоелектричного модуля

Фотоелектричні модулі даного типу виготовлені за технологією monocrystalline N-type, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та стабільну роботу при змінних погодних умовах. Однією з переваг модулів N-type є менша деградація характеристик у процесі експлуатації у порівнянні зі стандартними P-type модулями.

Основні технічні характеристики фотоелектричних модулів наведені у таблиці.

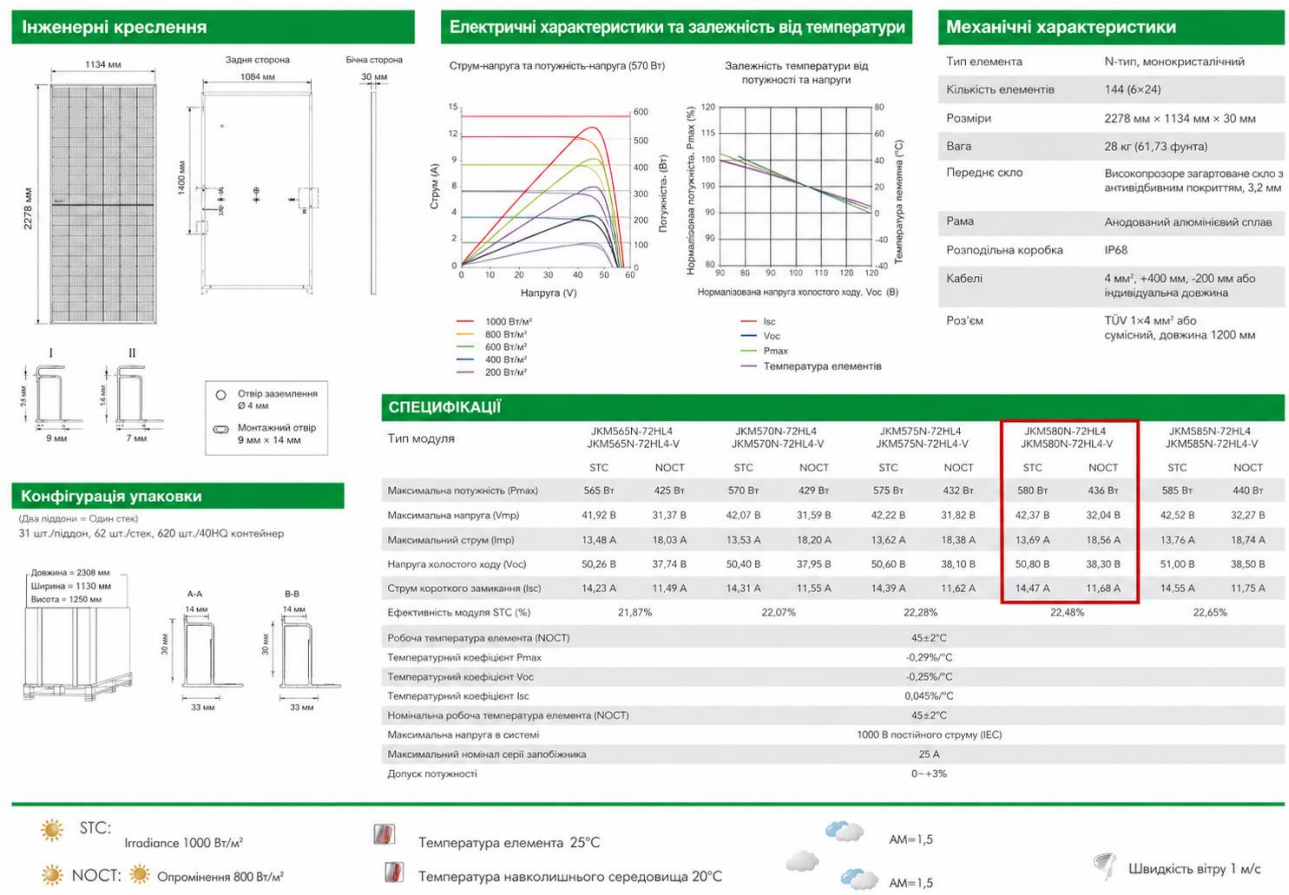


Рис. 2.5. Технічні характеристики фотоелектричних модулів

Під час вибору модулів також враховувались температурні режими роботи. Відомо, що при підвищенні температури ефективність фотоелектричних панелей знижується, тому важливим параметром є температурний коефіцієнт потужності. Обрані модулі мають відносно невелике зниження потужності при нагріванні, що позитивно впливає на стабільність генерації електроенергії у літній період.

Встановлення 80 фотоелектричних модулів дозволяє отримати сумарну встановлену потужність 46,4 кВт. Така потужність забезпечує покриття власного споживання електроенергії об’єкта та створює можливість передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

При виборі фотоелектричних модулів також враховувались механічні характеристики та допустимі навантаження. Оскільки встановлення панелей

передбачається на покрівлі будівлі, важливими параметрами є стійкість до вітрових та снігових навантажень.

Обрані фотоелектричні модулі відповідають вимогам проєкту та забезпечують необхідні параметри генерації електроенергії для роботи гібридної фотоелектричної системи.

2.4. Обґрунтування вибору гібридного інвертора

Одним із основних елементів гібридної фотоелектричної системи є інвертор, який забезпечує перетворення постійного струму, виробленого фотоелектричними модулями, у змінний струм для живлення навантаження та роботи із зовнішньою електричною мережею.

Для даного проєкту було обрано трифазний гібридний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт.

Вибір інвертора здійснювався з урахуванням технічних параметрів фотоелектричної станції, вимог до надійності електропостачання та можливості накопичення енергії. Аналіз технічних характеристик показав відповідність обраної моделі вимогам проєктованої системи та забезпечення ефективної роботи в різних режимах експлуатації.

Важливою особливістю гібридного інвертора є можливість одночасної роботи з фотоелектричними модулями, акумуляторними батареями та зовнішньою мережею. Інвертор автоматично керує потоками енергії залежно від режиму роботи системи та рівня генерації електроенергії.

Під час вибору інвертора враховувалась встановлена потужність фотоелектричної станції, яка становить 46,4 кВт. Потужність інвертора 50 кВт забезпечує необхідний запас для стабільної роботи системи та дозволяє уникнути перевантаження обладнання у періоди максимальної генерації.

Інвертор обладнаний декількома MPPT-трекерами, що дозволяє ефективно працювати зі стрінгами фотоелектричних модулів при різних умовах освітлення

та орієнтації панелей. Це особливо важливо для дахових фотоелектричних систем, де окремі групи модулів можуть працювати у різних режимах.

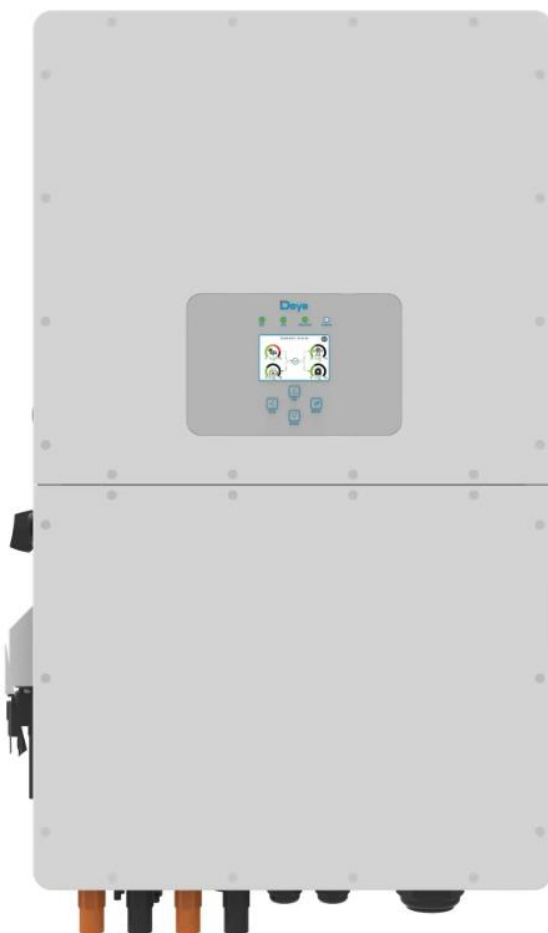


Рис. 2.6. Зовнішній вигляд гібридного інвертора Deye SUN-50K

Крім того, інвертор підтримує широкий діапазон вхідних напруг та має вбудовані функції захисту від перенапруги, перевантаження і короткого замикання. Це підвищує надійність роботи фотоелектричної системи та забезпечує стабільне електропостачання споживачів за різних умов експлуатації.

Основні технічні характеристики інвертора наведені у таблиці.

Ще однією перевагою обраного інвертора є можливість роботи в режимі резервного живлення. У випадку аварійного відключення зовнішньої мережі інвертор забезпечує автоматичне живлення відповідальних споживачів від фотоелектричних модулів та акумуляторної системи.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики інвертора

Модель	SUN-29-9K-SG01HP3 -EU-BM3	SUN-30K-SG01HP3 -EU-BM3	SUN-35K-SG01HP3 -EU-BM3	SUN-40K-SG01HP3 -EU-BM4	SUN-50K-SG01HP3 -EU-BM4
ДАНИ АКУМУЛЯТОРА					
Тип акумулятора	Літій-іонний				
Діапазон напруги акумулятора (В)	160-800				
Макс. струм заряду (А)	50+50				
Макс. струм розряду (А)	50+50				
Стратегія заряджання для літій-іонного акумулятора	Самоадаптація до BMS				
Кількість входів акумулятора	2				
PV ВХІДНІ ДАНІ (СТРИНГ)					
Макс. вхідна потужність постійного струму (Вт)	38870	39000	45500	52000	65000
Макс. вхідна напруга постійного струму (В)	1000				
Початкова напруга запуску (В)	180				
Діапазон напруги MPPT (В)	150-850				
Номінальна вхідна напруга постійного струму (В)	600				
Макс. робочий струм на один MPPT (А)	36+36+36			36+36+36+36	
Макс. струм короткого замикання на один MPPT (А)	55+55+55			55+55+55+55	
Кількість MPPT трекерів / кількість стрингів на один MPPT трекер	3/2+2+2			4/2+2+2+2	
АС ВИХІДНІ ДАНІ					
Номінальна вихідна активна потужність (Вт)	29900	30000	35000	40000	50000
Макс. повна вихідна потужність (ВА)	29900	33000	38500	44000	55000
Номінальний вихідний струм (А)	45.4/43.4	45.5/43.5	53.1/50.8	60.7/58	75.8/72.5
Макс. вихідний струм (А)	45.4/43.4	50/47.9	58.4/55.8	66.7/63.8	83.4/79.8
Макс. балансирний струм через мережу (А)	60	60	60	70	83.3
Макс. безперервний струм через резервний вихід (А)	200				
Піковий струм (поза мережею) (Вт)	1,5-кратна номінальна потужність, 10 с				
Діапазон регулювання коефіцієнта потужності	0,8 випереджаючий ... 0,8 відстаючий				
Номінальна напруга/діапазон напруги на виході (В)	220/380, 230/400В, 0.85Un-1.1Un				
Номінальна частота/діапазон частоти (Гц)	50/45-55, 60/55-65				
Форма мережевого підключення	3L+N+PE				
Загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THDi)	<3% (від номінальної потужності)				
Струм інжекції постійного струму	<0,5% In				
ЕФЕКТИВНІСТЬ					
Макс. ефективність	97.60%				
Європейська ефективність	97.0%				
Ефективність MPPT	>99%				
ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ					
	Зворотна полярність постійного струму, захист від перевищення струму на виході змінного струму, захист від перенапруги на виході змінного струму, захист від короткого замикання на виході змінного струму, тепловий захист, моніторинг опору ізоляції постійного струму, моніторинг повного опору ізоляції, моніторинг струму витoku, моніторинг компонентів, моніторинг замикаання на землю, моніторинг мережі, захист від островного режиму, захист від перенавантаження, захист від падіння напруги, захист від перевантаження за струмом, виявлення залишкового струму (RCD), рівень захисту від перенапруги				
Інтерфейси	TYPE II (DC), TYPE III (AC)				
Комунікаційний інтерфейс	WiFi, RS485, CAN				
ЗАГАЛЬНІ ДАНІ					
Робочий діапазон температури (°C)	-40 до +60°C, зниження потужності при +45°C				
Допустима вологість повітря	0-100%				
Допустима висота над рівнем моря	2000 м				
Рівень шуму (дБ)	≤65				
Ступінь захисту (IP)	IP65				
Топологія інвертора	Не ізолюваний				
Категорія перенапруги	OVC II (DC), OVC III (AC)				
Габарити (Ш×В×Г, мм)	527×894×294 (без урахування роз'ємів і кронштейнів)				
Вага (кг)	80				
Тип охолодження	Інтелектуальне повітряне охолодження				
Гарантія	5 років/10 років (гарантійний термін залежить від остаточного місця встановлення інвертора, детальна інформація в гарантійному полісі)				
Стандарти мережі	IEC 61727, IEC 62116, CEI 0-21, EN 50549, NRS 097, RD 140, UNE 217002, OVE-Richtlinie R25, G99, VDE-AR-N 4105				
Стандарти безпеки/EMC	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2				

Для контролю параметрів роботи система підтримує функцію дистанційного моніторингу. Це дозволяє контролювати генерацію електроенергії, режими роботи інвертора та стан акумуляторних батарей у режимі реального часу.

Таким чином, обраний гібридний інвертор відповідає вимогам проєкту та

забезпечує ефективну роботу фотоелектричної системи у різних режимах експлуатації.

2.5. Обґрунтування вибору акумуляторної системи

Для забезпечення резервного живлення та підвищення ефективності використання сонячної генерації у складі фотоелектричної системи передбачено використання акумуляторної системи накопичення енергії.

Наявність акумуляторних батарей дозволяє накопичувати надлишкову електроенергію, вироблену фотоелектричними модулями у денний час, та використовувати її при недостатній генерації або під час аварійного вимкнення зовнішньої мережі.

У проєкті використовується високовольтна акумуляторна система Deye BOS-GM5.1. Загальна ємність системи становить 40,96 кВт·год.



Рис. 2.8. Зовнішній вигляд акумуляторної системи

Під час вибору акумуляторної системи враховувались:

- сумісність із гібридним інвертором;
- необхідний резерв електроенергії;
- термін служби;
- безпечність експлуатації;
- можливість подальшого розширення системи.

Для сучасних гібридних фотоелектричних систем найбільш поширеним рішенням є використання літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей. У порівнянні зі свинцево-кислотними акумуляторами вони мають більший ресурс роботи, вищу ефективність та менші втрати енергії під час заряду і розряду.

Основні технічні характеристики акумуляторної системи наведені у таблиці.

Використання високовольтної акумуляторної системи дозволяє зменшити робочі струми та втрати електроенергії у кабельних лініях. Це особливо важливо для систем великої потужності, де передача енергії при низькій напрузі супроводжується значними втратами.

Акумуляторна система працює разом із гібридним інвертором, який автоматично керує режимами заряду та розряду залежно від рівня генерації електроенергії та споживання навантаження.

У денний період частина електроенергії використовується для живлення навантаження, а надлишок спрямовується на заряд акумуляторних батарей. У вечірній час або при аварійному вимкненні зовнішньої мережі накопичена енергія використовується для живлення споживачів.

Застосування літій-залізо-фосфатних акумуляторів забезпечує високий рівень безпеки, тривалий термін служби та значну кількість циклів заряджання-розряджання. Це дозволяє ефективно використовувати накопичену електроенергію протягом усього терміну експлуатації фотоелектричної системи та зменшує витрати на її обслуговування.

Таблиця 2.2.

Характеристика акумуляторної системи

ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ	
Тип акумулятора	LiFePO ₄ (літій-залізо-фосфат)
Номінальна напруга	51.2 В
Номінальна ємність	100 А·год
Номінальна енергоємність	5.12 кВт·год
Корисна енергоємність	4.86 кВт·год (при DoD 95%)
Глибина розряду (DoD)	≥95%
Номінальний струм заряду	50 А
Максимальний струм заряду	100 А
Номінальний струм розряду	50 А
Максимальний струм розряду	100 А (протягом 15 хв)
Піковий струм розряду	150 А (протягом 2 сек)
Рекомендована напруга заряду	56.0 – 56.8 В
Напруга відсічення заряду	57.6 В
Напруга відсічення розряду	44.8 В
ПРОДУКТИВНІСТЬ	
Кількість циклів	≥6000 циклів @ 25°C, 80% DoD
Ефективність (ККД)	≥95%
Саморозряд	≤3% на місяць
Паралельне підключення	До 64 модулів
Послідовне підключення	Не підтримується
ІНТЕРФЕЙСИ ТА КОМУНІКАЦІЯ	
Інтерфейси зв'язку	CAN, RS485
Індикатори	LED-індикатори стану, SOC, ALM, RUN
Сумісність інверторів	Deue та інші сумісні інвертори (список сумісності уточнюйте у виробника)
УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
Робочий температурний діапазон (заряд)	0°C ~ +55°C
Робочий температурний діапазон (розряд)	-20°C ~ +55°C
Температура зберігання	-20°C ~ +45°C
Вологість	5% ~ 95% (без конденсації)
Робоча висота над рівнем моря	≤2000 м
Ступінь захисту	IP20
МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Габарити (Ш × В × Г)	440 × 133 × 540 мм
Вага	≈ 45 кг
Тип монтажу	Підлоговий / Настінний (стійковий)
Матеріал корпусу	Метал
Колір	Білий
ІНШЕ	
Система управління	BMS (інтелектуальна система управління батареєю)
Захист	Захист від перезаряду, перерозряду, перевантаження по струму, короткого замикання, перегріву, низької температури
Сертифікація	CE, IEC62619, UN38.3
Гарантія	10 років
Термін служби	≥10 років (за умов дотримання умов експлуатації)
Примітка: Технічні характеристики можуть бути змінені без попереднього повідомлення. Актуальну інформацію уточнюйте у офіційного дистриб'ютора або на сайті виробника.	

Обрана акумуляторна система забезпечує необхідний рівень резервування електроживлення та дозволяє підвищити ефективність використання сонячної генерації у складі гібридної фотоелектричної системи.

2.6. Аналіз режимів роботи фотоелектричної системи

Робота гібридної фотоелектричної системи залежить від рівня сонячної генерації, споживання електроенергії та стану акумуляторної системи. У процесі експлуатації система може працювати у декількох режимах, між якими гібридний інвертор автоматично виконує перемикання.

У денний період при достатньому рівні сонячного випромінювання основним джерелом електроенергії є фотоелектричні модулі. Вироблена електроенергія використовується для живлення навантаження об'єкта, а її надлишок спрямовується на заряд акумуляторної системи.

Після повного заряду акумуляторних батарей надлишкова електроенергія може передаватись до зовнішньої електричної мережі відповідно до умов роботи за «зеленим тарифом». Це дозволяє більш ефективно використовувати вироблену електроенергію та зменшити термін окупності системи.

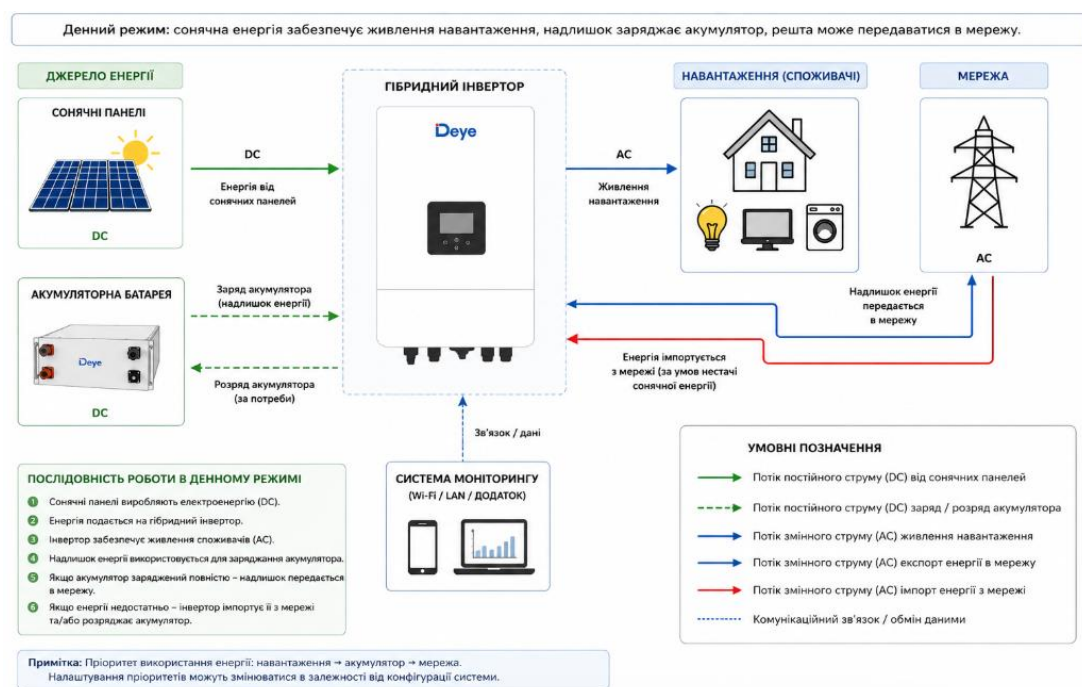


Рис. 2.10. схема роботи системи у денному режимі

У вечірній час, коли рівень сонячної генерації зменшується, живлення навантаження здійснюється від акумуляторної системи. Гібридний інвертор

автоматично переходить у режим використання накопиченої енергії без переривання електроживлення споживачів.

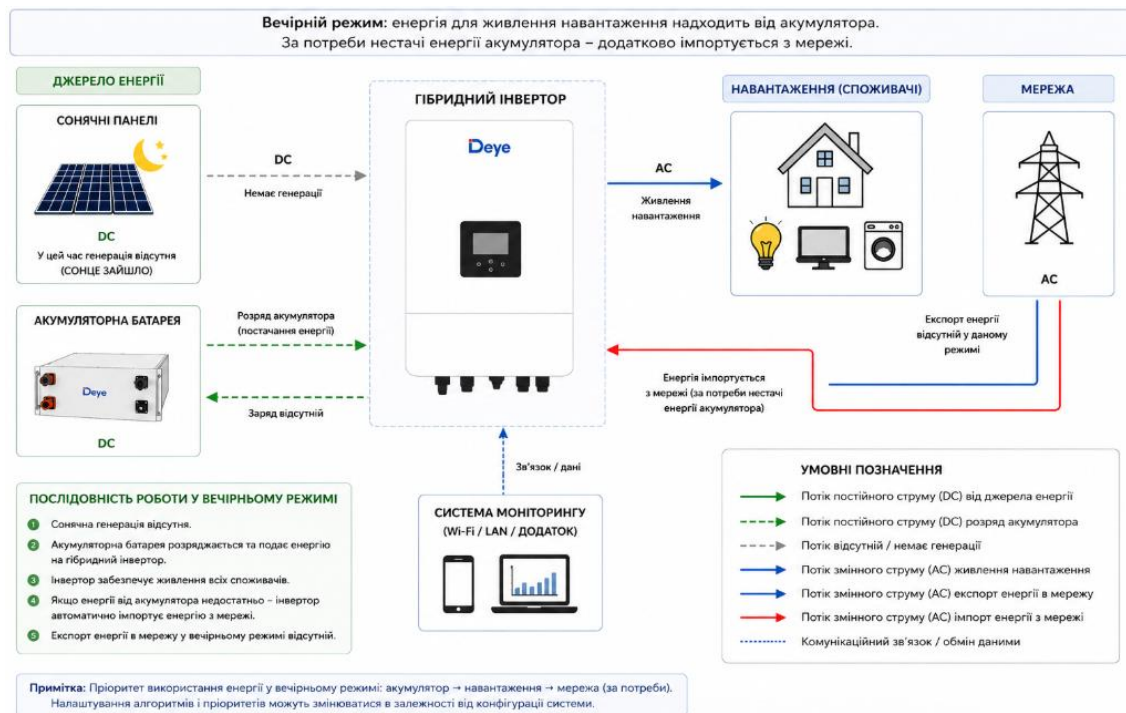


Рис. 2.11. Схема роботи системи у вечірньому режимі

При недостатньому рівні заряду акумуляторних батарей або при перевищенні потужності навантаження система переходить у режим споживання електроенергії із зовнішньої мережі. Такий режим дозволяє забезпечити стабільне електроживлення об'єкта незалежно від рівня сонячної генерації.

Окрему увагу необхідно приділити режиму резервного живлення. У випадку аварійного вимкнення зовнішньої мережі гібридний інвертор автоматично відокремлює систему від мережі та забезпечує живлення відповідальних споживачів від фотоелектричних модулів та акумуляторної системи.

Тривалість автономної роботи системи залежить від ємності акумуляторної системи та величини навантаження. При достатньому рівні сонячної генерації фотоелектричні модулі можуть одночасно живити навантаження та заряджати акумуляторні батареї навіть у резервному режимі роботи.

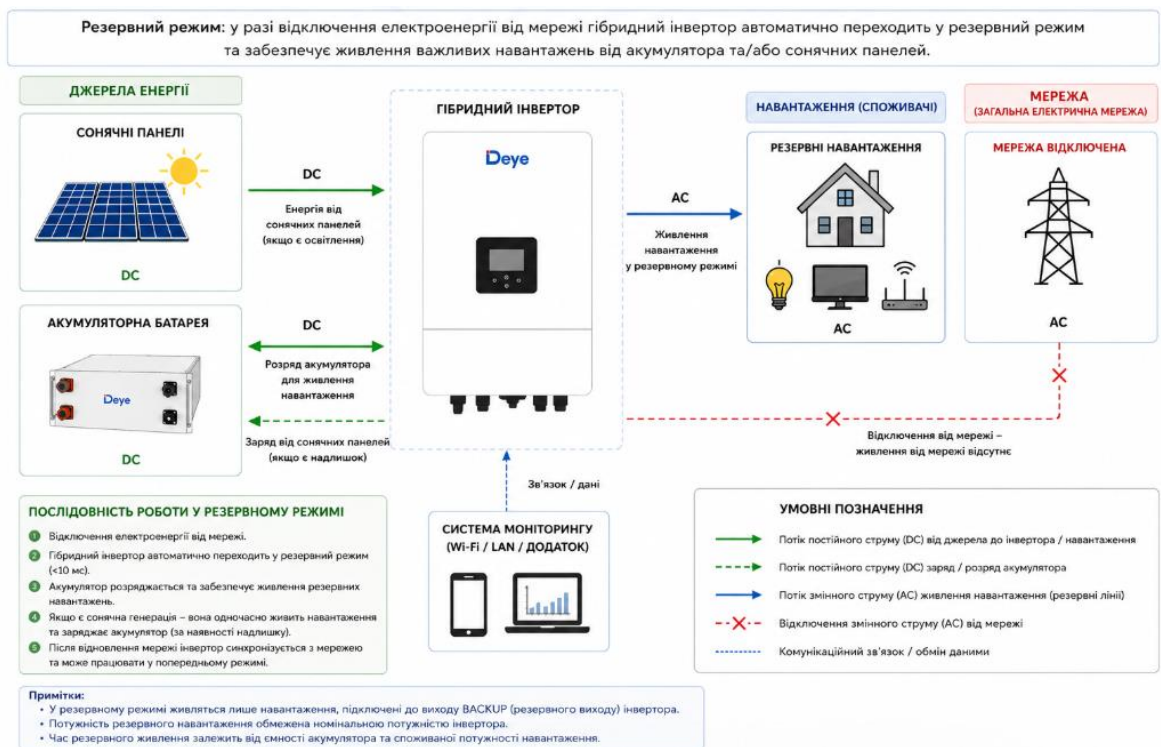


Рис. 2.12. Схема резервного режиму роботи системи

Для контролю режимів роботи використовується система моніторингу, яка дозволяє контролювати:

- потужність генерації;
- рівень заряду акумуляторів;
- споживання електроенергії;
- режими роботи інвертора;
- передачу електроенергії до мережі.

Таким чином, використання гібридної фотоелектричної системи дозволяє забезпечити ефективне використання сонячної енергії, резервне електроживлення споживачів та зменшення залежності від зовнішньої електричної мережі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто особливості проектування гібридної фотоелектричної системи для приватного домогосподарства. Проведено аналіз

об'єкта проєктування та визначено основні вимоги до системи електроживлення.

У роботі обґрунтовано використання гібридної схеми фотоелектричної системи, яка забезпечує можливість генерації, накопичення та передачі електроенергії до зовнішньої мережі. Розроблена структура системи дозволяє забезпечити резервне електроживлення навантаження та ефективне використання сонячної генерації.

Проведено вибір основного обладнання фотоелектричної системи, зокрема фотоелектричних модулів, гібридного інвертора та акумуляторної системи накопичення енергії. Визначено, що використання високовольтної акумуляторної системи та гібридного інвертора дозволяє підвищити ефективність роботи системи та забезпечити стабільність електроживлення.

Також було розглянуто основні режими роботи фотоелектричної системи та особливості роботи системи у режимі резервного живлення. Проведений аналіз підтвердив доцільність використання гібридної фотоелектричної системи для приватного домогосподарства з можливістю продажу надлишкової електроенергії за «зеленим тарифом».

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної станції

Одним із основних етапів проєктування фотоелектричної станції є визначення її встановленої потужності. Встановлена потужність характеризує максимальну електричну потужність, яку можуть виробляти фотоелектричні модулі за стандартних умов випробувань.

У розробленому проєкті для генерації електричної енергії використовуються фотоелектричні модулі JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR номінальною потужністю 580 Вт. Загальна кількість модулів становить 80 шт.

Для визначення встановленої потужності фотоелектричної станції використовується залежність:

$$P_{PV} = N \cdot P_m \quad (3.1)$$

де:

N – кількість фотоелектричних модулів;

P_m – номінальна потужність одного модуля, Вт.

$$P_{PV} = 80 \cdot 580 = 46400 \text{ Вт}$$

$$P_{PV} = 46,4 \text{ кВт}$$

Підставивши параметри проєкту, отримаємо:

Отже, встановлена потужність фотоелектричної станції становить 46,4 кВт.

Отримане значення встановленої потужності використовується для подальшого вибору інверторного обладнання та перевірки відповідності параметрів усіх елементів системи.

Для роботи фотоелектричної станції обрано гібридний інвертор потужністю 50 кВт. Співвідношення потужності фотоелектричних модулів до

номінальної потужності інвертора визначається за формулою:

$$K = \frac{P_{PV}}{P_{INV}} \quad (3.2)$$

де:

P_{INV} – номінальна потужність інвертора.

Після підстановки значень отримуємо:

$$K = \frac{46,4}{50} = 0,928$$

Таким чином, потужність фотоелектричного поля становить близько 92,8 % від номінальної потужності інвертора. Це свідчить про правильний вибір обладнання та відсутність ризику перевантаження інвертора під час роботи станції.

Крім встановленої потужності, важливим показником є площа фотоелектричного поля. Враховуючи габаритні розміри одного модуля, загальна площа розміщення сонячних панелей становить понад 200 м², що відповідає можливостям покрівлі об'єкта та дозволяє реалізувати прийнятну конфігурацію станції.

Встановлена потужність 46,4 кВт забезпечує достатній рівень генерації електроенергії для покриття власних потреб об'єкта, заряджання акумуляторної системи та передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі. Це створює передумови для ефективної роботи системи та скорочення терміну її окупності.

3.2. Розрахунок площі фотоелектричного поля

Одним із важливих етапів проєктування фотоелектричної станції є визначення площі, необхідної для розміщення фотоелектричних модулів. Отримане значення дозволяє оцінити можливість встановлення обладнання на покрівлі будівлі та перевірити відповідність прийнятого компонування

конструктивним особливостям об'єкта.

У проєкті використовуються фотоелектричні модулі JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR. Згідно з технічними характеристиками габаритні розміри одного модуля становлять 2278×1134 мм.

Площа одного фотоелектричного модуля визначається за формулою:

$$S_m = a \cdot b \quad (3.3)$$

де:

a – довжина модуля, м;

b – ширина модуля, м.

Після підстановки значень отримуємо:

$$S_m = 2,278 \cdot 1,134 = 2,58 \text{ м}^2$$

Загальна площа фотоелектричного поля визначається як:

$$S_{PV} = N \cdot S_m \quad (3.4)$$

де

N – кількість фотоелектричних модулів.

Тоді:

$$S_{PV} = 80 \cdot 2,58 = 206,4 \text{ м}^2$$

Отже, сумарна площа, яку займають фотоелектричні модулі, становить приблизно 206 м².

Необхідно враховувати, що під час монтажу між рядами модулів залишаються технологічні відстані для кріплення конструкцій, прокладання кабельних ліній та проведення обслуговування обладнання. Тому фактична площа, необхідна для розміщення фотоелектричної станції, буде дещо більшою за розраховану площу модулів.

Результати розрахунку підтверджують можливість розміщення прийнятої кількості фотоелектричних модулів на покрівлі об'єкта без перевищення доступної площі. Крім того, така конфігурація забезпечує необхідну встановлену потужність фотоелектричної станції та дозволяє ефективно використовувати доступну поверхню даху.

3.3. Розрахунок конфігурації стрингів фотоелектричних модулів

Після визначення встановленої потужності фотоелектричної станції необхідно виконати розрахунок конфігурації стрингів та перевірити відповідність їх параметрів вимогам гібридного інвертора. Правильне формування стрингів забезпечує стабільну роботу MPPT-трекерів та дозволяє максимально ефективно використовувати потужність фотоелектричних модулів.

У проєкті використовуються фотоелектричні модулі JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR потужністю 580 Вт. Загальна кількість модулів становить 80 шт.

Основними електричними параметрами модуля є:

- напруга холостого ходу $U_{OC} = 51,98 \text{ В}$;
- напруга в точці максимальної потужності $U_{MPP} = 43,76 \text{ В}$;
- струм короткого замикання $I_{SC} = 14,12 \text{ А}$;
- струм у точці максимальної потужності $I_{MPP} = 13,26 \text{ А}$.

Для визначення максимально допустимої кількості модулів у стрингу необхідно врахувати максимальну вхідну напругу інвертора. Для інвертора Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 максимальна напруга постійного струму становить 1000 В.

Максимальна кількість модулів у стрингу визначається за формулою:

$$N_{max} = \frac{U_{DCmax}}{U_{OC}} \quad (3.5)$$

Після підстановки значень:

$$N_{max} = \frac{1000}{51,98} = 19,24$$

Отримане значення показує, що теоретично у стрингу може бути встановлено не більше 19 модулів. Проте при проектуванні необхідно враховувати вплив низьких температур, при яких напруга модулів збільшується. Тому фактична кількість модулів у стрингу приймається меншою.

У проєкті прийнято конфігурацію з 8 стрингів по 10 модулів у кожному. Така схема забезпечує рівномірний розподіл фотоелектричних модулів між МРРТ-трекерами інвертора та відповідає вимогам виробника обладнання.

Напруга одного стрингу в точці максимальної потужності становитиме:

$$U_{string} = 10 \cdot 43,76 = 437,6 \text{ В} \quad (3.6)$$

Отримане значення знаходиться в межах робочого діапазону МРРТ інвертора.

Струм одного стрингу дорівнює:

$$I_{string} = 13,26 \text{ А}$$

Формування восьми стрингів по десять модулів дозволяє забезпечити стабільну роботу системи при різних режимах сонячної генерації та спрощує подальше обслуговування фотоелектричної станції. Крім того, така конфігурація забезпечує рівномірне навантаження на МРРТ-трекери інвертора та дозволяє мінімізувати втрати електроенергії.

Таким чином, прийнята конфігурація стрингів відповідає параметрам фотоелектричних модулів та технічним характеристикам гібридного інвертора, що забезпечує надійну та ефективну роботу фотоелектричної системи.

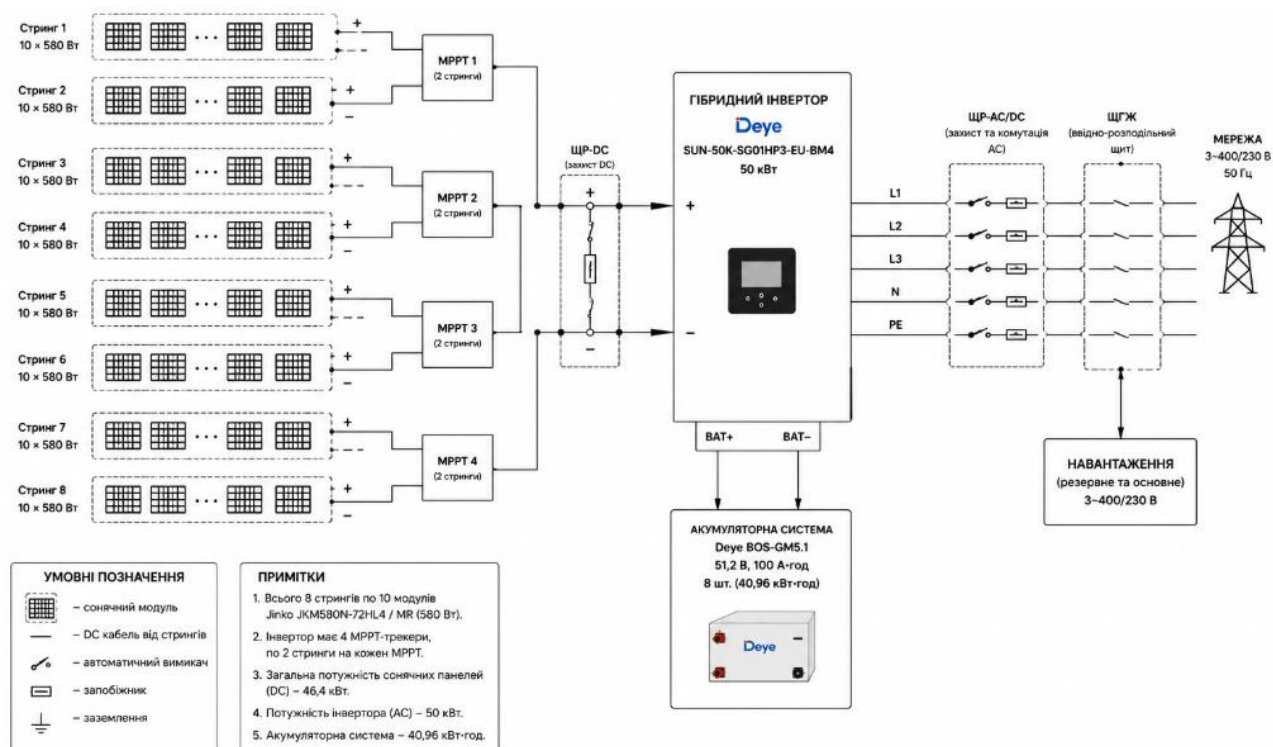


Рис. 3.1. Схема підключення стрингів до інвертора

3.4. Перевірка параметрів MPPT та режимів роботи інвертора

Після визначення конфігурації стрингів необхідно перевірити, чи відповідають їх електричні параметри робочому діапазону гібридного інвертора. Для проєктованої системи використовується інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4, робочий діапазон MPPT якого становить 180–850 В, а мінімальна напруга запуску — 150 В.

Для фотоелектричних модулів JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR напруга в точці максимальної потужності становить 42,37 В, а напруга холостого ходу — 51,02 В.

При послідовному з'єднанні 10 модулів напруга стрингу в точці максимальної потужності становитиме:

$$U_{MPP.string} = 10 \cdot 42,37 = 423,7 \text{ В} \quad (3.7)$$

Отримане значення знаходиться в межах робочого діапазону MPPT інвертора, тому така конфігурація забезпечує стабільну роботу системи.

Максимальна напруга стрингу при низькій температурі визначається з урахуванням збільшення напруги холостого ходу. За розрахунками проєкту при температурі 25°C напруга одного модуля становить 58,42 В.

Тоді для стрингу з 10 модулів:

$$U_{OC.string} = 10 \cdot 58,42 = 584,2 \text{ В} \quad (3.8)$$

Це значення не перевищує максимально допустиму вхідну напругу інвертора, тому робота системи при низьких температурах є допустимою.

Таблиця 3.1

Перевірка відповідності параметрів стрингу вимогам інвертора

Параметр	Значення стрингу	Допустиме значення інвертора	Висновок
Кількість модулів у стрингу	10 шт.	5–14 шт.	Відповідає
Напруга MPP стрингу	423,7 В	180–850 В	Відповідає
Напруга холостого ходу стрингу (V_{oc})	510,2 В	до 850 В	Відповідає
Напруга холостого ходу при - 25 °C	584,2 В	до 850 В	Відповідає
Потужність стрингу	5,8 кВт	Допустима для інвертора	Відповідає

Також необхідно перевірити струм на вході інвертора. Максимальний струм одного модуля при температурі 25°C становить 14,76 А. При паралельному підключенні стрингів струми підсумовуються, тому кількість паралельних ліній на один МРРТ-вхід не повинна перевищувати допустиме значення для інвертора.

У проєкті прийнята конфігурація забезпечує роботу інвертора без перевищення допустимих значень напруги та струму. Це підтверджує правильність вибору кількості модулів у стрингах та можливість стабільної роботи МРРТ-трекерів.

Таким чином, параметри фотоелектричного поля відповідають технічним характеристикам гібридного інвертора Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4. Обрана конфігурація забезпечує нормальний запуск інвертора, ефективну роботу МРРТ та безпечну експлуатацію системи в різних температурних умовах.

3.5. Розрахунок акумуляторної системи накопичення енергії

Одним із важливих елементів гібридної фотоелектричної системи є акумуляторна система накопичення енергії. Її призначення полягає у збереженні надлишкової електроенергії, виробленої фотоелектричними модулями, та забезпеченні резервного живлення споживачів у періоди відсутності генерації або аварійного відключення зовнішньої мережі.

У проєкті використовується високовольтна акумуляторна система Deue BOS-GM5.1. Система складається з восьми акумуляторних модулів ємністю 5,12 кВт·год кожен. Загальна накопичувальна здатність системи визначається за формулою:

$$E_{AKB} = n \cdot E_m \quad (3.9)$$

де:

n – кількість акумуляторних модулів;

E_m – ємність одного акумуляторного модуля, кВт·год.

Після підстановки значень отримаємо:

$$E_{AKB} = 8 \cdot 5,12 = 40,96 \text{ кВт}$$

Отже, загальна ємність акумуляторної системи становить 40,96 кВт·год.

Для оцінки можливостей резервного живлення визначимо орієнтовний час автономної роботи системи. Тривалість автономної роботи залежить від потужності навантаження та визначається за формулою:

$$t = \frac{E_{AKB}}{P_H} \quad (3.10)$$

де:

E_{AKB} – запас енергії акумуляторної системи;

P_H – потужність навантаження.

Наприклад, при навантаженні 5 кВт орієнтовний час роботи становитиме:

$$t = \frac{40,96}{5} = 8,19 \text{ год}$$

При навантаженні 10 кВт:

$$t = \frac{40,96}{10} = 4,10 \text{ год}$$

Наведені значення є орієнтовними, оскільки фактичний час автономної роботи залежить від глибини розряду акумуляторів, коефіцієнта корисної дії інвертора та поточного режиму роботи фотоелектричної системи.

Таблиця 3.2

Залежність часу автономної роботи від потужності навантаження

Потужність навантаження, кВт	Орієнтовний час автономної роботи, год
5	8,2
10	4,1
15	2,7
20	2,0
25	1,6
30	1,4
40	1,0

Важливою перевагою обраної акумуляторної системи є використання літій-залізо-фосфатної технології (LiFePO₄). Такі акумулятори характеризуються високою безпечністю, тривалим терміном служби та значною кількістю циклів заряду-розряду.

Акумуляторна система працює спільно з гібридним інвертором, який автоматично контролює процеси заряду та розряду. У денний період надлишкова сонячна генерація використовується для заряджання акумуляторів, а у вечірній час або при відключенні зовнішньої мережі накопичена енергія використовується для живлення навантаження.

Проведений розрахунок показує, що акумуляторна система ємністю 40,96 кВт·год забезпечує достатній запас енергії для реалізації функції резервного

живлення та ефективного використання виробленої сонячної електроенергії. Це дозволяє підвищити рівень енергетичної незалежності об'єкта та зменшити споживання електроенергії із зовнішньої мережі.

3.6. Вибір кабельної продукції та захисного обладнання

Надійність та безпечність роботи фотоелектричної системи значною мірою залежать від правильного вибору кабельної продукції та захисного обладнання. Під час проєктування необхідно забезпечити мінімальні втрати електроенергії в кабельних лініях, а також захист обладнання від коротких замикань, перевантажень та перенапруг.

Для з'єднання фотоелектричних модулів між собою та підключення стрингів до інвертора використовуються спеціалізовані кабелі постійного струму. Такі кабелі повинні бути стійкими до впливу ультрафіолетового випромінювання, атмосферних опадів та перепадів температур.

У проєкті для ліній постійного струму застосовується кабель перерізом 6 мм², що забезпечує передачу струму від фотоелектричних модулів до інвертора без перевищення допустимих втрат напруги.

Таблиця 3.3

Кабельна продукція гібридної сонячної електростанції 50 кВт

№ з/п	Найменування кабельної продукції	Марка кабелю	Переріз	Кількість, м
1	Кабель зв'язку	FTP Cat.5e 4×2×0,6	0,6 мм	30
2	Кабель силовий трифазний	ВВГнгд 5×25	25 мм ²	20
3	Кабель силовий	ВВГнгд 4×1,5	1,5 мм ²	20
4	Кабель силовий	ВВГнгд 3×1,5	1,5 мм ²	20
5	Кабель силовий	ВВГнгд 2×1,5	1,5 мм ²	20
6	Провід силовий	ПВЗ 1×70	70 мм ²	20
7	Провід силовий	ПВЗ 1×6	6 мм ²	50
8	Сонячний кабель постійного струму	PV1-F 1×6	6 мм ²	550

Для підключення інвертора до внутрішньої мережі будівлі використовуються кабельні лінії змінного струму, параметри яких визначаються потужністю інвертора та величиною навантаження. Вибір перерізу провідників виконується з урахуванням допустимого струмового навантаження та умов прокладання кабелів.

Розрахунок втрат напруги в кабельній лінії

Одним із критеріїв правильного вибору кабельної продукції є величина втрати напруги під час передачі електричної енергії. Надмірне падіння напруги призводить до зниження ефективності роботи обладнання та збільшення втрат електроенергії.

Для попередньої оцінки втрат напруги використовується залежність:

$$\Delta U = \frac{2\rho LI}{S} \quad (3.11)$$

де:

ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом·мм²/м;

L – довжина кабельної лінії, м;

I – робочий струм, А;

S – площа поперечного перерізу провідника, мм²

Для мідного кабелю перерізом 6 мм², довжини лінії 25 м та струму 13,26 А отримаємо:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 0,018 \cdot 25 \cdot 13,26}{6}$$

$$\Delta U = 1,99 \text{ В}$$

Відносна втрата напруги становить:

$$\delta U = \frac{1,99}{423,7} \cdot 100\% = 0,47\% \quad (3.12)$$

Отримане значення є меншим за допустимі 1–2 %, тому обраний переріз кабелю забезпечує передачу електроенергії без суттєвих втрат.

З метою захисту обладнання від аварійних режимів роботи у складі фотоелектричної системи передбачено використання автоматичних вимикачів та пристроїв захисту від імпульсних перенапруг.

Автоматичні вимикачі забезпечують захист кабельних ліній та обладнання від струмів короткого замикання і перевантаження. Їх встановлення передбачається як у колах постійного струму між фотоелектричними модулями та інвертором, так і в колах змінного струму між інвертором та мережею будівлі.

Вибір автоматичного вимикача

Для забезпечення захисту інвертора та кабельних ліній необхідно правильно обрати номінальний струм автоматичного вимикача.

Робочий струм трифазного інвертора визначається за формулою:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \quad (3.13)$$

де:

P – потужність інвертора, Вт;

U – лінійна напруга мережі, В;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Для інвертора потужністю 50 кВт:

$$I = \frac{50000}{1,732 \cdot 400 \cdot 1}$$

$$I = 72,2 \text{ А}$$

З урахуванням необхідного запасу приймається автоматичний вимикач номіналом 80 А.

Вибраний автоматичний вимикач забезпечує надійний захист інвертора та кабельних ліній від перевантаження і струмів короткого замикання.

Для захисту обладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг використовуються пристрої захисту від імпульсних перенапруг (SPD). Їх застосування особливо важливе для фотоелектричних систем, оскільки сонячні

модулі розташовані на покрівлі будівлі та можуть піддаватися впливу грозових перенапруг.

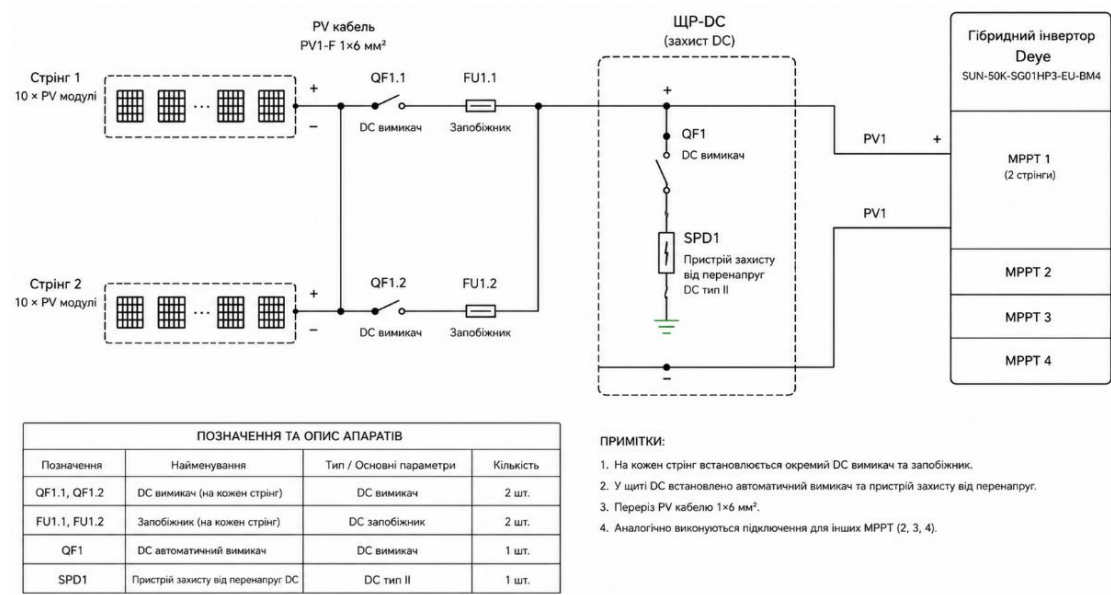


Рис. 3.2. Однолінійної схеми із захисними апаратами

Захист встановлюється як у колах постійного струму між фотоелектричними модулями та інвертором, так і у колах змінного струму між інвертором та електричною мережею будівлі.

Використання SPD дозволяє суттєво знизити ризик пошкодження фотоелектричних модулів, інвертора та акумуляторної системи під час грозових явищ або комутаційних процесів у мережі.

У проєкті також передбачена система заземлення, яка забезпечує безпечну експлуатацію обладнання та захист персоналу від ураження електричним струмом. Заземленню підлягають металеві конструкції кріплення фотоелектричних модулів, корпус інвертора та інші металеві елементи системи.

Також увагу приділено системі блискавкозахисту. Враховуючи розташування фотоелектричних модулів на покрівлі будівлі, захист від прямих ударів блискавки та вторинних проявів грозової діяльності є необхідною умовою надійної роботи системи.

Контур заземлення виконується біля об’єкта та складається з вертикальних електродів і горизонтального з’єднання.

Таблиця 3.4.

Параметри системи заземлення

Параметр	Значення
Тип системи	TN-C-S
Матеріал електродів	Сталь оцинкована
Діаметр електродів	16 мм
Довжина електродів	2–3 м
Кількість електродів	3–4
З'єднання	Сталева смуга / мідний провід
Допустимий опір	≤ 4 Ом

Основним недоліком системи TN-C-S є можливість появи напруги на корпусах обладнання при обриві PEN-провідника. Тому необхідно:

- забезпечити надійність з'єднань;
- використовувати диференційний захист;
- регулярно перевіряти стан заземлення.



Рис. 3.3. Схема системи заземлення TN-C-S

Таким чином, вибір кабельної продукції та захисного обладнання виконано з урахуванням потужності фотоелектричної станції, параметрів інвертора та вимог електробезпеки. Застосування відповідних засобів захисту забезпечує

надійну та безпечну роботу фотоелектричної системи протягом усього терміну експлуатації.

3.7. Вибір системи обліку та моніторингу електроенергії

Для фотоелектричних станцій, які працюють паралельно із зовнішньою мережею та передбачають передачу надлишкової електроенергії, важливим елементом є система обліку електроенергії. Вона забезпечує контроль обсягів споживання та генерації електричної енергії, а також є необхідною умовою для роботи за механізмом «зеленого тарифу».

У складі проєктованої фотоелектричної системи передбачається використання двонаправленого лічильника електричної енергії. На відміну від звичайних засобів обліку, такий лічильник дозволяє окремо фіксувати кількість електроенергії, отриманої із зовнішньої мережі, та кількість електроенергії, переданої до неї.

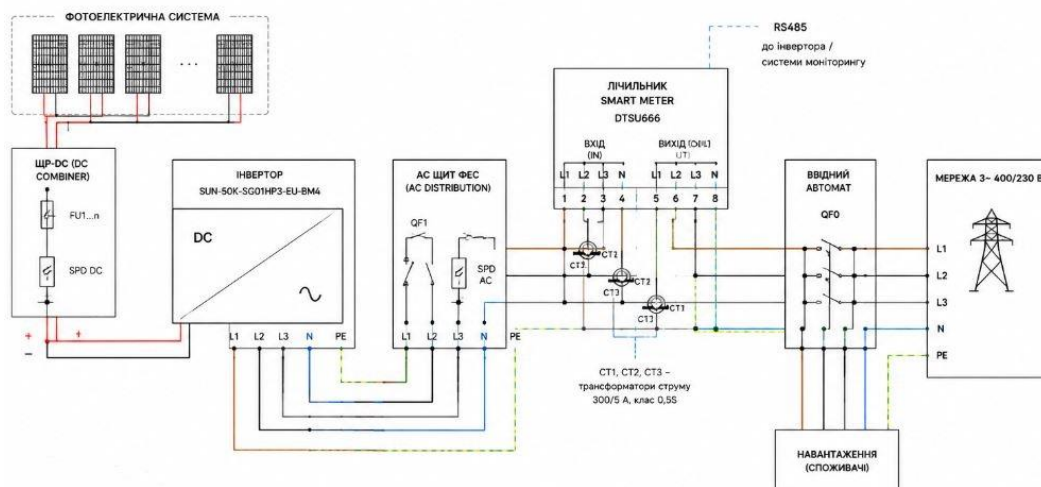


Рис. 3.4. Схема підключення лічильника до мережі та фотоелектричної системи

Використання двонаправленого обліку дозволяє визначати фактичний енергетичний баланс об'єкта та оцінювати ефективність роботи фотоелектричної станції. Отримані дані можуть використовуватись для аналізу власного

споживання, визначення частки сонячної генерації та розрахунку економічного ефекту від впровадження системи.

Окрім комерційного обліку, важливу роль відіграє система моніторингу. Сучасні гібридні інвертори оснащуються засобами дистанційного контролю, які дозволяють отримувати інформацію про роботу обладнання в режимі реального часу.

У проєкті використовується система моніторингу, інтегрована з гібридним інвертором Deue. Вона забезпечує контроль основних параметрів роботи фотоелектричної системи через вебінтерфейс або мобільний додаток.

До параметрів, які можуть контролюватися користувачем, належать потужність генерації фотоелектричних модулів, рівень заряду акумуляторної системи, потужність навантаження та обсяги обміну електроенергією із зовнішньою мережею.

Використання системи моніторингу дозволяє оперативно виявляти відхилення у роботі обладнання та контролювати ефективність роботи фотоелектричної станції. У разі виникнення несправностей користувач може своєчасно отримати інформацію про помилки або аварійні режими роботи системи.



Рис. 3.5. Інтерфейс системи моніторингу Deue

Додатковою перевагою є можливість накопичення статистичних даних про генерацію та споживання електроенергії. Це дозволяє проводити аналіз роботи системи за добу, місяць або рік та оцінювати ефективність використання сонячної енергії.

Таким чином, застосування сучасних засобів обліку та моніторингу забезпечує контроль енергетичних потоків, підвищує зручність експлуатації фотоелектричної системи та створює необхідні умови для передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи та перевірено відповідність обраного обладнання вимогам проєкту.

Визначено встановлену потужність фотоелектричної станції, яка становить 46,4 кВт. Проведено розрахунок конфігурації стрингів та перевірено відповідність їх параметрів робочим характеристикам гібридного інвертора. Отримані результати підтвердили можливість стабільної роботи МРРТ-трекерів у прийнятому режимі експлуатації.

Також виконано розрахунок акумуляторної системи накопичення енергії та визначено її можливості щодо забезпечення резервного живлення. Розглянуто вибір кабельної продукції, захисного обладнання та засобів блискавкозахисту, необхідних для безпечної експлуатації фотоелектричної станції.

Окрему увагу приділено системі обліку та моніторингу електроенергії, яка забезпечує контроль роботи обладнання та створює необхідні умови для передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

Проведені розрахунки підтверджують технічну доцільність реалізації проєктованої гібридної фотоелектричної системи та забезпечують вихідні дані для подальшого дослідження ефективності її роботи.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1. Аналіз прогнозованої генерації електроенергії

Одним із основних показників ефективності фотоелектричної системи є кількість електроенергії, яку вона здатна виробити протягом року. Річна генерація залежить від встановленої потужності станції, географічного розташування об'єкта, орієнтації фотоелектричних модулів та кліматичних умов регіону.

Для розробленої системи встановлена потужність фотоелектричного поля становить 46,4 кВт. Фотоелектричні модулі розташовані на покрівлі будівлі, що дозволяє максимально використати доступну площу та забезпечити ефективне сприйняття сонячного випромінювання протягом року.

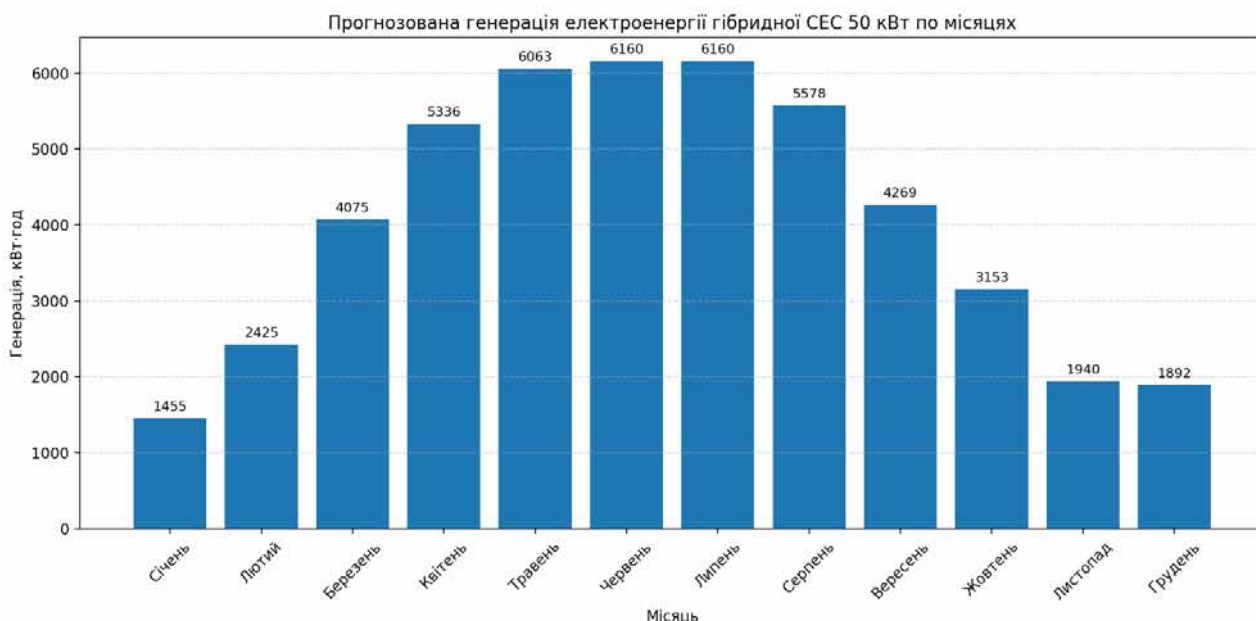


Рис. 4.1. Графік прогнозованої генерації електроенергії по місяцях

Генерація електроенергії фотоелектричною станцією є нерівномірною. Найбільший виробіток спостерігається у весняно-літній період, коли збільшується тривалість світлового дня та рівень сонячної активності. У зимові

місяці генерація знижується внаслідок меншої інтенсивності сонячного випромінювання та скорочення тривалості дня.

Для території Київської області середньорічний виробіток фотоелектричних станцій зазвичай становить від 1000 до 1200 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності. Для станції потужністю 46,4 кВт орієнтовний річний виробіток може становити:

$$W_{\text{річ}} = 46,4 \cdot 1100 = 51040 \text{ кВт} \quad (4.1)$$

Отримане значення відповідає середнім показникам генерації для дахових фотоелектричних систем аналогічної потужності.

Для більш наочного аналізу доцільно розподілити прогнозований виробіток за місяцями.

Як правило, найбільший виробіток спостерігається з травня по серпень. У цей період фотоелектрична система здатна не лише покривати власні потреби об'єкта, але й передавати значну кількість електроенергії до зовнішньої мережі.

У перехідні періоди року генерація поступово зменшується, проте залишається достатньою для часткового забезпечення електроспоживання будинку. У зимові місяці виробіток є мінімальним, однак навіть у цей час система дозволяє зменшити споживання електроенергії із зовнішньої мережі.

Важливим фактором є також вплив температури на роботу фотоелектричних модулів. Незважаючи на високий рівень сонячної активності в літній період, надмірне нагрівання панелей може призводити до певного зниження їх потужності. Саме тому фактична генерація не завжди пропорційна інтенсивності сонячного випромінювання.

Проведений аналіз показує, що фотоелектрична станція потужністю 46,4 кВт здатна забезпечити значний обсяг генерації електроенергії протягом року. Це створює передумови для покриття власного електроспоживання, заряджання акумуляторної системи та передачі надлишкової електроенергії до мережі.

4.2. Дослідження режимів роботи фотоелектричної системи

Ефективність роботи гібридної фотоелектричної системи значною мірою визначається алгоритмом розподілу енергетичних потоків між фотоелектричними модулями, акумуляторною системою, навантаженням та зовнішньою електричною мережею. Використання гібридного інвертора дозволяє автоматично змінювати режими роботи системи залежно від поточного рівня генерації та споживання електроенергії.

У денний час основним джерелом електроенергії є фотоелектричні модулі. Вироблена електроенергія в першу чергу використовується для живлення навантаження будинку. Якщо потужність генерації перевищує поточне споживання, надлишкова енергія спрямовується на заряд акумуляторної системи. Після повного заряду акумуляторних батарей надлишок електроенергії може передаватися до зовнішньої мережі.

У вечірній період рівень сонячної генерації поступово зменшується, тому основним джерелом живлення стає акумуляторна система. Накопичена протягом дня електроенергія використовується для забезпечення роботи побутових електроприладів та інших споживачів. Такий режим дозволяє зменшити споживання електроенергії із зовнішньої мережі та підвищити рівень власного використання виробленої сонячної енергії.

У нічний час, коли генерація фотоелектричних модулів відсутня, живлення навантаження здійснюється від акумуляторної системи або від зовнішньої мережі. Перехід між джерелами живлення виконується автоматично залежно від рівня заряду акумуляторів та налаштувань інвертора.

Особливе значення має аварійний режим роботи. У разі зникнення напруги у зовнішній мережі система автоматично переходить в автономний режим. При цьому живлення відповідальних споживачів забезпечується від акумуляторної системи та фотоелектричних модулів. Такий режим дозволяє підтримувати роботу основного обладнання навіть при тривалих відключеннях електроенергії.

Для більш наочного представлення особливостей роботи гібридної

фотоелектричної системи основні режими її функціонування наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Основні режими роботи гібридної фотоелектричної системи

Режим роботи	Основне джерело енергії	Стан акумуляторної системи	Взаємодія з мережею
Денний	Фотоелектричні модулі	Заряд	Можлива передача надлишку енергії
Вечірній	Акумуляторна система	Розряд	Часткове використання мережі
Нічний	Акумуляторна система / мережа	Розряд	Споживання електроенергії
Аварійний	Фотоелектричні модулі та АКБ	Заряд або розряд	Відсутнє підключення до мережі

Використання гібридного інвертора забезпечує автоматичне керування всіма режимами роботи без втручання користувача. Це дозволяє оптимізувати використання сонячної генерації, підтримувати необхідний рівень заряду акумуляторної системи та забезпечувати безперервне електропостачання споживачів.

Проведений аналіз показує, що застосування гібридної фотоелектричної системи дозволяє максимально ефективно використовувати вироблену електроенергію та підвищити енергетичну незалежність приватного домогосподарства.

4.3. Аналіз роботи акумуляторної системи

Акумуляторна система є одним із ключових елементів гібридної фотоелектричної станції, оскільки забезпечує накопичення надлишкової електроенергії та підтримує роботу навантаження у періоди недостатньої генерації. На відміну від мережевих фотоелектричних систем, використання акумуляторних батарей дозволяє підвищити рівень енергетичної незалежності

об'єкта та забезпечити резервне живлення при аварійних відключеннях електроенергії.

У розробленій системі використовується високовольтна акумуляторна батарея загальною ємністю 40,96 кВт·год. Така ємність дозволяє накопичувати частину виробленої протягом дня електроенергії та використовувати її в години максимального споживання.

Робота акумуляторної системи безпосередньо залежить від режиму генерації фотоелектричних модулів. У ранкові години, коли виробіток електроенергії поступово збільшується, основна частина енергії використовується для живлення навантаження будинку. Після перевищення потужності генерації над поточним споживанням надлишкова енергія спрямовується на заряд акумуляторної батареї.

У денний період при максимальній генерації відбувається інтенсивний заряд акумуляторної системи. Після досягнення встановленого рівня заряду надлишок виробленої електроенергії може передаватися до зовнішньої мережі.

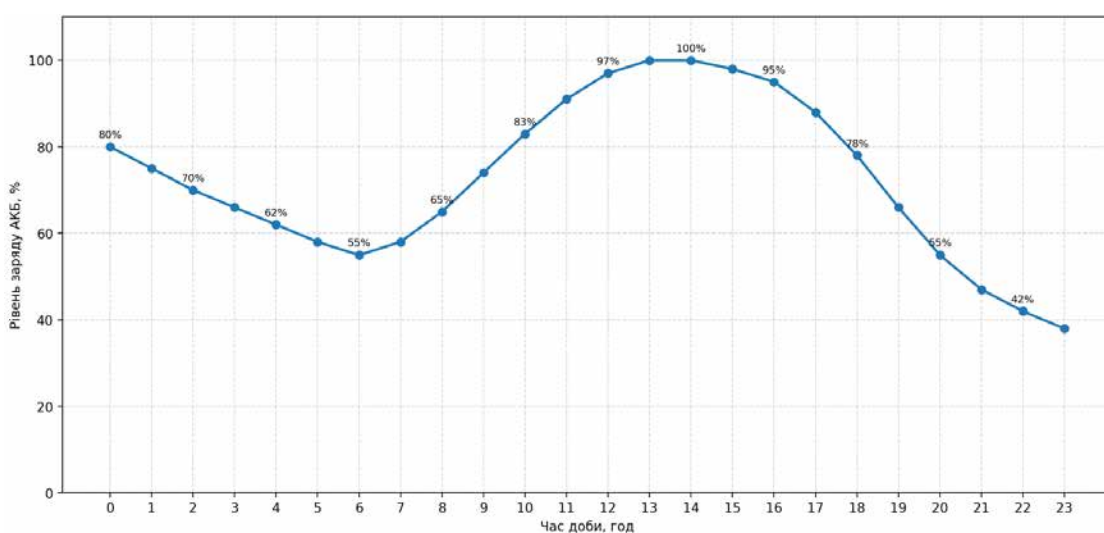


Рис. 4.2. Графік зміни рівня заряду акумуляторної батареї протягом доби

Особливе значення акумуляторна система має під час аварійних відключень електропостачання. У цьому випадку гібридний інвертор автоматично переходить в автономний режим роботи та забезпечує живлення визначених споживачів від акумуляторної батареї. За наявності сонячного

випромінювання фотоелектричні модулі продовжують виробляти електроенергію, підтримуючи роботу навантаження та заряджаючи акумулятори.

Застосування літій-залізо-фосфатної технології забезпечує високу безпечність експлуатації, тривалий термін служби та значну кількість циклів заряду-розряду. Це особливо важливо для фотоелектричних систем, у яких акумуляторна батарея працює щоденно.

Використання акумуляторної системи також дозволяє підвищити рівень власного споживання виробленої електроенергії. Без накопичувача значна частина надлишкової генерації передавалася б до мережі, тоді як акумуляторна система дає можливість використати цю енергію у вечірні години без додаткового споживання з мережі.

Таким чином, застосування акумуляторної системи у складі гібридної фотоелектричної станції дозволяє підвищити ефективність використання сонячної генерації, забезпечити резервне електроживлення та зменшити залежність об'єкта від зовнішньої електромережі.

4.4. Оцінка економічної ефективності роботи фотоелектричної системи

Одним із основних критеріїв доцільності впровадження фотоелектричної системи є її економічна ефективність. Для приватних домогосподарств встановлення сонячної електростанції дозволяє не лише зменшити витрати на споживання електроенергії, а й отримувати додатковий дохід від передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої мережі.

Економічний ефект від експлуатації фотоелектричної системи формується за рахунок двох основних складових. Першою складовою є скорочення обсягів електроенергії, що закуповується у зовнішнього постачальника. Другою складовою є можливість реалізації надлишкової електроенергії, яка не була використана для власних потреб об'єкта.

Встановлена потужність фотоелектричної станції становить 46,4 кВт, що дозволяє забезпечити значний річний виробіток електроенергії. Частина виробленої енергії використовується для покриття власного споживання, а надлишок може передаватися до мережі.

Для оцінки економічної ефективності доцільно розглянути прогнозований розподіл виробленої електроенергії між власним споживанням та передачею до мережі.

Таблиця 4.2

Прогнозований розподіл виробленої електроенергії гібридною СЕС

Напрямок використання електроенергії	Частка, %	Обсяг, кВт·год/рік
Продаж електроенергії в мережу за «зеленим» тарифом	50	24 253
Безпосереднє живлення навантаження об'єкта	25	12 127
Заряд акумуляторної системи	20	9 701
Втрати в інверторі, АКБ та кабельних лініях	5	2 425
Разом	100	48 506

Використання акумуляторної системи дозволяє збільшити частку власного споживання сонячної енергії. Частина електроенергії, яка без накопичувача була б передана до мережі, може використовуватись у вечірні години. Це додатково зменшує витрати на оплату електроенергії.

Економічний ефект залежить від багатьох факторів, серед яких:

- річний виробіток електроенергії;
- рівень власного споживання;
- тариф на електроенергію;
- режим роботи акумуляторної системи;
- обсяг електроенергії, переданої до мережі.

Для оцінки результатів доцільно виконати порівняння витрат на електроенергію до та після впровадження фотоелектричної системи.

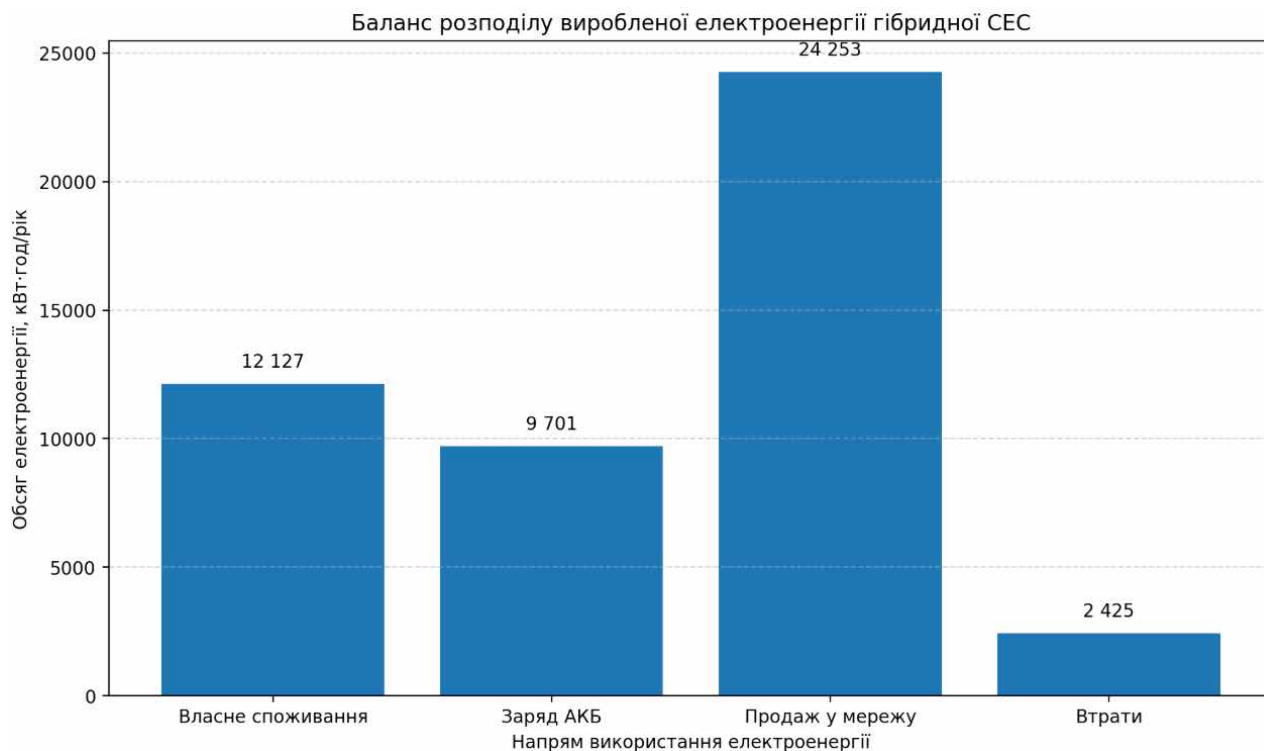


Рис.4.3. Графік балансу розподілу виробленої електроенергії

Важливим фактором є також зменшення залежності від коливань тарифів на електроенергію. Власна генерація дозволяє частково компенсувати можливе зростання вартості електроенергії у майбутньому та підвищує енергетичну незалежність домогосподарства.

Крім безпосереднього економічного ефекту, використання фотоелектричної системи забезпечує додаткові переваги, пов'язані з резервним живленням об'єкта. У сучасних умовах це є важливим фактором для забезпечення надійного електропостачання та безперервної роботи побутового обладнання.

Таким чином, впровадження гібридної фотоелектричної системи потужністю 46,4 кВт є технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Використання сонячної генерації разом із акумуляторною системою дозволяє зменшити витрати на електроенергію, підвищити рівень енергетичної незалежності та створити передумови для отримання додаткового економічного ефекту від експлуатації системи.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано дослідження ефективності роботи гібридної фотоелектричної системи приватного домогосподарства. Проведено аналіз прогнозованої генерації електроенергії та встановлено, що найбільший виробіток спостерігається у весняно-літній період, коли рівень сонячної активності є максимальним.

Досліджено основні режими роботи фотоелектричної системи та особливості взаємодії фотоелектричних модулів, акумуляторної системи та зовнішньої мережі. Встановлено, що використання гібридного інвертора забезпечує автоматичне керування енергетичними потоками та дозволяє ефективно використовувати вироблену електроенергію.

Окрему увагу приділено аналізу роботи акумуляторної системи. Визначено, що використання накопичувача енергії дозволяє збільшити частку власного споживання сонячної генерації та забезпечити резервне живлення об'єкта при аварійних відключеннях електроенергії.

Проведена оцінка економічної ефективності підтвердила доцільність впровадження гібридної фотоелектричної системи. Використання власної генерації та накопичення електроенергії сприяє зменшенню витрат на електропостачання та підвищує енергетичну незалежність домогосподарства.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Аналіз умов праці під час монтажу та експлуатації фотоелектричної системи

Під час монтажу та подальшої експлуатації фотоелектричних систем необхідно забезпечити безпечні умови праці для персоналу, який виконує монтажні, налагоджувальні та ремонтні роботи. Особливістю таких робіт є поєднання електротехнічних робіт із роботами на висоті, що підвищує рівень виробничого ризику.

Монтаж фотоелектричних модулів виконується на покрівлі будівлі, тому одним із найбільш небезпечних виробничих факторів є можливість падіння працівника з висоти. Для запобігання травматизму роботи повинні виконуватись із використанням страхувальних поясів, канатів безпеки та інших засобів індивідуального захисту.

Крім небезпеки падіння з висоти, під час монтажу фотоелектричних модулів існує ризик травмування внаслідок падіння інструменту або елементів конструкцій. З цією метою необхідно організовувати робочі місця таким чином, щоб унеможливити перебування людей у зоні можливого падіння предметів.

Важливим фактором є також вплив погодних умов. Монтажні роботи на покрівлі не рекомендується виконувати під час сильного вітру, атмосферних опадів або ожеледиці, оскільки це суттєво підвищує ризик нещасних випадків.

Під час виконання електромонтажних робіт основну небезпеку становить ураження електричним струмом. Особливістю фотоелектричних систем є те, що сонячні модулі генерують електричну енергію за наявності сонячного випромінювання навіть при відключеному інверторі. Тому роботи з колами постійного струму повинні виконуватись із дотриманням спеціальних вимог електробезпеки.

Для зменшення ризику ураження електричним струмом необхідно:

- використовувати ізольований монтажний інструмент;
- застосовувати діелектричні рукавички;
- виконувати роботи відповідно до вимог правил безпечної експлуатації електроустановок;
- перевіряти відсутність напруги перед початком виконання робіт.

Особливу увагу слід приділяти організації робочого місця. Усі проходи повинні бути вільними від сторонніх предметів, а кабельні лінії та обладнання повинні бути надійно закріплені для виключення можливості механічного пошкодження.

Під час експлуатації фотоелектричної системи необхідно виконувати періодичні огляди обладнання, перевіряти стан кабельних ліній, контактних з'єднань, захисних апаратів та системи заземлення. Регулярне технічне обслуговування дозволяє своєчасно виявляти несправності та запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Для оцінки основних небезпечних та шкідливих виробничих факторів доцільно використати таблицю 5.1.

Таблиця 5.1

Основні небезпечні фактори під час монтажу та експлуатації фотоелектричної системи

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Заходи захисту
Робота на висоті	Падіння працівника	Страховальні пояси та канати
Електричний струм	Електротравми	Засоби електрозахисту
Падіння інструменту	Механічні травми	Організація робочої зони
Атмосферні умови	Травмування персоналу	Обмеження робіт під час негоди
Пожежонебезпечні ситуації	Пошкодження обладнання	Використання засобів пожежогасіння

Таким чином, дотримання вимог охорони праці під час монтажу та експлуатації фотоелектричної системи є необхідною умовою забезпечення безпеки персоналу та надійної роботи обладнання. Виконання організаційних і

технічних заходів дозволяє мінімізувати ризик виникнення нещасних випадків та аварійних ситуацій.

5.2. Заходи з електробезпеки та пожежної безпеки

Під час експлуатації фотоелектричних систем особлива увага повинна приділятися питанням електробезпеки та пожежної безпеки. Наявність кіл постійного та змінного струму, значна встановлена потужність обладнання, а також розташування фотоелектричних модулів на покрівлі будівлі обумовлюють необхідність застосування комплексу технічних та організаційних заходів захисту.

Основною небезпекою під час роботи з фотоелектричними системами є можливість ураження електричним струмом. Особливістю фотоелектричних модулів є те, що вони виробляють електроенергію при наявності сонячного випромінювання незалежно від стану інвертора чи комутаційної апаратури. Тому під час проведення монтажних та ремонтних робіт необхідно враховувати можливість наявності напруги на струмопровідних частинах системи.

Для забезпечення електробезпеки у проєкті передбачено застосування комплексу захисних заходів, до яких належать:

- використання захисного заземлення обладнання;
- встановлення автоматичних вимикачів;
- застосування пристроїв захисту від перенапруг;
- використання кабельної продукції з відповідною ізоляцією;
- маркування електрообладнання та кабельних ліній.

Захисне заземлення є одним із найефективніших засобів захисту від ураження електричним струмом. До системи заземлення підключаються металеві конструкції кріплення фотоелектричних модулів, корпус інвертора, корпуси електротехнічного обладнання та металеві елементи розподільчих щитів.

Автоматичні вимикачі забезпечують захист обладнання від струмів короткого замикання та перевантаження. У разі виникнення аварійного режиму вони автоматично відключають пошкоджену ділянку електричного кола, запобігаючи пошкодженню обладнання та виникненню пожежі.

Для захисту обладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг використовуються пристрої захисту від імпульсних перенапруг (SPD). Встановлення таких пристроїв є особливо важливим для фотоелектричних систем, оскільки сонячні модулі розміщуються на відкритих ділянках покрівлі та можуть піддаватися впливу грозових явищ.

Пожежна безпека фотоелектричної системи забезпечується шляхом правильного вибору обладнання, застосування сертифікованої кабельної продукції та дотримання вимог нормативних документів під час монтажу.

Основними причинами виникнення пожеж у фотоелектричних системах можуть бути:

- пошкодження ізоляції кабельних ліній;
- неякісні контактні з'єднання;
- перевантаження електричних кіл;
- несправність захисної апаратури;
- вплив атмосферних перенапруг.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно виконувати періодичні перевірки стану обладнання та своєчасно усувати виявлені несправності.

Для локалізації можливих загорянь у місцях встановлення електротехнічного обладнання повинні передбачатися первинні засоби пожежогасіння. Для електроустановок рекомендовано використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники, які не пошкоджують електрообладнання та дозволяють безпечно ліквідувати загоряння під напругою.

Таким чином, застосування комплексу заходів електричної та пожежної безпеки забезпечує надійну експлуатацію фотоелектричної системи та мінімізує ризик виникнення аварійних ситуацій під час її роботи.

Таблиця 5.2

Основні заходи забезпечення електро- та пожежної безпеки

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Захисний захід
Ураження електричним струмом	Травмування персоналу	Захисне заземлення
Коротке замикання	Пошкодження обладнання	Автоматичні вимикачі
Атмосферні перенапруги	Вихід обладнання з ладу	SPD-захист
Перегрів контактів	Виникнення пожежі	Контроль контактних з'єднань
Пошкодження ізоляції	Аварійні режими роботи	Періодичні огляди

5.3. Блискавкозахист та система заземлення фотоелектричної системи

Фотоелектричні системи належать до електроустановок, які значною мірою піддаються впливу атмосферних перенапруг. Це пов'язано з тим, що фотоелектричні модулі розташовуються на відкритих ділянках покрівлі та мають значну площу. У разі прямого удару блискавки або виникнення грозових перенапруг можливе пошкодження фотоелектричних модулів, інвертора, акумуляторної системи та іншого електротехнічного обладнання.

Для забезпечення надійної роботи системи у проєкті передбачено комплекс заходів зовнішнього та внутрішнього блискавкозахисту. Основною метою цих заходів є запобігання пошкодженню обладнання та забезпечення безпеки людей під час експлуатації фотоелектричної станції.

Зовнішній блискавкозахист призначений для перехоплення струму блискавки та його безпечного відведення в землю. До складу системи входять блискавкоприймачі, струмовідводи та заземлювальний пристрій.

У разі потрапляння блискавки в блискавкоприймач електричний струм відводиться через струмовідводи до заземлювача, що дозволяє мінімізувати вплив грозового розряду на фотоелектричні модулі та інше обладнання.

Внутрішній блискавкозахист реалізується шляхом встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (SPD). Такі пристрої забезпечують обмеження рівня перенапруги до безпечних значень та захищають обладнання

від імпульсних впливів, які можуть виникати під час грозових явищ або комутаційних процесів у мережі.

У проєкті передбачено встановлення пристроїв захисту від перенапруг як у колах постійного струму між фотоелектричними модулями та інвертором, так і у колах змінного струму між інвертором та мережею електропостачання будівлі.

Важливою складовою системи захисту є система заземлення. Вона забезпечує вирівнювання потенціалів та створює умови для безпечного відведення струмів замикання і грозових струмів у землю.

До системи заземлення повинні бути підключені:

- металеві конструкції кріплення фотоелектричних модулів;
- корпус гібридного інвертора;
- корпуси розподільчих щитів;
- металеві кабельні лотки та інші металеві елементи конструкції.

Одним із важливих параметрів системи заземлення є опір заземлювального пристрою. Відповідно до вимог нормативних документів значення опору заземлення повинно забезпечувати ефективну роботу захисної апаратури та безпечну експлуатацію електроустановки.

Таблиця 5.3

Основні елементи системи блискавкозахисту та заземлення

Елемент системи	Призначення
Блискавкоприймач	Перехоплення розряду блискавки
Струмовідвід	Відведення струму блискавки до заземлювача
Заземлювач	Розсіювання струму в ґрунті
SPD DC	Захист обладнання постійного струму
SPD AC	Захист обладнання змінного струму
Захисне заземлення	Захист персоналу та обладнання

Для підвищення ефективності роботи системи блискавкозахисту необхідно виконувати періодичний контроль стану струмовідводів, заземлювальних провідників та контактних з'єднань. Своєчасне виявлення пошкоджень дозволяє підтримувати необхідний рівень захисту протягом усього терміну експлуатації фотоелектричної станції.

Таким чином, застосування системи блискавкозахисту та заземлення є обов'язковою умовою безпечної експлуатації фотоелектричної системи. Реалізація комплексу зовнішнього та внутрішнього захисту дозволяє мінімізувати ризик пошкодження обладнання під дією атмосферних перенапруг та забезпечити надійну роботу станції протягом усього терміну експлуатації.

5.4. Техніко-економічне обґрунтування проєкту

Одним із завершальних етапів проєктування фотоелектричної системи є оцінка економічної доцільності її впровадження. Проведення техніко-економічного аналізу дозволяє визначити ефективність інвестицій у встановлення фотоелектричної станції та оцінити перспективи її подальшої експлуатації.

Основними складовими вартості фотоелектричної системи є фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, акумуляторна система накопичення енергії, монтажні конструкції, кабельна продукція, захисне обладнання та витрати на виконання монтажних робіт.

Загальна вартість проєкту визначається сумою вартості обладнання та витрат на його встановлення:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{обл}} + C_{\text{мон}}$$

де:

$C_{\text{заг}}$ – загальна вартість проєкту;

$C_{\text{обл}}$ – вартість обладнання;

$C_{\text{мон}}$ – витрати на монтажні роботи

Для оцінки структури витрат основні складові проєкту наведені у таблиці.

Таблиця 5.4

Основні складові вартості фотоелектричної системи

Найменування	Частка у загальній вартості, %
Фотоелектричні модулі	35–40
Гібридний інвертор	15–20
Акумуляторна система	25–30
Монтажні конструкції	5–10
Кабельна продукція та захист	5–10
Монтажні роботи	5–10

Використання фотоелектричної системи дозволяє зменшити обсяги електроенергії, що закуповується із зовнішньої мережі. Додатковий економічний ефект формується за рахунок передачі надлишкової електроенергії до мережі та її подальшої реалізації відповідно до чинних механізмів підтримки відновлюваної енергетики.

Важливим фактором є також використання акумуляторної системи. Накопичення електроенергії дозволяє підвищити рівень власного споживання та більш ефективно використовувати вироблену сонячну енергію без необхідності її передачі до зовнішньої мережі.

Окрім безпосереднього економічного ефекту, впровадження фотоелектричної системи забезпечує низку додаткових переваг:

- підвищення енергетичної незалежності домогосподарства;
- зниження впливу можливого зростання тарифів на електроенергію;
- забезпечення резервного електроживлення при аварійних відключеннях;
- зменшення навантаження на зовнішню електричну мережу;
- використання екологічно чистого джерела енергії.

Для більш наочного представлення структури витрат доцільно побудувати кругову діаграму розподілу вартості між основними елементами системи.

Проведений аналіз свідчить про доцільність впровадження фотоелектричної системи для приватного домогосподарства. Незважаючи на значні початкові інвестиції, система забезпечує довгостроковий економічний ефект та сприяє підвищенню енергетичної незалежності споживача.

5.5. Розрахунок терміну окупності фотоелектричної системи

Орієнтовна вартість системи потужністю 46,4 кВт з акумуляторною батареєю 40,96 кВт·год наведена в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Орієнтовна вартість фотоелектричної системи

Найменування	Орієнтовна вартість, грн
Фотоелектричні модулі 80 шт.	520 000
Гібридний інвертор Deye 50 кВт	196 000
Акумуляторна система 40,96 кВт·год	414 168
Кріплення та монтажні конструкції	180 000
Кабельна продукція та захист	120 000
Монтажні роботи	250 000
Система обліку та моніторингу	45 000
Загальна вартість	1 725 168

Річна генерація фотоелектричної системи приймається на рівні 50 800 кВт·год. Для розрахунку приймаємо, що 50 % електроенергії використовується для власного споживання, а 50 % передається до зовнішньої мережі.

Власне споживання:

$$W_{\text{вл}} = 50800 \cdot 0,5 = 25400 \text{ кВт} \quad (5.1)$$

Передача до мережі:

$$W_{\text{мер}} = 50800 \cdot 0,5 = 25400 \text{ кВт} \quad (5.2)$$

Для орієнтовного розрахунку приймаємо тариф на електроенергію 4,32 грн/кВт·год, а вартість продажу за «зеленим тарифом» — умовно 6,00

грн/кВт·год.

Річна економія від власного споживання:

$$E_{\text{вл}} = 25400 \cdot 4,32 = 109728 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Річний дохід від продажу електроенергії:

$$E_{\text{пр}} = 25400 \cdot 6,00 = 152400 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Загальний річний економічний ефект:

$$E_{\text{заг}} = 109728 + 152400 = 262128 \text{ грн} \quad (5.5)$$

Термін окупності визначається за формулою:

$$T = \frac{C_{\text{заг}}}{E_{\text{заг}}} \quad (5.6)$$

$$T = \frac{1725168}{262128} = 6,58 \text{ року}$$

Отже, орієнтовний термін окупності фотоелектричної системи становить приблизно **6,6 року**.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, електро- та пожежної безпеки, а також виконано техніко-економічне обґрунтування проєктованої фотоелектричної системи.

Проведено аналіз умов праці під час монтажу та експлуатації фотоелектричної станції. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з виконанням робіт на висоті та експлуатацією електроустановок. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці.

Розглянуто заходи електробезпеки та пожежної безпеки, що передбачають використання систем захисного заземлення, автоматичних вимикачів, пристроїв захисту від імпульсних перенапруг та первинних засобів пожежогасіння. Встановлено, що застосування зазначених заходів дозволяє забезпечити надійну та безпечну експлуатацію фотоелектричної системи.

Виконано аналіз системи блискавкозахисту та заземлення. Показано, що використання зовнішнього та внутрішнього блискавкозахисту дозволяє мінімізувати ризик пошкодження обладнання внаслідок впливу атмосферних перенапруг та забезпечити необхідний рівень електробезпеки.

У результаті техніко-економічного аналізу визначено орієнтовну вартість проєкту та виконано розрахунок терміну його окупності. Отримані результати показали, що впровадження гібридної фотоелектричної системи потужністю 46,4 кВт є економічно доцільним рішенням. Розрахунковий термін окупності становить близько 6–7 років, після чого система забезпечує отримання стабільного економічного ефекту та підвищує рівень енергетичної незалежності приватного домогосподарства.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, пов'язане з обґрунтуванням енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства на базі гібридної фотоелектричної станції з можливістю накопичення та передачі надлишкової електроенергії до зовнішньої електричної мережі.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку сонячної енергетики та особливостей використання фотоелектричних систем у системах електроживлення. Розглянуто основні типи фотоелектричних систем, їх переваги та недоліки. Встановлено, що найбільш перспективним рішенням для приватних домогосподарств є використання гібридних фотоелектричних систем, які забезпечують можливість накопичення електроенергії, резервного живлення споживачів та передачі надлишкової електроенергії до мережі.

У другому розділі виконано розробку структури енергоефективної системи електроживлення приватного домогосподарства. Обґрунтовано вибір основного обладнання, зокрема фотоелектричних модулів JinKo Solar JKM580N-72HL4/MR, гібридного інвертора Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 та акумуляторної системи накопичення енергії Deye BOS-GM5.1. Визначено основні режими функціонування системи та напрямки потоків електроенергії між джерелами генерації, накопиченням та навантаженням.

У третьому розділі виконано розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи. Визначено встановлену потужність фотоелектричної станції на рівні 46,4 кВт. Для реалізації проєкту обрано 80 монокристалічних фотоелектричних модулів потужністю 580 Вт кожний, які об'єднано у 8 стрингів по 10 модулів. Проведено перевірку відповідності електричних параметрів стрингів характеристикам інвертора, виконано розрахунок резервування навантаження акумуляторною системою, перевірено втрати напруги в кабельних лініях та обґрунтовано вибір захисного обладнання. Отримані результати

підтвердили технічну можливість реалізації проєктованої системи та відповідність параметрів обладнання вимогам надійної експлуатації.

У четвертому розділі проведено дослідження ефективності роботи фотоелектричної системи. Встановлено, що прогнозований річний виробіток електроенергії становить близько 50,8 МВт·год. Досліджено роботу системи в денному, нічному та аварійному режимах, а також визначено вплив акумуляторної системи накопичення енергії на рівень енергетичної незалежності об'єкта. Отримані результати підтвердили можливість ефективного використання виробленої електроенергії та забезпечення резервного електроживлення споживачів.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки, блискавкозахисту та заземлення фотоелектричної системи. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечної експлуатації обладнання. Виконано техніко-економічне обґрунтування проєкту та визначено його економічну ефективність.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що впровадження гібридної фотоелектричної системи потужністю 46,4 кВт із використанням 80 фотоелектричних модулів, гібридного інвертора потужністю 50 кВт та акумуляторної системи ємністю 40,96 кВт·год дозволяє забезпечити покриття потреб приватного домогосподарства в електроенергії, підвищити рівень енергетичної незалежності та створити умови для ефективного використання відновлюваних джерел енергії. Загальна вартість реалізації системи становить близько 1,73 млн грн, прогнозований річний економічний ефект досягає 262 тис. грн, а розрахунковий термін окупності проєкту становить 6,6 року, що є значно меншим за нормативний строк служби основного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих технічних рішень під час проєктування фотоелектричних систем електроживлення приватних домогосподарств. Реалізація системи сприятиме підвищенню енергоефективності об'єкта та забезпеченню надійного резервного електроживлення споживачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Харків : Форт, 2017. 760 с.
2. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Основа, 2018. 128 с.
3. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ, 2010.
4. ДСТУ EN 62446-1:2017 Фотоелектричні системи. Вимоги до випробувань, документації та технічного обслуговування.
5. ДСТУ EN 61724-1:2018 Фотоелектричні системи. Контроль продуктивності.
6. ДСТУ ІЕС 60364-7-712:2015 Вимоги до фотоелектричних установок.
7. ДСТУ ІЕС 62548:2021 Проектування фотоелектричних масивів.
8. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту.
9. Кодекс систем розподілу. Київ : НКРЕКП, 2018.
10. Денисюк С.П. Енергозбереження та енергоефективність. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 387 с.
11. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Енергоефективні технології в електроенергетиці. Київ : КПІ, 2019. 412 с.
12. Кузнєцов М.П. Відновлювані джерела енергії. Київ : НУБіП України, 2021. 356 с.
13. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 540 с.
14. Кузнєцов В.Г. Електропостачання промислових підприємств. Київ : Каравела, 2019. 312 с.
15. Рожко В.І. Основи енергоменеджменту. Київ : НУБіП України, 2020. 280 с.
16. Праховник А.В. Енергоефективність та енергозбереження. Київ : КПІ, 2018. 223 с.

- 17.Бойко В.С. Альтернативні джерела енергії. Київ : Професіонал, 2019. 288 с.
- 18.Мазуренко А.С. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Одеса : ОНПУ, 2020. 246 с.
- 19.Бобров О.В. Електричні станції та підстанції. Київ : Ліра-К, 2018. 424 с.
- 20.International Energy Agency. Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028. Paris : IEA, 2023.
- 21.International Energy Agency. Renewables 2024. Paris : IEA, 2024.
- 22.International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Statistics 2024. Abu Dhabi : IRENA, 2024.
- 23.International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook 2024. Abu Dhabi : IRENA, 2024.
- 24.Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaics Report. Freiburg, 2024.
- 25.NREL. Best Practices in Photovoltaic System Operations and Maintenance. Golden, Colorado, 2023.
- 26.Messenger R., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 694 p.
- 27.Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 3rd ed. Wiley, 2020. 1312 p.
- 28.Kalogirou S. Solar Energy Engineering. 3rd ed. Academic Press, 2022. 760 p.
- 29.Duffie J., Beckman W. Solar Engineering of Thermal Processes. 5th ed. Wiley, 2020. 928 p.
- 30.Masters G. Renewable and Efficient Electric Power Systems. Wiley, 2019. 720 p.
- 31.Boyle G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford University Press, 2021. 584 p.
- 32.Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. Routledge, 2021. 816 p.
- 33.Patel M. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, 2021. 458 p.
- 34.Wenham S., Green M., Watt M. Applied Photovoltaics. Routledge, 2021. 312 p.