

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 171 – Електроніка

освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ:**

МОНІТОРИНГ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ

Здобувача групи ЕП.м-21н Биркуна Антона Андрійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Керівник, доцент кафедри
електроніки, загальної та прикладної
фізики, к.ф.-м.н., доцент

Іван БУРИК

Суми – 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«16» квітня 2024 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Биркуна Антона Андрійовича

Тема роботи: **ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ**
ЕНЕРГІЇ: МОНІТОРИНГ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ

затверджена наказом по університету від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 20 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Фотоелектричні системи є важливим джерелом відновлюваної енергії, яка зазнає постійного зростання використання через свою екологічну чистоту та сталість по відношенню до джерел традиційних палив. Однак, для забезпечення ефективності та надійності їх функціонування, необхідно розробляти та досліджувати системи моніторингу. Дослідження фотоелектричних систем з використанням програмного середовища Matlab/Simulink сприяє вдосконаленню технологій їх управління та контролю.

Мета роботи полягає в розробці та вдосконаленні методів та засобів моніторингу й оптимізації продуктивності фотоелектричних систем для підвищення їх ефективності.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Огляд електронних систем моніторингу фотоелектричних перетворювачів.

2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність фотоелектричних систем.

3. Технологій фотоелектричних перетворювачів та їх характеристики.

4. Розробка математичних моделей фотоелектричних систем та їх інтеграція в середовище Matlab/Simulink для подальшого аналізу та експериментів.

5. Результати моделювання робочих характеристик фотоелектричної сонячної

станції.

6. Висновки.

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

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 4-8. Фізичні основи фотоелектричного ефекту.

Слайди № 9-12. Конструкція та параметри фотоелектричних систем.

Слайди № 12-13. Електронні системи моніторингу сонячних станцій.

Слайди № 14-15. Методика моделювання і результати.

Слайд №16. Висновки.

Слайд №17. Подяка.

6. Дата видачі завдання 03.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 16.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	21.05.2024 р., 11-40 онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Биркун А.А.

Науковий керівник

Бурик І.П.

АНОТАЦІЯ

Обсяг роботи: 38 сторінок, 10 рисунків, 3 таблиці, 46 використаних джерел.

Актуальність теми роботи.

Фотоелектричні системи (ФЕС) стали ключовим компонентом в галузі відновлюваної енергії, забезпечуючи електроенергію з використанням сонячної радіації. З метою забезпечення оптимального функціонування та підтримки надійності ФЕС, важливо розробляти та впроваджувати системи моніторингу, які забезпечують постійний нагляд і контроль за їхньою роботою. Моніторинг ФЕС засобами Matlab/Simulink є актуальною та перспективною областю досліджень, оскільки дозволяє підвищити ефективність та надійність їх роботи.

Мета роботи: полягає в розробці методів та засобів моніторингу й оптимізації продуктивності фотоелектричних систем для підвищення їх ефективності.

Методи: аналіз літературних джерел, математичне моделювання, експериментальних дослідження, статистичний аналіз даних та методи оптимізації.

Отримані результати:

1. У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що впровадження систем моніторингу та оптимізації продуктивності фотоелектричних систем дозволяє підвищити ефективність їх використання. Розглянуто нові методи та алгоритми моніторингу й оптимізації продуктивності фотоелектричних систем з використанням сучасних електронних інформаційних технологій.

2. Отримані наукові результати можна впровадити при проектуванні та експлуатації фотоелектричних установок. Розроблені рекомендації щодо впровадження систем моніторингу та оптимізації продуктивності фотоелектричних систем можуть бути використані в сонячній енергетиці.

3. Досліджено ефективність роботи ФЕС, розглянуто вплив зміни зовнішніх умов (освітленості, температури) та конструктивних особливостей

(використання захисних діодів) на роботу реальної сонячної станції в середовищі Matlab/Simulink. В умовах затінення від 1000 Вт/м^2 до 500 Вт/м^2 фіксується пропорційне зниження на 51,7% та 51,3% максимальної вихідної потужності сонячної станції при відповідних температурах $25 \text{ }^\circ\text{C}$ та $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Результати дослідження показали можливості та переваги використання Matlab/Simulink у розробці систем моніторингу фотоелектричних систем та можуть бути використані для подальшого розвитку та впровадження інформаційних систем.

Рекомендації щодо використання: врахування впливу зовнішніх факторів на зміну параметрів та загальне функціонування фотоелектричної системи сонячної станції.

Ключові слова: алгоритми оптимізації, ефективність, моніторинг, оптимізація продуктивності, сонячна енергетика, фотоелектричні системи.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	8
1.1. Огляд фотоелектричних перетворювачів та їх характеристик	8
1.2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність ФЕС	12
1.3. Методи підвищення продуктивності ФЕС	15
РОЗДІЛ 2. МОНІТОРИНГ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	17
2.1. Конфігурація та дослідження в Matlab/Simulink параметрів ФЕС	17
2.2. Методи та засоби моніторингу продуктивності ФЕС	20
2.3 Аналіз даних моніторингу та виявлення проблем.	22
2.4. Розробка системи моніторингу продуктивності ФЕС	23
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	25
3.1. Методи оптимізації продуктивності ФЕС	25
3.2. Результати дослідження ФЕС засобами Matlab/Simulink	31
3.3 Розробка алгоритмів оптимізації продуктивності ФЕС.....	31
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

ВСТУП

Розвиток відновлюваних джерел енергії стає все більш важливим для світової спільноти, що має намір зменшити енергетичну залежність та забезпечити себе від можливих ризиків, пов'язаних з іншими джерелами енергії. Незважаючи на деякі недоліки, наприклад, залежність від інтенсивності світла та потребу у великій площі під сонячними панелями, сонячна енергія вважається майбутнім перспективним напрямком розвитку. Електроенергія, генерована сонячними електростанціями, є практично безкоштовною, за винятком витрат на обладнання, що робить сонячну енергію надзвичайно привабливою. Пошук нових технологій, вдосконалення існуючих, а також їх економічно ефективного застосування та розширення сфер використання є пріоритетами [1-8]. Це зумовлено декількома факторами, такими як очікуване виснаження запасів традиційного палива, зростання його вартості, недосконалість і мале ефективне використання технологій, а також негативний вплив на довкілля.

Сучасні автоматизовані системи збору даних зазвичай побудовані із застосуванням в них мікроконтролерів. Перетворювачі сигналів від первинних пристроїв (датчиків) і безпосередньо самі мікроконтролери, через їх модулі входів-виходів, здійснюють перетворення вхідних даних. Далі реалізується різні варіанти організації інформаційних каналів, зокрема передача програмних змінних з програми мікроконтролера в програму комп'ютерної системи управління, їх відправка на пристрої відображення інформації, тощо.

Таким чином, тема магістерської роботи "Фотоелектричні системи генерації енергії: моніторинг та оптимізація продуктивності" є надзвичайно актуальною та важливою як з практичної, так і з наукової точки зору. Вона спрямована на вирішення ключових проблем сонячної енергетики та сприяє її ефективному розвитку та впровадженню.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

1.1. Огляд фотоелектричних перетворювачів та їх характеристик

Фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) є ключовими компонентами фотоелектричних систем, які перетворюють сонячну енергію в електричну.

Процес перетворення відбувається в сонячних елементах, виготовлених з напівпровідникових матеріалів, таких як кремній. Під дією сонячного світла ці елементи генерують електричний струм. Об'єднуючи сонячні елементи в батареї, можна створювати великі фотоелектричні станції. Коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричних установок складає приблизно 17-20 %. Сонячні фотоелектричні системи прості в експлуатації та не містять рухомих частин, проте самі фотоелементи є складними напівпровідниковими пристроями, подібними до тих, що використовуються при виробництві інтегральних схем [1].

На рис. 1.1. представлена загальна конструкція фотоелектричної панелі.

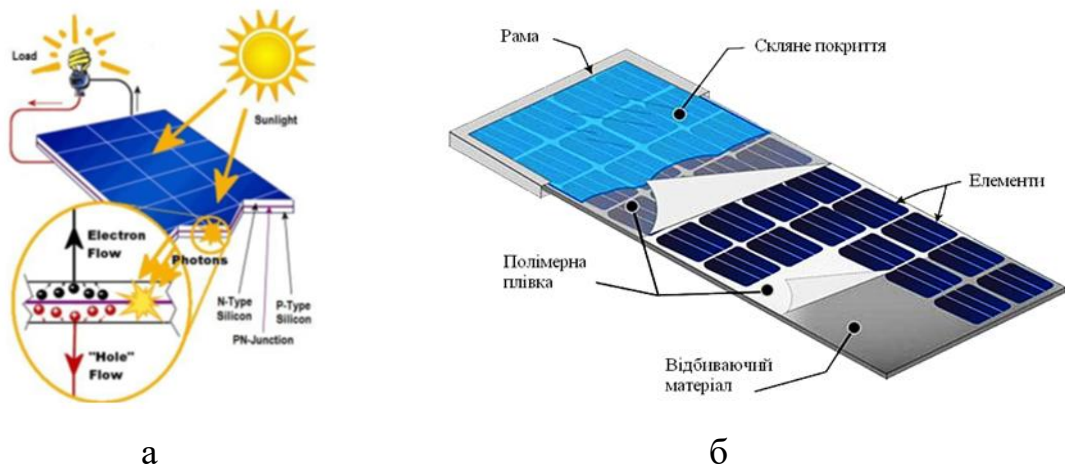


Рис 1.1. Ілюстрація принципу дії (а) та конструкція ФЕП (б)[1]

Існує кілька типів ФЕП, кожен з яких має свої особливості та характеристики: монокристалічні кремнієві; полікристалічні кремнієві; тонкоплівкові; перовскітні; органічні; каскадні (тандемні); концентраторні.

На рис. 1.2 наведено зовнішній вигляд типових сонячних модулів.

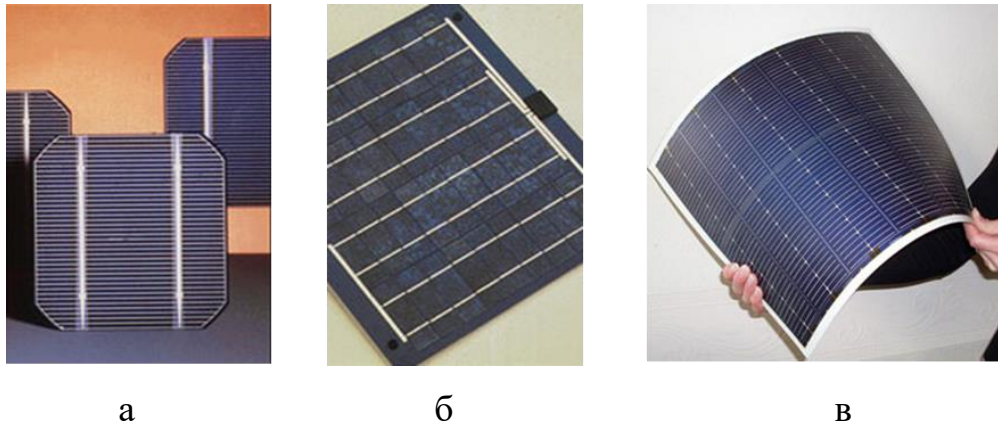


Рис. 1.2. Монокристалічний (а), полікристалічний (б) та плівковий (в) ФЕП [4]

Монокристалічні кремнієві ФЕП є найбільш поширеними та ефективними, з коефіцієнтом корисної дії (ККД) до 25 %. Вони виготовляються з високоочищеного кремнію та мають однорідну структуру.

Полікристалічні кремнієві ФЕП мають дещо нижчу ефективність (до 20 %), але є більш економічно вигідними у виробництві. Вони складаються з багатьох кристалів кремнію, що утворюють менш однорідну структуру.

Тонкоплівкові ФЕП, такі як аморфний кремній (a-Si), телурид кадмію (CdTe) та діселенід міді-індію-галію (CIGS), мають нижчу ефективність (до 15 %), але є більш гнучкими та легкими, що дозволяє їх використовувати в різноманітних застосуваннях.

Перовскітні ФЕП є відносно новою технологією, яка швидко розвивається. Вони мають потенціал досягнення високої ефективності (до 30 %) при низькій вартості виробництва.

Органічні ФЕП використовують органічні напівпровідники та мають перспективи для створення гнучких і прозорих сонячних елементів, але наразі мають низьку ефективність (до 10 %).

Каскадні (тандемні) ФЕП складаються з кількох шарів різних напівпровідникових матеріалів, що дозволяє більш ефективно поглинати різні частини сонячного спектру. Їх ефективність може досягати 40 % і вище.

Концентраторні ФЕП використовують оптичні системи (лінзи або дзеркала) для фокусування сонячного світла на малій площі високоефективних сонячних

елементів. Це дозволяє зменшити витрати на матеріали та підвищити ефективність [3].

У таблиці 1.1 наведено порівняльні характеристики різних типів ФЕП.

Таблиця 1.1

Типи фотоелектричних елементів [2]

Тип елементу	Ефективність	Переваги	Недоліки
Полікристалічні (p-Si)	~15%	Низька ціна	Чутливий до підвищених температур; скорочений термін експлуатації
Монокристалічні (Mono-Si)	~20%	Висока продуктивність; адаптовано для комерційного застосування; тривалий термін експлуатації.	Висока вартість
Концентровані (CVP)	~41%	Надзвичайно висока продуктивність та ефективність.	Необхідний сонячний трекер та система охолодження для забезпечення високої ефективності
Тонкоплівкові з аморфного кремнію (a-Si)	~7-10%	Відносно низька вартість; простий у виробництві та гнучкий	Не високі гарантії та термін служби

Важливими характеристиками ФЕП є їх ККД, спектральна чутливість, температурний коефіцієнт, деградація з часом та вартість. ККД визначає, яка частина сонячної енергії перетворюється в електричну. Спектральна чутливість показує, наскільки ефективно ФЕП поглинає світло різних довжин хвиль. Температурний коефіцієнт характеризує зміну ефективності ФЕП при зміні температури. Деградація з часом відображає зниження продуктивності ФЕП протягом їх терміну служби [4].

Вартість ФЕП є важливим фактором при виборі технології для фотоелектричної системи. Вона залежить від матеріалів, технології виробництва та

масштабів виробництва. При проектуванні фотоелектричної системи необхідно враховувати характеристики ФЕП, умови експлуатації та економічні фактори для вибору оптимальної технології [5].

Розвиток технологій ФЕП спрямований на підвищення їх ефективності, зниження вартості, збільшення терміну служби та розширення можливостей застосування. Дослідження в області перовскітних та органічних ФЕП відкривають нові перспективи для створення високоефективних і недорогих сонячних елементів.

Удосконалення технологій виробництва, оптимізація структури та використання нових матеріалів дозволяють підвищити ефективність та знизити вартість ФЕП. Розробка концентраторних та каскадних ФЕП є перспективним напрямком для досягнення високої ефективності та зниження витрат на матеріали. Інтеграція ФЕП в будівлі (BIPV) та транспортні засоби відкриває нові можливості для використання фотоелектричних систем в урбанізованому середовищі [6].

Розвиток технологій зберігання енергії, таких як акумулятори та водневі системи, дозволяє більш ефективно використовувати енергію, генеровану фотоелектричними системами. Стандартизація та сертифікація ФЕП та фотоелектричних систем забезпечує їх якість, надійність та безпеку. Державна підтримка та стимулювання розвитку фотоелектричної енергетики сприяє впровадженню та поширенню фотоелектричних систем. Освіта та інформування суспільства про переваги та можливості фотоелектричних систем є важливими для їх широкого впровадження.

Міжнародне співробітництво та обмін досвідом в області фотоелектричних технологій сприяє їх розвитку та поширенню. Фотоелектричні системи відіграють важливу роль у переході до сталої енергетики та боротьбі зі зміною клімату [7].

1.2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність ФЕС

Ефективність фотоелектричних систем залежить від багатьох факторів, які можна розділити на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх факторів належать кліматичні умови, географічне розташування, затінення та забруднення.

Інтенсивність сонячного випромінювання є ключовим фактором, що визначає продуктивність фотоелектричної системи. Вона залежить від географічної широти, сезону, погодних умов та часу доби.

Температура навколишнього середовища впливає на ефективність ФЕП. Підвищення температури зазвичай призводить до зниження продуктивності, особливо для кристалічних кремнієвих ФЕП.

Затінення від дерев, будівель або інших об'єктів може значно знизити вихідну потужність фотоелектричної системи. Навіть часткове затінення одного ФЕП може вплинути на продуктивність всієї системи.

Забруднення поверхні ФЕП пилом, брудом, листям або снігом зменшує кількість сонячного світла, яке досягає сонячних елементів, що знижує їх ефективність [8].

Кут нахилу та орієнтація фотоелектричних модулів відносно сонця впливають на кількість отриманої сонячної енергії. Оптимальний кут нахилу залежить від географічної широти та сезону.

На рис. 1.3. приведено оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів відносно сонця.



Рис. 1.3. Оптимальний кут нахилу ФЕП відносно сонця [9]

Спектральний склад сонячного випромінювання змінюється протягом дня та року, що впливає на продуктивність ФЕП з різною спектральною чутливістю.

Внутрішні фактори, що впливають на ефективність фотоелектричних систем, включають характеристики ФЕП, конфігурацію системи, якість компонентів та втрати в системі [10].

Ефективність ФЕП, яка визначається їх типом та якістю виготовлення, безпосередньо впливає на продуктивність фотоелектричної системи. Більш ефективні ФЕП генерують більше енергії при однакових умовах.

Розмір та конфігурація фотоелектричної системи, включаючи кількість та розташування ФЕП, інверторів та інших компонентів, впливають на її загальну ефективність.

Якість та надійність компонентів фотоелектричної системи, таких як ФЕП, інвертори, кабелі та з'єднувачі, мають значний вплив на її продуктивність та термін служби.

Втрати в фотоелектричній системі можуть бути спричинені резистивними втратами в кабелях, втратами в інверторах, втратами при неузгодженості ФЕП та іншими факторами. [11].

Ефективність відстеження точки максимальної потужності (MPPT) інвертора впливає на здатність системи адаптуватися до змінних умов освітлення та температури, оптимізуючи вихідну потужність.

Деградація ФЕП з часом, спричинена факторами навколишнього середовища та експлуатаційними умовами, призводить до поступового зниження ефективності фотоелектричної системи. [12].

Моніторинг та своєчасне виявлення несправностей або зниження продуктивності дозволяє вжити коригувальних заходів та підтримувати ефективність системи на належному рівні. Регулярне технічне обслуговування, включаючи очищення ФЕП, перевірку з'єднань та оновлення програмного забезпечення, сприяє підтримці високої ефективності фотоелектричної системи.

Правильне проектування фотоелектричної системи з урахуванням місцевих умов, вибору обладнання та конфігурації системи є важливим для досягнення максимальної ефективності. Використання систем охолодження або вентиляції для ФЕП може зменшити вплив високих температур на їх ефективність, особливо в спекотних кліматичних умовах. Застосування концентраторів або систем стеження

за сонцем може підвищити ефективність фотоелектричної системи шляхом збільшення кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на ФЕП [13].

На рис.1.4 наведено типову схему функціонування сонячної станції на 10 кВт.

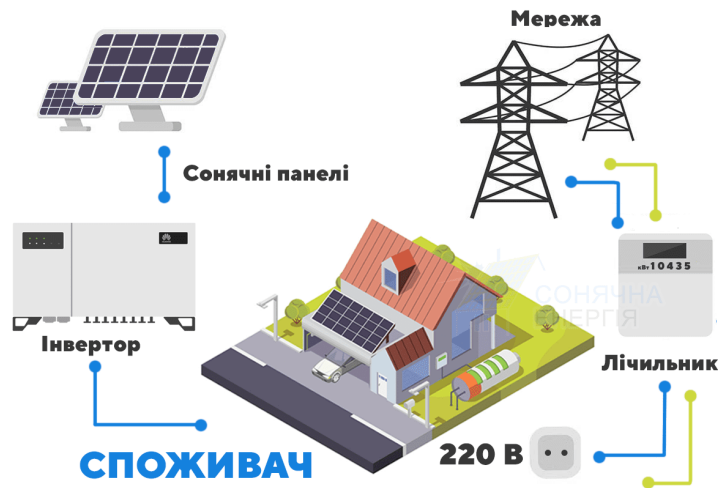


Рис.1.4. Типова схема функціонування сонячної станції [14]

Оптимізація розташування та розміщення фотоелектричних систем на дахах, фасадах будівель або на землі з урахуванням місцевих умов та обмежень сприяє максимізації їх ефективності.

Розробка та впровадження нових матеріалів, технологій та конструкцій ФЕП, таких як багатоперехідні, перовскітні або органічні сонячні елементи, має потенціал для підвищення ефективності фотоелектричних систем. Удосконалення інверторів, систем моніторингу та управління фотоелектричними системами дозволяє оптимізувати їх роботу та підвищити загальну ефективність.

Врахування екологічних факторів, таких як утилізація відпрацьованих ФЕП та мінімізація впливу на навколишнє середовище, є важливим аспектом при розгляді ефективності фотоелектричних систем у довгостроковій перспективі.

Економічна ефективність фотоелектричних систем залежить не лише від їх технічної ефективності, але й від вартості компонентів, монтажу, обслуговування та тарифів на електроенергію. Державна політика, стимули та регулювання ринку відновлюваної енергетики можуть суттєво впливати на ефективність та привабливість фотоелектричних систем для інвесторів та споживачів [15].

1.3. Методи підвищення продуктивності ФЕС

Підвищення продуктивності фотоелектричних систем є ключовим завданням для забезпечення їх ефективності та конкурентоспроможності. Існує ряд методів, які можуть бути застосовані для оптимізації роботи та збільшення виробництва електроенергії фотоелектричними системами.

Одним з основних методів підвищення продуктивності є використання більш ефективних ФЕП. Постійне вдосконалення технологій виготовлення сонячних елементів, таких як багатоперехідні, перовскітні або органічні ФЕП, дозволяє досягти вищих значень ККД та збільшити вихідну потужність [16].

Оптимізація конструкції та компоновання фотоелектричних модулів також може сприяти підвищенню їх продуктивності. Використання антивідбивних покриттів, текстурованих поверхонь та оптимізованих електричних з'єднань дозволяє зменшити оптичні та електричні втрати.

Системи стеження за сонцем (трекери) дозволяють орієнтувати фотоелектричні модулі перпендикулярно до сонячних променів протягом дня, що максимізує кількість отриманої сонячної енергії. Одноосьові та двоосьові трекери можуть збільшити виробництво електроенергії на 20-40 % порівняно з нерухомими системами.

Використання концентраторів сонячного випромінювання, таких як лінзи Френеля або параболічні дзеркала, дозволяє фокусувати сонячне світло на менших за площею високоефективних ФЕП. Це зменшує витрати на матеріали та підвищує загальну ефективність системи [8].

Оптимізація роботи інверторів та систем управління є важливим аспектом підвищення продуктивності фотоелектричних систем. Застосування алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) дозволяє інверторам адаптуватися до змінних умов освітлення та температури, забезпечуючи максимальну вихідну потужність.

Зниження температури ФЕП може підвищити їх ефективність, особливо в спекотних кліматичних умовах. Використання пасивних або активних систем

охолодження, таких як радіатори, теплові трубки або водяне охолодження, допомагає підтримувати оптимальну робочу температуру ФЕП.

Регулярне технічне обслуговування та очищення фотоелектричних модулів від забруднень, пилу та снігу є важливим для підтримки їх продуктивності на високому рівні. Своєчасне виявлення та усунення несправностей запобігає зниженню ефективності системи [13].

Оптимізація розташування та орієнтації фотоелектричних систем з урахуванням місцевих умов, таких як широта, клімат та топографія, дозволяє максимізувати кількість отриманої сонячної енергії.

Застосування систем накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї або водневі паливні елементи, дозволяє зберігати надлишкову енергію, вироблену фотоелектричною системою, для використання в періоди пікового попиту або при відсутності сонячного випромінювання [16-28].

РОЗДІЛ 2.

МОНІТОРИНГ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

2.1. Конфігурація та дослідження параметрів ФЕС засобами Matlab/Simulink

За даними виробників в середовищі Matlab/Simulink за допомогою мови Simscape™ в даній роботі було створено різні блоки сонячних електростанцій. Було досліджено зміни умов затінення в сонячній установці або модулі, яке виникає, коли сонячне випромінювання не є рівномірним для всіх ФЕП. Розглянута модель може бути використана для вивчення ефектів затінення фотоелектричних модулів та впливу температури у великій взаємопов'язаній сонячній станції або одному фотоелектричному модулі (рис.2.1).

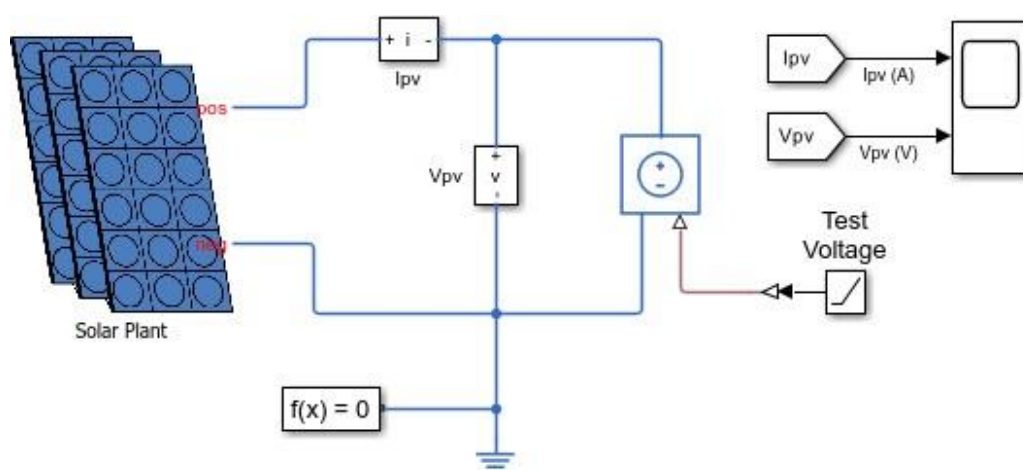


Рис.2.1. Структурна модель Matlab/Simulink для фотоелектричної сонячної станції [27]

Блок сонячної електростанції включає $N_s \cdot N_p$ фотоелектричні модулі (панелі). Кожен сонячний фотоелектричний модуль складається з N_p_cell паралельно з'єднаних рядів, і кожен рядок містить N_s_cell послідовно з'єднаних сонячних елементів (рис.2.4). Блок сонячних батарей із бібліотеки Simscape™ Electrical™ моделює ряди сонячних батарей. Щоб визначити розмір фотоелектричного модуля

необхідно задати кількість комірок N_{s_cell} і N_{p_cell} . Для дослідження реальних сонячних панелей параметри ФЕП отримують безпосередньо із таблиці даних виробника. Додаткові відомості про параметризацію сонячних панелей приведено в бібліотеці Simscape Electrical «SolarPanelValidation» [27].

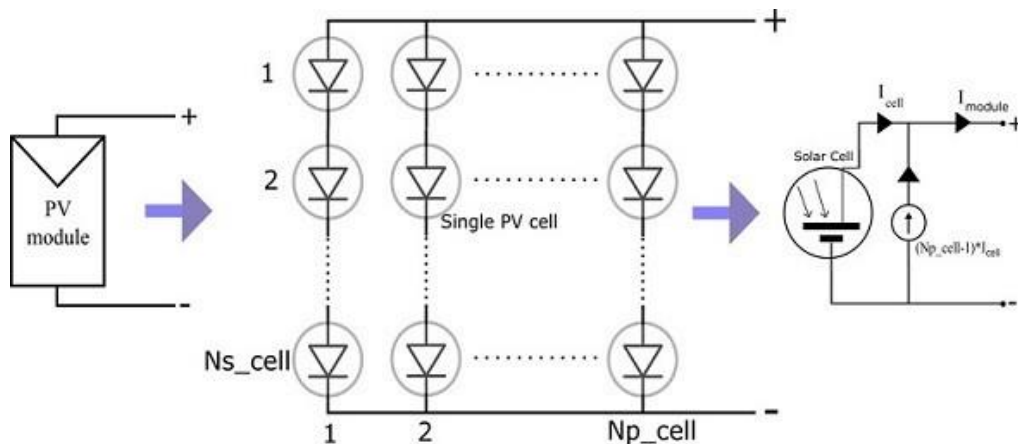


Рис.2.2. Структура фотоелектричного модуля [27]

Основні параметри фотоелектричного модуля: кількість послідовно з'єднаних сонячних фотоелектричних модулів; кількість паралельно з'єднаних сонячних фотоелектричних ліній; сонячне опромінення кожного сонячного фотоелектричного модуля; температура з'єднання сонячних елементів на кожному фотоелектричному модулі; кількість паралельно з'єднаних рядів сонячних елементів у фотоелектричному модулі.

Блок сонячної електростанції складається з обхідних і блокуючих діодів [27]. Діодний блок із бібліотеки Simscape Foundation моделює захисні діоди. Щоб обійти сонячний фотоелектричний модуль, який не має достатнього освітлення для підтримки струму сонячної фотоелектричної ланцюга, обхідні діоди підключаються до фотоелектричних модулів. Блокувальні діоди ізолюють сонячну фотоелектричну мережу, яка має нижчу напругу. Захисні діоди покращують вихідну потужність і термін служби сонячних фотомодулів.

Як приклад на рис.2.5 та у табл.2.1 відповідно наведено вольт-амперні характеристики, криві потужності та електричні параметри сонячної станції з однорідним та неоднорідним освітленням.

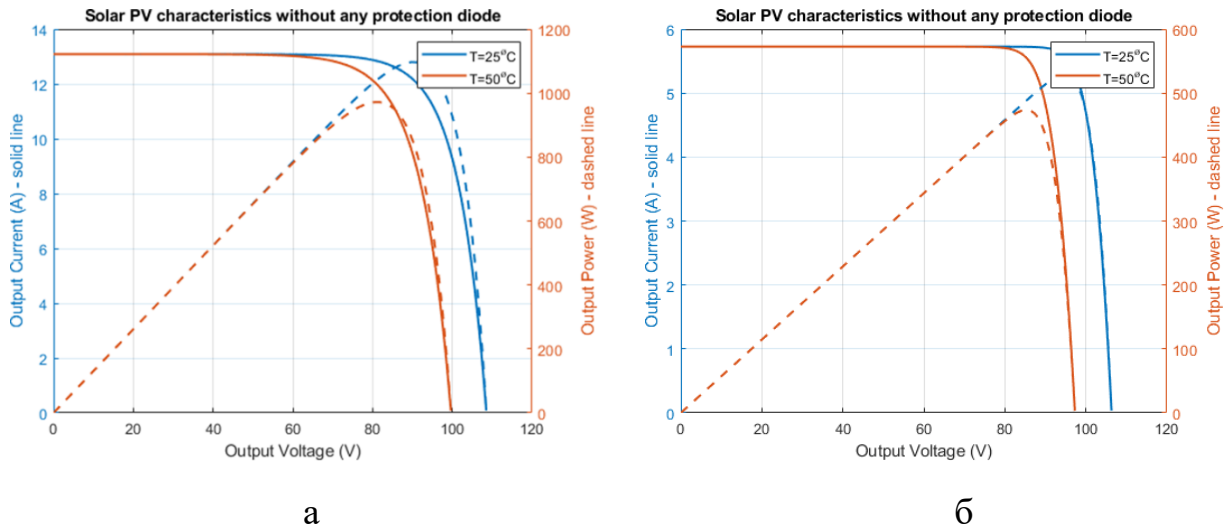


Рис. 2.5. ВАХ та криві потужності сонячної станції з однорідним освітленням (а) і затіненням (б)

Таблиця 2.1.

Параметри сонячної електростанції в різних режимах

Температура, °С	Сила струму МРРТ, А	Напруга МРРТ, В	Максимальна потужність, Вт
без затінення			
25	12,156	90,226	1096,8
50	11,981	81,117	971,88
із затіненням 50%			
25	5,5836	94,78	529,21
50	5,5517	85,297	473,55

В умовах затінення від 1000 Вт/м² до 500 Вт/м² фіксується пропорційне зниження 51,7% та 51,3% максимальної вихідної потужності сонячної станції при температурах 25 °С та 50 °С.

2.2. Методи та засоби моніторингу продуктивності ФЕС

Моніторинг продуктивності фотоелектричних систем є важливим аспектом забезпечення ефективного функціонування та максимізації виробництва електроенергії. Для здійснення моніторингу використовуються різні методи та засоби, які дозволяють збирати та аналізувати дані про роботу фотоелектричної системи в режимі реального часу. Одним з основних методів моніторингу є використання датчиків та вимірювальних приладів, які встановлюються на ключових компонентах системи, таких як фотоелектричні модулі, інвертори та акумуляторні батареї [17].

Датчики температури, освітленості, струму та напруги дозволяють отримувати точні дані про стан системи та виявляти потенційні проблеми. Ці дані передаються до центрального пристрою збору даних, який зберігає та обробляє інформацію для подальшого аналізу. Крім того, використовуються системи дистанційного моніторингу, які дозволяють відслідковувати роботу фотоелектричної системи через інтернет-з'єднання. Це дає можливість операторам системи отримувати дані в режимі реального часу та швидко реагувати на будь-які відхилення від нормальної роботи [18].

Ще одним важливим методом моніторингу є використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу та візуалізації даних. Такі програми дозволяють обробляти великі обсяги інформації, генерувати звіти та графіки, а також виявляти тенденції та закономірності в роботі системи. Це допомагає оптимізувати продуктивність фотоелектричної системи та приймати обґрунтовані рішення щодо її обслуговування та модернізації.

Крім того, для моніторингу продуктивності фотоелектричних систем використовуються методи порівняльного аналізу. Це передбачає зіставлення фактичних показників роботи системи з очікуваними або розрахунковими значеннями. Такий аналіз дозволяє виявити відхилення від норми та ідентифікувати потенційні проблеми, такі як забруднення або затінення фотоелектричних модулів, несправності інверторів або неоптимальні налаштування системи [19].

На рис.2.3 приведена типова схема моніторингу фотоелектричної сонячної станції, на якій відображені основні її елементи.

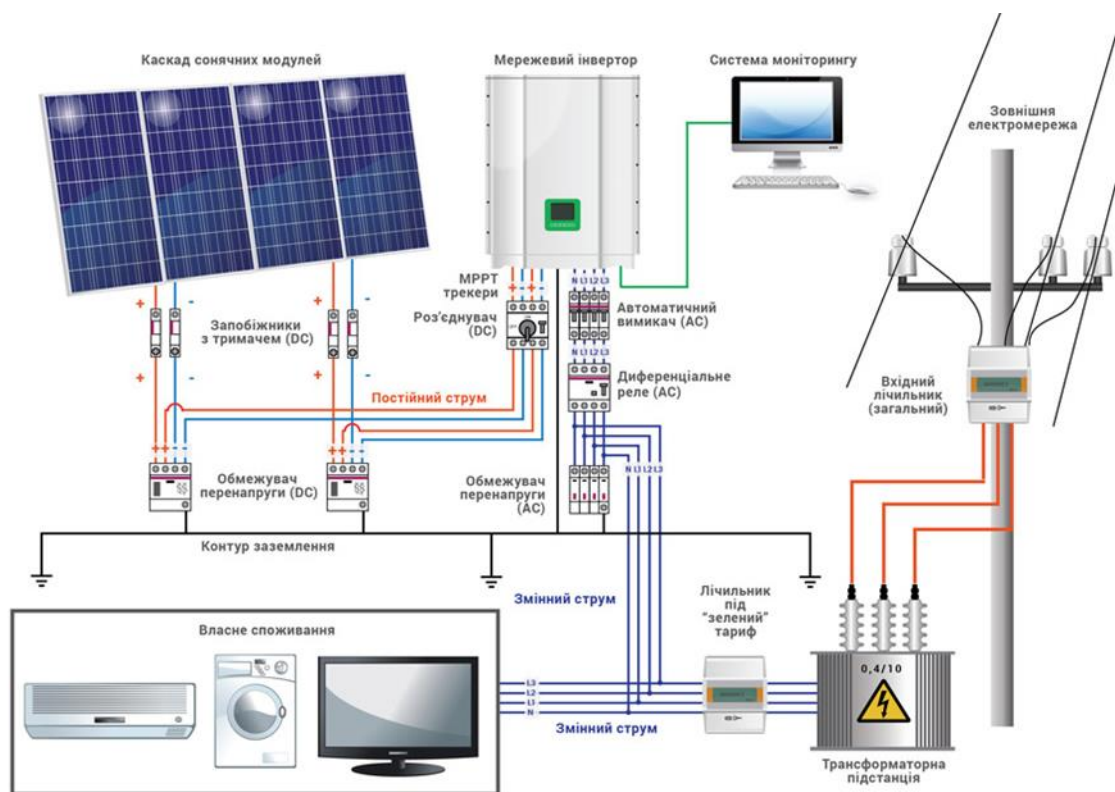


Рис. 2.3. Типова схема моніторингу продуктивності фотоелектричної сонячної станції [20]

Важливим аспектом моніторингу продуктивності є також регулярне проведення візуальних оглядів фотоелектричної системи. Це дозволяє виявити фізичні пошкодження, такі як тріщини або деформації фотоелектричних модулів, корозію контактів або пошкодження кабелів. Своєчасне виявлення та усунення таких проблем запобігає зниженню продуктивності системи та продовжує термін її служби.

Застосування різних методів та засобів моніторингу продуктивності фотоелектричних систем дозволяє отримувати повну та достовірну інформацію про роботу системи, виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях та вживати необхідних заходів для їх усунення. Це забезпечує стабільність та ефективність роботи фотоелектричної системи, а також максимізує її економічну привабливість для власників та інвесторів [20].

2.3. Аналіз даних моніторингу та виявлення проблем

Аналіз даних моніторингу є ключовим етапом у процесі забезпечення ефективної роботи фотоелектричної системи. Отримані дані від датчиків, вимірювальних приладів та систем дистанційного моніторингу потребують ретельної обробки та інтерпретації для виявлення потенційних проблем продуктивності. Одним з основних методів аналізу даних є статистичний аналіз, який дозволяє виявити закономірності та тенденції в роботі системи [21].

Статистичний аналіз передбачає розрахунок таких показників, як середні значення, дисперсія, стандартне відхилення та коефіцієнти кореляції. Ці показники дозволяють оцінити стабільність роботи системи, виявити відхилення від норми та визначити взаємозв'язки між різними параметрами. Наприклад, аналіз даних про освітленість та вироблену потужність може виявити проблеми з затіненням фотоелектричних модулів або зниження їх ефективності з часом.

Крім статистичного аналізу, використовуються методи машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення аномалій та прогнозування продуктивності фотоелектричної системи. Ці методи дозволяють автоматизувати процес аналізу даних та виявляти приховані закономірності, які можуть бути непомітні при ручному аналізі. Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть виявити незвичайні патерни в даних, які свідчать про несправності обладнання або зміни в умовах навколишнього середовища [22].

Важливим аспектом аналізу даних моніторингу є візуалізація результатів. Графіки, діаграми та інтерактивні панелі приладів дозволяють представити дані у зручному для сприйняття вигляді та полегшують виявлення проблем продуктивності. Візуалізація даних також допомагає комунікувати результати аналізу іншим зацікавленим сторонам, таким як власники системи або обслуговуючий персонал.

При виявленні проблем продуктивності фотоелектричної системи важливо не тільки ідентифікувати саму проблему, але й визначити її причини та можливі шляхи вирішення. Для цього використовуються методи кореневого аналізу, які дозволяють дослідити глибинні причини проблеми та розробити ефективні коригувальні дії.

Наприклад, якщо виявлено зниження продуктивності фотоелектричних модулів, кореневий аналіз може виявити, що причиною є забруднення поверхні модулів або деградація матеріалів з часом.

Ефективний аналіз даних моніторингу та виявлення проблем продуктивності вимагає тісної співпраці між різними учасниками проекту, включаючи операторів системи, інженерів, аналітиків даних та обслуговуючий персонал. Регулярні зустрічі та обмін інформацією допомагають забезпечити своєчасне реагування на виявлені проблеми та постійне вдосконалення процесів моніторингу та аналізу даних [23].

2.4. Розробка системи моніторингу ФЕС

Розробка ефективної системи моніторингу фотоелектричної системи є важливим завданням, яке вимагає ретельного планування та виконання. Перш за все, необхідно визначити ключові показники ефективності (KPI), які будуть відстежуватися та аналізуватися. Ці показники можуть включати загальну вироблену енергію, коефіцієнт продуктивності, коефіцієнт використання встановленої потужності, коефіцієнт доступності системи та інші.

Наступним кроком є вибір відповідних датчиків та вимірювальних приладів для збору даних про роботу фотоелектричної системи. Ці пристрої повинні бути надійними, точними та сумісними з існуючою інфраструктурою. Крім того, необхідно забезпечити належну калібрування та періодичну перевірку датчиків для підтримки точності вимірювань.

Важливим аспектом розробки системи моніторингу є вибір відповідної архітектури та протоколів передачі даних. Це може включати використання дротових або бездротових мереж, протоколів промислового Інтернету речей (IIoT), таких як MQTT або OPC UA, а також хмарних платформ для зберігання та обробки даних. Архітектура системи повинна забезпечувати масштабованість, безпеку та можливість інтеграції з іншими системами управління енергією [24].

Для ефективного аналізу та візуалізації даних моніторингу необхідно розробити відповідне програмне забезпечення. Це може включати використання спеціалізованих програмних пакетів для аналізу даних, таких як R або Python, а

також розробку користувацьких інтерфейсів та панелей приладів для відображення ключових показників ефективності. Програмне забезпечення повинно забезпечувати можливість генерування звітів, сповіщень та автоматизованих рекомендацій щодо оптимізації роботи системи.

При розробці системи моніторингу важливо враховувати питання безпеки даних та конфіденційності. Необхідно забезпечити захист даних від несанкціонованого доступу, шифрування при передачі та зберіганні, а також дотримання відповідних нормативних вимог, таких як Загальний регламент про захист даних (GDPR) або галузеві стандарти.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення інтеграції системи моніторингу з існуючими системами управління енергією та автоматизації. Це дозволяє отримувати повну картину роботи фотоелектричної системи в контексті загальної енергетичної інфраструктури та оптимізувати її роботу з урахуванням інших джерел енергії та навантажень [25].

Для успішної реалізації системи моніторингу необхідно провести ретельне тестування та валідацію. Це включає перевірку точності вимірювань, надійності передачі даних, ефективності алгоритмів аналізу та зручності користувацьких інтерфейсів. Тестування повинно проводитися як в лабораторних умовах, так і на реальних фотоелектричних системах для забезпечення надійності та ефективності роботи системи моніторингу.

Після впровадження системи моніторингу важливо забезпечити її регулярне обслуговування та оновлення. Це може включати калібрування датчиків, оновлення програмного забезпечення, резервне копіювання даних та навчання персоналу. Регулярні огляди та аудити системи моніторингу допомагають виявити потенційні проблеми та можливості для вдосконалення.

Розробка ефективної системи моніторингу продуктивності фотоелектричної системи вимагає тісної співпраці між різними зацікавленими сторонами, включаючи власників системи, інженерів, розробників програмного забезпечення та обслуговуючий персонал. Чітке визначення вимог, ретельне проектування архітектури та вибір відповідних технологій є ключовими факторами успіху проекту [26].

РОЗДІЛ 3.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Методи оптимізації продуктивності ФЕС

Оптимізація продуктивності фотоелектричних систем є ключовим завданням для забезпечення максимальної ефективності та рентабельності сонячної енергетики. Існує ряд методів, які дозволяють підвищити продуктивність фотоелектричних систем та збільшити кількість виробленої електроенергії. Одним з найбільш ефективних методів є використання систем стеження за сонцем, які дозволяють орієнтувати фотоелектричні модулі таким чином, щоб вони завжди були перпендикулярні до сонячних променів [27].

Системи стеження за сонцем можуть бути одновісними або двовісними, залежно від необхідного рівня точності та економічної доцільності. Одновісні системи дозволяють обертати фотоелектричні модулі навколо однієї осі, зазвичай зі сходу на захід, слідуючи за рухом сонця протягом дня. Двовісні системи забезпечують ще більшу точність, дозволяючи модулям обертатися як навколо вертикальної, так і навколо горизонтальної осі, що дозволяє максимально використовувати сонячну енергію протягом усього дня [28].

Ще одним важливим методом оптимізації продуктивності фотоелектричних систем є використання концентраторів сонячної енергії. Концентратори - це пристрої, які фокусують сонячне світло на фотоелектричних елементах, збільшуючи кількість енергії, що надходить на їх поверхню. Це дозволяє підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну та зменшити необхідну площу фотоелектричних модулів.

Концентратори можуть бути лінзовими або дзеркальними, і їх ефективність залежить від точності фокусування та якості оптичних матеріалів. Лінзові концентратори використовують спеціальні лінзи, такі як лінзи Френеля, для фокусування сонячного світла, тоді як дзеркальні концентратори використовують параболічні або плоскі дзеркала для відбиття та концентрації світла на фотоелектричних елементах [29].

Для підвищення максимальної потужності і захистити сонячної панелі від перегріву, в блоці сонячної станції встановлені обхідні та блокувальні діоди.

На рис.3.1. наведено блок фотоелектричної сонячної електростанції. Блок сонячної електростанції включає N_p (in parallel) паралельно з'єднаних рядів. Кожен рядок містить N_s (successively) послідовно з'єднаних сонячних фотомодулів.

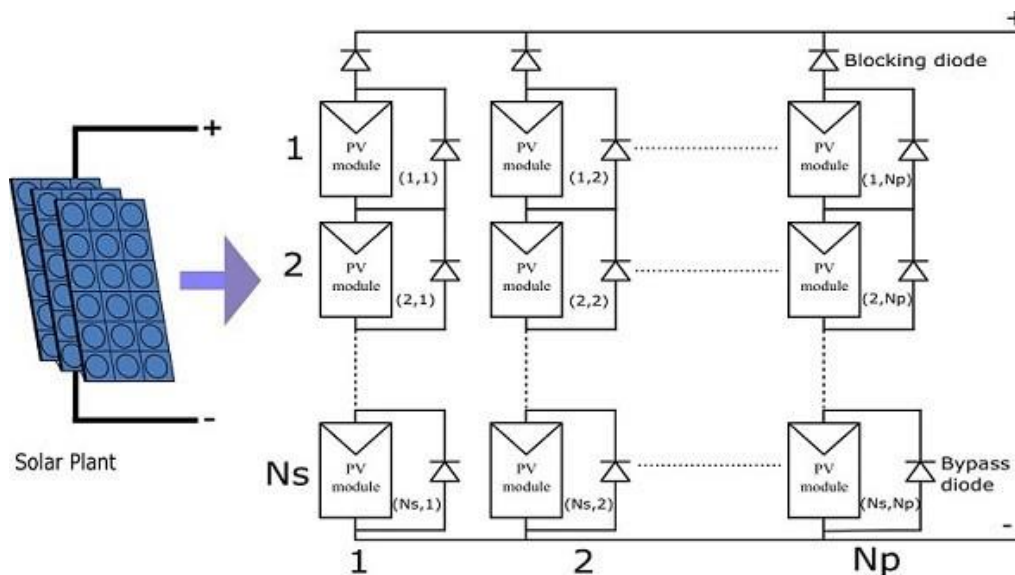


Рис.3.1. Блок фотоелектричних модулів [27]

Крім апаратних методів оптимізації, важливу роль відіграють також програмні методи, зокрема, алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Ці алгоритми дозволяють фотоелектричній системі автоматично підлаштовуватися до змін у навколишньому середовищі, таких як зміни температури або рівня освітленості, для забезпечення максимальної продуктивності.

Алгоритми MPPT працюють шляхом постійного моніторингу вихідної потужності фотоелектричної системи та регулювання електричних параметрів, таких як напруга та струм, для досягнення точки максимальної потужності. Це дозволяє системі завжди працювати в оптимальному режимі та генерувати максимальну кількість електроенергії за даних умов [30].

Ще одним програмним методом оптимізації є використання систем прогнозування та управління енергією. Ці системи дозволяють передбачати виробництво електроенергії фотоелектричною системою на основі даних про

погодні умови, історичних даних та інших факторів. Це дозволяє оператору системи планувати споживання та зберігання енергії, а також оптимізувати роботу системи в режимі реального часу.

Системи прогнозування та управління енергією можуть також включати функції автоматичного контролю та регулювання навантаження, що дозволяє збалансувати виробництво та споживання електроенергії та мінімізувати втрати. Ці системи часто інтегруються з іншими компонентами енергетичної інфраструктури, такими як акумуляторні батареї та інтелектуальні мережі [31].

Ефективна оптимізація продуктивності фотоелектричних систем вимагає комплексного підходу, який поєднує використання апаратних та програмних методів. Правильний вибір та налаштування компонентів системи, таких як фотоелектричні модулі, інвертори та системи стеження за сонцем, а також використання передових алгоритмів управління та прогнозування, дозволяють досягти максимальної ефективності та рентабельності фотоелектричної системи.

Крім того, важливу роль відіграє регулярне обслуговування та моніторинг фотоелектричної системи. Своєчасне виявлення та усунення потенційних проблем, таких як забруднення або затінення фотоелектричних модулів, несправності інверторів або неоптимальні налаштування системи, дозволяє підтримувати високу продуктивність та продовжити термін служби обладнання.

Ще одним перспективним напрямком оптимізації продуктивності фотоелектричних систем є використання технологій штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології дозволяють аналізувати великі обсяги даних про роботу системи, виявляти приховані закономірності та приймати оптимальні рішення щодо управління та обслуговування фотоелектричної системи [32].

Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для прогнозування виробництва електроенергії на основі даних про погодні умови, історичних даних та інших факторів. Це дозволяє більш точно планувати споживання та зберігання енергії, а також оптимізувати роботу системи в режимі реального часу. Крім того, штучний інтелект може використовуватися для автоматичного виявлення та діагностики несправностей, що дозволяє швидко реагувати на потенційні проблеми та мінімізувати простой системи.

Ще одним важливим аспектом оптимізації продуктивності фотоелектричних систем є врахування екологічних факторів. Фотоелектричні системи, як відновлювані джерела енергії, мають значні переваги з точки зору зменшення викидів парникових газів та зниження впливу на навколишнє середовище. Однак, для максимізації цих переваг необхідно враховувати такі фактори, як утилізація відпрацьованих фотоелектричних модулів, мінімізація використання токсичних матеріалів при виробництві обладнання [33].

Оптимізація продуктивності фотоелектричних систем є комплексним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів та використання різноманітних методів та технологій. Правильний вибір та налаштування обладнання, використання передових алгоритмів управління та прогнозування, регулярне обслуговування та моніторинг, а також врахування екологічних факторів дозволяють досягти максимальної ефективності та рентабельності фотоелектричної системи, що сприяє розвитку сталої та екологічно чистої енергетики.

3.2. Результати дослідження ФЕС засобами Matlab/Simulink

Як приклад у табл.3.1 та на рис.3.2 відповідно наведено параметри та вольт-амперні характеристики, криві потужності сонячної станції з різним опроміненням ($irradianceMat$) через сонячні фотоелектричні модулі лише з обхідними (байпасними) діодами та з усіма захисними діодами. Показано, що застосування всіх діодів практично не впливає на величини електричних параметрів ФЕС. Вважається, що температура переходу є рівномірною по всій сонячній станції. Локальні максимуми MPPT спостерігаються як для випадку застосування лише байпасних (обхідних) діодів так і з усіма захисними діодами.

Графік нижче показує, що поблизу найвищої напруги (велике резистивне навантаження) усі три фотоелектричні модулі в сонячних фотоелектричних ланцюгах подають електроенергію. У діапазоні середньої напруги фотоелектричний модуль із найнижчим освітленням, третій фотоелектричний модуль у фотоелектричній ланцюзі, був обійдений.

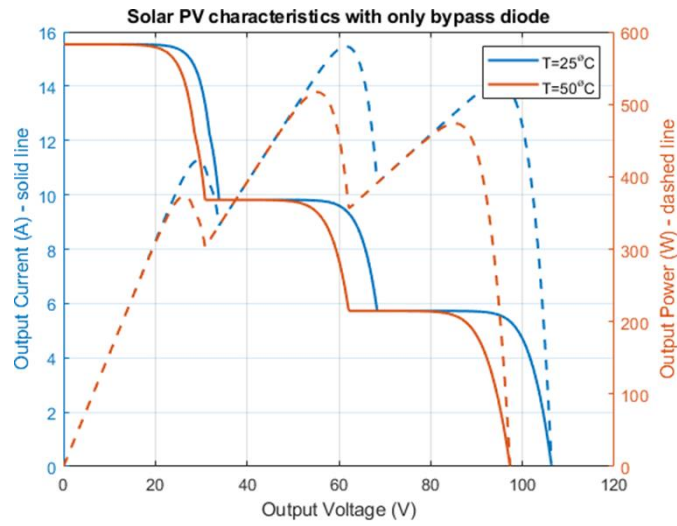
Таблиця 3.1.

Параметри сонячної електростанції в різних режимах

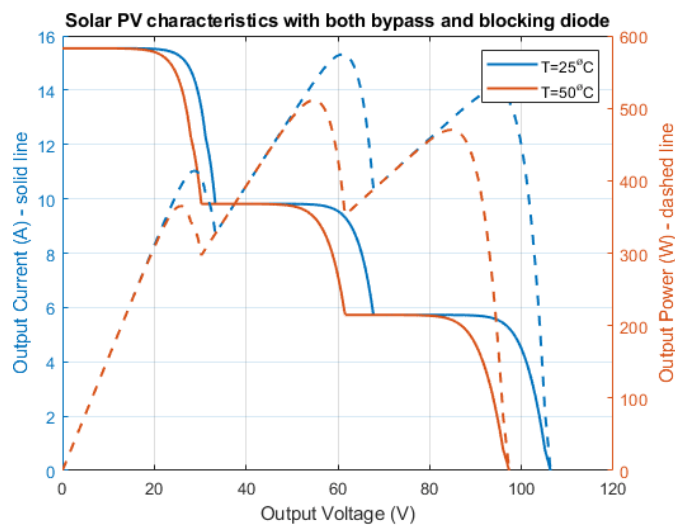
Температура, °С	Сила струму MPPT, А	Напруга MPPT, В	Максимальна потужність, Вт
із затіненням та з байпасними діодами			
25	9,4275	61,518	579,96
50	9,3418	55,307	516,66
із затіненням та з байпасними діодами та захисними діодами			
25	9,4227	60,944	574,26
50	9,3358	54,737	511,01

У нижчому діапазоні напруги (навантаження з низьким опором) лише фотоелектричні модулі з найвищим опроміненням подають електроенергію. У цьому прикладі це перший фотоелектричний модуль, який подає живлення до навантаження, решта двох фотоелектричних модулів обходять через діодом

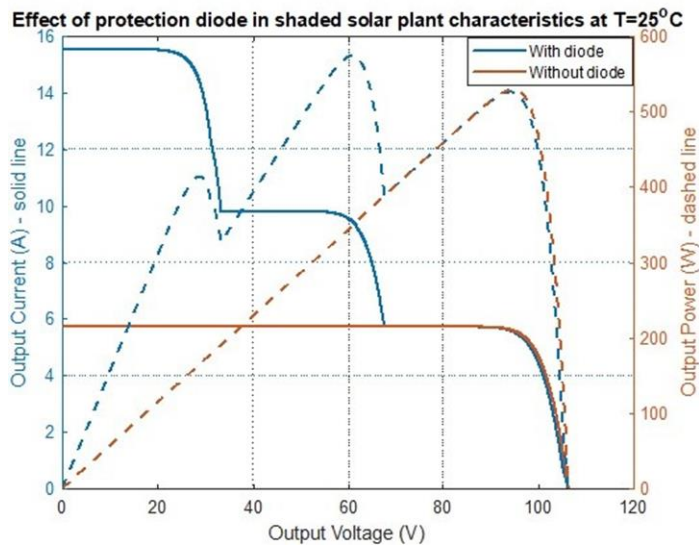
За допомогою бібліотеки «Solar module protection type» були змодельована наступні варіації застосування захисних діодів у сонячній установці: без захисного діода - сонячна станція не має обхідних та блокуючих діодів; лише байпасний діод між модулями – сонячна станція має байпасний діод на кожному фотоелектричному модулі в усіх сонячних ланцюгах, але не має блокуючих діодів між сонячними фотоелектричними ланцюгами; обхідний діод і блокуючий діод послідовного модуля - сонячна установка має обидва захисні діоди.



а



б



в

Рис. 3.2. ВАХ та криві потужності сонячної станції із затіненням та тільки байпасними діодами (а), байпасними та захисними діодами (б), із захисними діодами та без них (в)

3.3. Розробка алгоритмів оптимізації продуктивності ФЕС

Розробка ефективних алгоритмів оптимізації продуктивності фотоелектричної системи є ключовим завданням для забезпечення максимальної ефективності та рентабельності сонячної енергетики. Алгоритми оптимізації дозволяють автоматизувати процеси управління та регулювання роботи фотоелектричної системи, забезпечуючи її адаптацію до змінних умов навколишнього середовища та максимізацію виробництва електроенергії [34].

Одним з найбільш поширених алгоритмів оптимізації продуктивності фотоелектричних систем є алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Цей алгоритм дозволяє фотоелектричній системі автоматично підлаштовуватися до змін у навколишньому середовищі, таких як зміни температури або рівня освітленості, для забезпечення роботи в точці максимальної потужності.

Алгоритми MPPT можуть бути реалізовані різними методами, такими як метод збурення та спостереження (P&O), метод зростаючої провідності (INC) або метод постійної напруги (CV). Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від специфіки фотоелектричної системи та умов її експлуатації [35].

Метод збурення та спостереження (P&O) є одним з найбільш простих та широко використовуваних алгоритмів MPPT. Цей метод базується на принципі внесення невеликих збурень у напругу або струм фотоелектричної системи та спостереження за зміною вихідної потужності. Якщо потужність збільшується, алгоритм продовжує змінювати напругу або струм у тому ж напрямку, доки не буде досягнута точка максимальної потужності. Якщо потужність зменшується, алгоритм змінює напрямок збурення.

Метод зростаючої провідності (INC) базується на аналізі зміни струму та напруги фотоелектричної системи. Цей метод використовує той факт, що в точці максимальної потужності похідна потужності за напругою дорівнює нулю. Алгоритм INC порівнює миттєві значення струму та напруги з їх попередніми

значеннями та визначає напрямок зміни напруги для досягнення точки максимальної потужності [36].

Метод постійної напруги (CV) є найпростішим алгоритмом МРРТ, який підтримує постійну напругу на фотоелектричних модулях, незалежно від змін у навколишньому середовищі. Цей метод базується на припущенні, що напруга в точці максимальної потужності є відносно постійною для даного фотоелектричного модуля. Однак, цей метод має нижчу ефективність порівняно з іншими методами, особливо при змінних умовах освітленості.

Крім алгоритмів МРРТ, важливу роль у оптимізації продуктивності фотоелектричних систем відіграють алгоритми прогнозування та управління енергією. Ці алгоритми дозволяють передбачати виробництво електроенергії фотоелектричною системою на основі даних про погодні умови, історичних даних та інших факторів, а також оптимізувати споживання та зберігання енергії [37].

Алгоритми прогнозування можуть базуватися на різних методах, таких як регресійні моделі, нейронні мережі або ймовірнісні підходи. Регресійні моделі використовують історичні дані про погодні умови та виробництво електроенергії для побудови математичної моделі, яка дозволяє прогнозувати майбутнє виробництво енергії. Нейронні мережі, з іншого боку, здатні навчатися на великих обсягах даних та виявляти приховані закономірності, що дозволяє більш точно прогнозувати виробництво електроенергії.

Алгоритми управління енергією, в свою чергу, дозволяють оптимізувати споживання та зберігання електроенергії, виробленої фотоелектричною системою. Ці алгоритми можуть враховувати різні фактори, такі як прогнозоване виробництво електроенергії, поточне споживання, стан заряду акумуляторних батарей та тарифи на електроенергію [38].

Одним з підходів до управління енергією є використання методів оптимізації, таких як лінійне програмування або динамічне програмування. Ці методи дозволяють знайти оптимальний розподіл енергії між різними споживачами та системами зберігання енергії, враховуючи обмеження та цільові функції, такі як мінімізація витрат або максимізація прибутку.

Ще одним важливим аспектом розробки алгоритмів оптимізації продуктивності фотоелектричних систем є інтеграція з іншими компонентами енергетичної інфраструктури, такими як інтелектуальні мережі та системи управління енергією будівель. Це дозволяє більш ефективно використовувати вироблену електроенергію та мінімізувати втрати при передачі та розподілі енергії.

Наприклад, алгоритми управління енергією фотоелектричної системи можуть бути інтегровані з системами управління енергією будівель, що дозволяє оптимізувати споживання енергії та мінімізувати витрати на електроенергію. Це може включати автоматичне регулювання освітлення, опалення та кондиціонування повітря залежно від наявності сонячної енергії та прогнозованого виробництва електроенергії фотоелектричною системою [39].

Розробка алгоритмів оптимізації продуктивності фотоелектричних систем вимагає комплексного підходу, який враховує різні аспекти функціонування системи, такі як відстеження точки максимальної потужності, прогнозування виробництва електроенергії, управління енергією та інтеграцію з іншими компонентами енергетичної інфраструктури. Ефективні алгоритми оптимізації дозволяють максимізувати виробництво електроенергії, мінімізувати втрати та підвищити загальну ефективність та рентабельність фотоелектричної системи.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку фотоелектричних систем показав, що вони є одним з найперспективніших напрямків відновлюваної енергетики. Розвиток технологій фотоелектричних перетворювачів та вдосконалення методів оптимізації їх роботи сприяє підвищенню ефективності та рентабельності сонячної енергетики.

2. Дослідження факторів, що впливають на ефективність фотоелектричних систем, виявило ключові зовнішні та внутрішні чинники, такі як географічне розташування, кліматичні умови, конструкція та налаштування системи, що необхідно враховувати при експлуатації фотоелектричних установок.

3. Розроблена система моніторингу продуктивності фотоелектричних систем дозволяє збирати та аналізувати дані про роботу системи в режимі реального часу, виявляти потенційні проблеми та приймати оптимальні рішення щодо управління.

4. Запропоновані методи та алгоритми оптимізації продуктивності фотоелектричних систем, такі як відстеження точки максимальної потужності, прогнозування виробництва електроенергії та управління енергією, дозволяють максимізувати виробництво електроенергії та мінімізувати втрати.

5. Результати роботи мають важливе практичне значення для підвищення ефективності та рентабельності фотоелектричних систем, а також сприяють розвитку наукових основ моніторингу та оптимізації їх продуктивності.

6. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення розроблених методів та алгоритмів, інтеграцію фотоелектричних систем з іншими джерелами енергії та системами зберігання енергії, а також на розширення сфери застосування систем моніторингу та оптимізації продуктивності в сонячній енергетиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sreega R. Nithyananthan D., Nandhini B. Design and development of automated solar panel cleaner and cooler // IJEEE. 2017. V.9, № 2. P. 127-138.
2. Types of Solar Panels: веб-сайт. URL: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>
3. Шелешей Т.В. Сучасні технології фотоелектричних перетворювачів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 250 с.
4. Яцків Я.С. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні. Львів: Національна академія наук України, 2019. 320 с.
5. Климко В.І. Концентраторні фотоелектричні системи: принципи та застосування. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 280 с.
6. Денисова А.Є. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Одеса: ОНПУ, 2020. 200 с.
7. Лисенко О.В. Спектральні характеристики фотоелектричних перетворювачів. Київ: Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, 2019. 180 с.
8. Мисак Й.С. Деградація та надійність фотоелектричних модулів. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2020. 240 с.
9. Sun Energy : веб сайт. URL: https://sun-energy.com.ua/statti/kut_paneli
10. Тимченко Л.І. Перовскітні та органічні фотоелектричні перетворювачі. Київ: Інститут фізики НАН України, 2021. 200 с.
11. Федірко П.П. Оптимізація структури та матеріалів фотоелектричних елементів. Чернівці: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2019. 260 с.
12. Гелетуха Г.Г. Міжнародне співробітництво у розвитку фотоелектричної енергетики. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2020. 280 с.
13. Шаповал І.М. Інтеграція фотоелектричних систем у будівлі та транспортні засоби. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2021. 240 с.

14. Мережева сонячна електростанція "під ключ" Medium на 10 кВт : веб-сайт. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-power-plants/topova10kwt>
15. Шульга Ю.І. Системи зберігання енергії для фотоелектричних станцій. Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2019. 300 с.
16. Білорус В.С. Державна підтримка розвитку сонячної енергетики в Україні. Київ: Національний інститут стратегічних досліджень, 2021. 200 с.
17. Возняк О.Т. Освітні аспекти впровадження фотоелектричних технологій. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019. 220 с.
18. Кравченко В. І. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 180 с.
19. Марченко О. В. Методи підвищення ефективності фотоелектричних установок. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 240 с.
20. Шульц А. С. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій за допомогою систем моніторингу. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 200 с.
21. Кузнецов В. М. Інноваційні технології в сонячній енергетиці. Одеса: Екологія, 2022. 300 с.
22. Гончаренко А. В. Аналіз даних в системах моніторингу фотоелектричних установок. Суми: СумДУ, 2021. 180 с.
23. Ткаченко С. М. Застосування штучного інтелекту в управлінні фотоелектричними системами. Вінниця: ВНТУ, 2020. 220 с.
24. Мельник О. В. Діагностика та оптимізація фотоелектричних систем. Чернігів: ЧНТУ, 2019. 280 с.
25. Коваленко О. П. Моніторинг та контроль якості електроенергії в фотоелектричних установках. Херсон: ХНТУ, 2022. 320 с.
26. Савченко В. А. Інформаційно-вимірювальні системи для моніторингу фотоелектричних станцій. Запоріжжя: ЗНТУ, 2021. 200 с.
27. Analysis of Solar Photovoltaic System Shading: веб-сайт. URL: <https://de.mathworks.com/help/sps/ug/solar-shading.html>
28. Бондаренко В. І., Шульга Ю. І. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 180 с.

29. Головка В. М., Коваленко О. В. Системи стеження за сонцем для фотоелектричних установок. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 220 с.
30. Денисюк С. П., Базюк Т. М. Концентратори сонячної енергії для фотоелектричних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 120 с.
31. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. Алгоритми відстеження точки максимальної потужності в фотоелектричних системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 160 с.
32. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Інтелектуальні системи керування енергією в локальних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2021. 242 с.
33. Кравченко В. І. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 180 с.
34. Кузнєцов М. П., Лисенко О. В. Екологічні аспекти використання фотоелектричних систем. Суми: СумДУ, 2020. 240 с.
35. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація функціонування фотоелектричних станцій в електричних мережах. Вінниця: ВНТУ, 2019. 164 с.
36. Мазур Т. А., Хобін В. А. Методи й алгоритми відстеження точки максимальної потужності в фотоелектричних системах. Одеса: ОНАХТ, 2020. 200 с.
37. Мисак Й. С., Возняк О. Т., Дацько О. С., Шаповал С. П. Сонячна енергетика: теорія та практика. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 356 с.
38. Рогоза М. В., Мітін М. О. Прогнозування виробітку електроенергії фотоелектричними системами з використанням нейронних мереж. Херсон: ХНТУ, 2020. 210 с.
39. Сокол Є. І., Замаруєв В. В., Івахнов О. В., Стисло Б. О. Енергоефективні системи електроживлення з фотоелектричними станціями. Харків: ФОП Бровін О.В., 2019. 182 с.
40. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2021. 324 с.

41. Сухоруков В. В., Литвиненко Г. В., Білюк І. С. Техніко-економічне обґрунтування проектів фотоелектричних станцій. Миколаїв: НУК, 2020. 220 с.
42. Черкашина В. В., Потривай О. В. Аналіз інвестиційної привабливості проектів фотоелектричних станцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 168 с.
43. Шидловський А. К., Кириленко О. В., Денисюк С. П., Базюк Т. М., Білінов І. В. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в системи електропостачання. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2021. 280 с.
44. Шульга Ю. І., Охріменко В. М. Моніторинг та оптимізація роботи фотоелектричних станцій. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 246 с.
45. Яндутьський О. С., Хоменко О. В., Стелюк А. О. Керування режимами роботи фотоелектричних станцій в умовах балансування енергосистеми. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 180 с.
46. Яремчук І. Г., Куцан Ю. Г., Іванов О. Б., Заїка Л. А. Соціально-економічні аспекти розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2020. 146 с.

