

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Шишов Олександр Сергійович

група ТЕП – 23м

УДК 621.383.51

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ
ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

Спеціальність 144-м – Теплоенергетика

Кваліфікаційна магістерська робота

Керівник

Сергій КРАДОЖОН

старший викладач, PhD

Кривий Ріг – 2024

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електротехнічний
Кафедра теплоенергетики
Спеціальність 144 Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри теплоенергетики

Замицький О.В.

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Шишов Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Затверджена наказом по університету від « 05 » 07 ____ 2024 р. №604с

2. Термін здачі студентом закінченої роботи ____ грудень _____

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

Вступ.

Розділ 1. Аналіз використання сонячних фотоелектростанцій

Розділ 2. Порівняльні дослідження сонячних фотоелектростанцій

Розділ 3. Закономірності процесів використання сонячних фотоелектростанцій

Розділ 4. Розробка рекомендацій по впровадженню сонячних фотоелектростанцій

Висновки

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

1 Схема сонячної фотоелектростанції

2 Типи сонячних фотоелектростанцій

3 Типи систем стеження сонцем

4. Схема гібридної вітро-сонячної електростанції

5. Дата видачі завдання _____ червень _____

Керівник _____
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання атестаційної роботи магістра

№№ пп	Назва етапів атестаційної роботи	Термін виконан- ня етапів роботи	Примітка
1	Вступ	08 серпня	виконано
2	Аналіз використання сонячних фотоелектростанцій	09 серпня – 20 вересня	виконано
3	Порівняльні дослідження сонячних фотоелектростанцій	21 вересня – 20 жовтня	виконано
4	Закономірності процесів використання сонячних фотоелектростанцій	21 жовтня – 15 листопада	виконано
5	Розробка рекомендацій по впровадженню сонячних фотоелектростанцій	16 листопада – 25 листопада	виконано
6	Висновки	26 листопада	виконано
7	Список використаних джерел	30 листопада	виконано
8	Представлення роботи на антиплагіат	1-6 грудня	виконано

Студент _____
(підпис)

Керівник _____
(підпис)

Допущено до перевірки на академічну доброчесність.

Керівник _____
(підпис)

Завідувач кафедри _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Відновлювана енергетика сьогодні показує стрімке зростання розвитку у всіх країнах, оскільки питання зниження негативного впливу на довкілля, а також пошук альтернатив вуглеводневому паливі під час виробництва електричної енергії є актуальними. Енергія, що виробляється фотоелектричними модулями, не тільки не забруднює довкілля під час роботи, але й знижує проблеми глобальне потепління. Проте фотоелектричні технології загалом і сонячна енергетика, підключена до мережі, зокрема, мають деякі загальні проблеми, які необхідно вирішувати, у тому числі низьку ефективність, несприятливий вплив пилу та температури поверхні фотоелектричних модулів.

Крім того, підвищення ефективності системи фотоелектричних модулів також допомагає збільшити вироблення електроенергії, що генерується в мережу, скоротити час окупності інвестицій у проекти сонячної енергетики, дозволяє заощаджувати місце для встановлення енергосистеми та знизити вартість.

У роботі проведено аналіз використання сонячних фотоелектростанцій.

Проведено порівняльні дослідження типів сонячних фотоелектростанцій.

Визначено закономірності протікання процесів, що протікають при використанні сонячної фотоелектростанції.

Розроблено рекомендації по впровадженню сонячної фотоелектростанції.

Ключові слова: сонячна енергія, сонячна фотоелектростанція, сонячні батареї, фотоелектричний модуль, ефективність.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії

ФЕМ – фотоелектричний модуль

СФЕС – сонячна фотоелектростанція

СБ – сонячні батареї

ВЕС – вітряна електростанція

ВДЕ - відновлювальні джерела енергії

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	8
1.1. Розвиток сонячної фотоенергетики	8
1.2. Перспективи сонячних фотоелектростанцій	11
1.3. Особливості роботи сонячних фотоелектростанцій	15
1.4. Огляд факторів, що впливають на енергоефективність фотоелектричних систем	17
1.5. Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	28
2.1. Автономні сонячні фотоелектростанції	30
2.2. Мережеві сонячні фотоелектростанції	33
2.3. Гібридні сонячні фотоелектростанції	34
2.4. Сонячні електростанції із сонячним трекінгом	36
2.5. Гібридна вітряно-сонячна енергосистема	39
2.6. Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	42
3.1. Теплова модель фотоелектричного модуля	42
3.2. Розробка математичної моделі фотоелектростанції	45
3.3. Висновки до розділу 3	47
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	48
4.1. Рекомендації щодо вибору сонячної фотоелектростанції	48
4.2. Розрахунок економічної ефективності фотоелектростанції	53
4.3. Висновки до розділу 4	59

ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

ВСТУП

Актуальність теми. Відновлювана енергетика сьогодні показує стрімке зростання розвитку у всіх країнах, оскільки питання зниження негативного впливу на довкілля, а також пошук альтернатив вуглеводневому паливі під час виробництва електричної енергії є актуальними. Однак існує низка тих, що стримують розвиток факторів. До таких факторів належать ефективність, вартість, відсутність технологій, раціонального харчування електроустановок споживачів.

У багатьох країнах на державному рівні здійснюється підтримка організацій, компаній, а також приватних осіб, які використовують сонячні електростанції, вітрогенератори, мікро-гідроелектростанції та інші. Найбільшого поширення серед них сьогодні для вироблення електричної енергії отримали сонячні електростанції, здійснюють електропостачання підприємств на напрузі 13,8 кВ.

Застосування систем стеження за Сонцем є одним із способів підвищення ефективності перетворення сонячної енергії на електричну. Проте потребує комплексного аналізу характеристик регіону, розробки системи управління з урахуванням кліматичних та соціально-економічних умов, та забезпечення належної якості електроенергії у системі електропостачання підприємств.

Енергія, що виробляється фотоелектричними модулями, не тільки не забруднює довкілля під час роботи, але й знижує проблеми глобальне потепління. Проте фотоелектричні технології загалом і сонячна енергетика, підключена до мережі, зокрема, мають деякі загальні проблеми, які необхідно вирішувати, у тому числі низьку ефективність, несприятливий вплив пилу та температури поверхні фотоелектричних модулів. На ефективність фотоелектричного модуля впливають характеристики самих фотоелементів, напрямок сонячного випромінювання щодо робочої поверхні, а також температура поверхні модуля. Крім того, підвищення ефективності системи фотоелектричних модулів також допомагає збільшити вироблення електроенергії, що генерується в мережу, скоротити час окупності інвестицій у проекти сонячної енергетики, дозволяє заощаджувати місце для встановлення енергосистеми та знизити вартість. Таким чином, встановлення

закономірності теплообмінних процесів, що протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій для теплопостачання є **актуальним науковим завданням**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи пов'язана із: Законом України від 11.07.2001 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема зі статтею 3. «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2025 року»

Мета і завдання дослідження. Метою випускної роботи магістра є дослідження використання сонячних фотоелектростанцій, з метою розробки рекомендацій їх впровадження.

Для реалізації поставленої мети було сформульовано наступні задачі:

- провести аналіз використання сонячних фотоелектростанцій;
- провести порівняльні дослідження типів сонячних фотоелектростанцій;
- визначити закономірності протікання процесів, що протікають при використанні сонячної фотоелектростанції;
- розробити рекомендації по впровадженню сонячної фотоелектростанції.

Об'єкт дослідження – процеси, що протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій.

Предмет дослідження – параметри процесів, що протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій.

Методи дослідження: Узагальнення відомих наукових і технічних результатів, теоретичні та аналітичні методи використання сонячної енергії.

Наукова новизна одержаних результатів

- отримали подальший розвиток закономірності тепломасообмінних процесів, які протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю вирішуваних теоретичних завдань; використанням реальних вихідних даних, що взяті в діючих вітчизняних підприємств; обґрунтованістю прийнятих допущень, аналізом відповідно до завдань досліджень.

Наукове значення роботи. Встановлені закономірності теплообмінних процесів, які протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій.

Практичне значення отриманих результатів

- розроблено рекомендації по впровадженню сонячної фотоелектростанції.

Структура роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 28 найменувань. Загальний обсяг дипломної роботи становить 64 сторінки, 22 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Розвиток сонячної фотоенергетики

Енергетичний сектор вважається одним з основних ключових секторів національної економіки, який значною мірою визначає економічну міць та геополітичне значення країни. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), до 2025 року світовий попит на електроенергію збільшиться з 14,8 трлн кВт-год у 2003 році до 26 трлн кВт-год. Темпи зростання світового енергоспоживання співставні з темпами зростання населення та економіки. Враховуючи важливість енергопостачання та зростання енергоспоживання, це призведе до дефіциту невідновлюваних енергоресурсів та підвищення цін на них у майбутньому. Слід також враховувати, що енергетичні ресурси нерівномірно розподілені по всьому світу, тому всім країнам необхідно розглянути можливість використання всіх доступних і перспективних джерел енергії [2].

Оскільки запаси викопного палива обмежені, а вуглеводні в найближчому майбутньому більше не будуть доступні, перед країнами постає критично важливе завдання знайти шляхи запобігання енергетичній кризі, що наближається. Одним з рішень цієї глобальної проблеми, що стоїть перед людством, є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Наразі основною географічною картиною світової енергетики на найближче десятиліття залишається той факт, що глобальний енергетичний баланс між основними джерелами енергії буде паритетним, тобто вугілля, нафта і газ будуть розподілені майже порівну.

Сонячна енергія - це відновлюване джерело енергії, яке генерує енергію шляхом безпосереднього використання сонячного випромінювання. Сонячна енергетика використовує невичерпне джерело енергії і є екологічно чистою. Це означає, що, за винятком виробництва сонячних модулів, вона не виробляє жодних шкідливих відходів [3].

Той факт, що цей вид енергії є невичерпним, трансформує наше нинішнє розуміння енергозабезпечення і може стати енергетичним ресурсом, здатним

повністю задовольнити потреби людства. За оцінками експертів Німецької консультативної ради з питань глобальних змін [5] (рис. 1.1), до 2100 року сонце стане основним джерелом енергії на планеті. У багатьох країнах сонячна енергетика стрімко розвивається за активної державної підтримки.

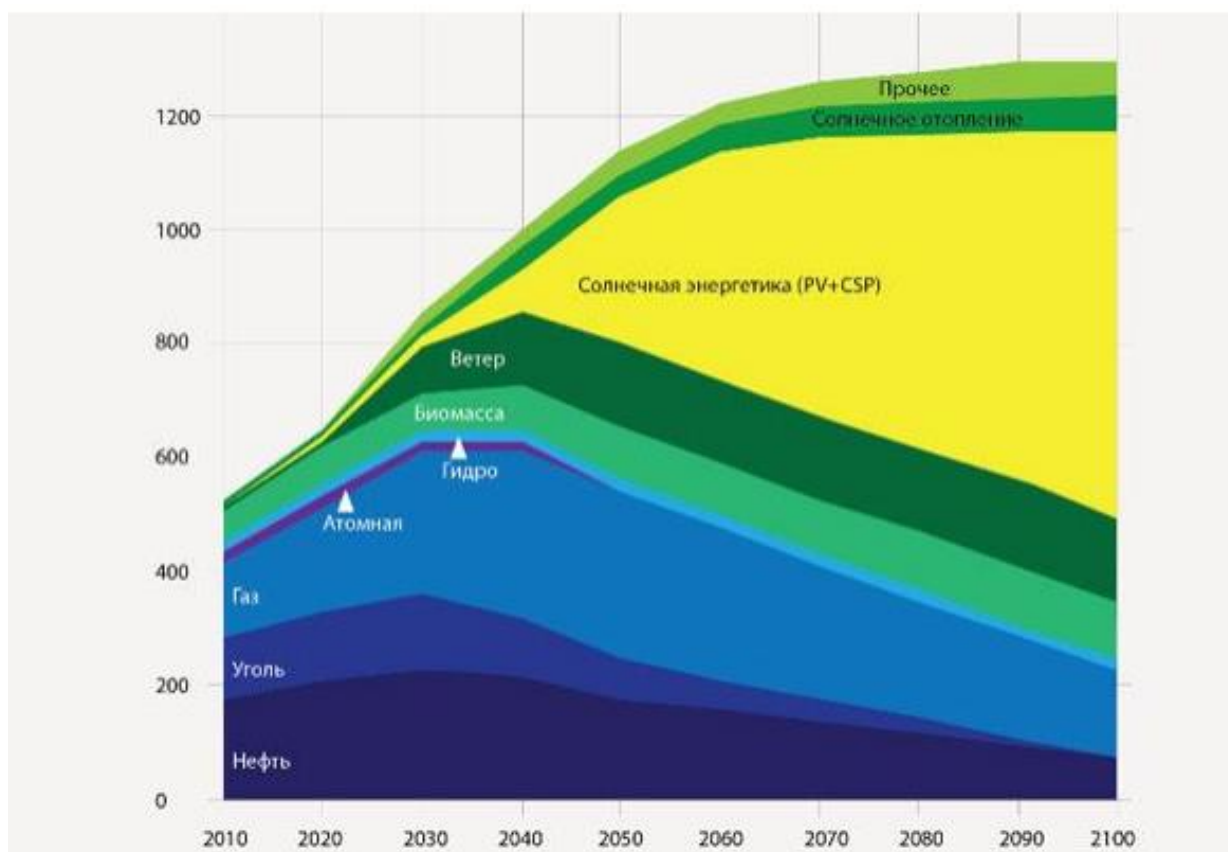


Рис. 1.1 Прогнози глобального енергетичного балансу до 2100 року Німецького консультативного комітету з питань глобальних змін

Потік сонячної радіації, що проходить через площу 1 м^2 , розташовану перпендикулярно до потоку радіації на вході в атмосферу Землі, на відстані однієї астрономічної одиниці (150 млн км) від центру Сонця, становить 1367 Вт/м^2 (сонячна стала). Внаслідок поглинання максимальний потік сонячної радіації на рівні моря (екватор) при проходженні через атмосферу Землі становить 1020 Вт/м^2 [6].

Однак слід зазначити, що через денно-нічні коливання та зміни кута нахилу Сонця над горизонтом середньодобове значення потоку сонячної радіації, що проходить через одну горизонтальну точку, є щонайменше втричі меншим.

Сонячну енергію можна використовувати за допомогою сонячних електростанцій. Існують наступні типи таких установок [9]:

- по способу перетворення сонячної енергії - в теплову або електричну;
- за способом концентрації енергії - з концентратором або без нього;
- технічно - складні та прості.

Фотоелектричні установки можна розділити на два технічно складних типи [10].

Перший тип базується на системах, що перетворюють сонячну енергію в теплову, яка потім використовується на теплових електростанціях. До таких установок відносяться баштові СЕС, сонячні ставки та СЕС з параболічними циліндричними концентраторами. До них також відносяться сонячні колектори, які використовують сонячні елементи для нагрівання води.

Іншим способом є використання фотоелектричних (ФЕУ) установок для перетворення сонячного випромінювання безпосередньо в електрику.



Рис. 1.2 Схема сонячної фотоелектростанції

Серед відновлюваних джерел енергії фотоелектрика є найпоширенішою. Її застосування обмежується відносно високою вартістю сонячних панелей, але вартість падає: з 3-4 витрат у 2008 році до 6-8 витрат у 2022 році [12]. Рік за роком технологічні вдосконалення та масштаби економії у виробництві фотоелектричних (ФЕ) елементів сприяють постійному зниженню собівартості пікової потужності сонячних фотоелектричних електростанцій (СФЕС).

1.2. Перспективи використання сонячних фотоелектростанцій

В даний час метод фотоелектричного перетворення в світі став одним із пріоритетних напрямків отримання електроенергії у порівнянні з іншими видами ВДЕ [1, 4].

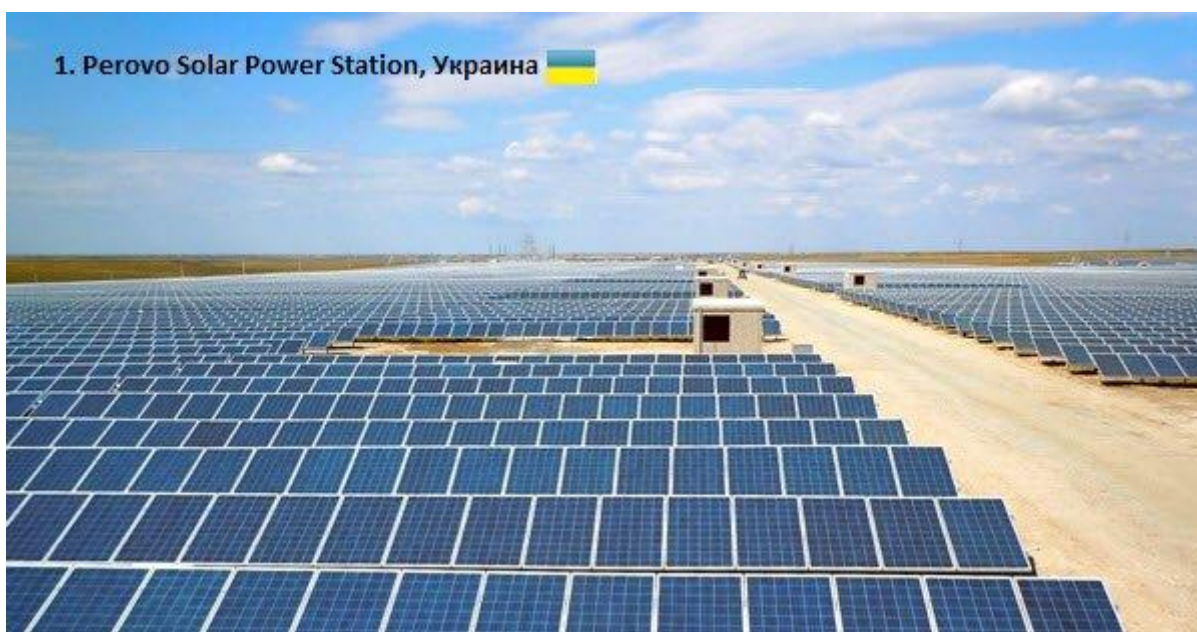


Рис.1.3 Найбільша сонячна електростанція України у с.Перово, Крим

Незважаючи на те, що в даний час вартість електроенергії, виробленої СФЕС більше вартості електроенергії, що отримується від традиційних джерел (атомних, гідро та теплоелектростанцій) перспективи їх очевидні. Цьому свідчать такі факти [5, 6].

1. Сонячні батареї під час перетворення сонячної енергії на електричне не забруднюють довкілля, не виробляють ризиковані для фауни та флори викиди та

відходи, що не виснажують природні ресурси та не несуть небезпеки для здоров'я людини. Крім того, це виробництво електроенергії не вимагає ні рідкого, ні газоподібного палива, його не треба транспортувати, ні спалювати.

2. Ресурс роботи СФЕС за основним компонентом – кремнію може бути збільшено до 50 років і більше. Для цього потрібно виключити з технології герметизації полімерних матеріалів. Єдиним обмеженням може бути необхідність їх заміни більш найефективніші елементи. Для порівняння вітроенергетична станція (ВЕС) зазвичай розрахована на 15–20 років роботи, а дизельні електростанції на 5-10 років. За прогнозами вчених ККД сонячних батарей у найближчі 10 років дорівнюватиме не менше 35%. У разі заміни сонячних елементів кремній може бути використаний повторно та кількість циклів його використання не має обмежень у часі.

3. За прогнозами вчених до 2050 року технології отримання електроенергії за допомогою СБ дозволять виробляти майже 3000 ГВт електричної енергії, але для цього потрібно понад 40 тис км² СБ. Це великі площі можуть здаватися просто неймовірними (майже вдесятеро більше острова Кіпр). Відповідно, при підвищенні ККД сонячних батарей значно зменшиться їх площа для вироблення необхідної електроенергії. Але вже в даний час порівняльний аналіз показує, якщо взяти діючі СФЕС та лінії електропередачі, то вільної землі, необхідної для виробництва кожного ГВт·год сонячної енергії потрібно все одно менше, ніж при виробництві та передачі цього ж кількості електроенергії від традиційних теплових електростанцій [1, 3].

4. Один кілограм кремнію, що використовується в сонячних батареях (СБ) виробляє протягом 30 років близько 300 МВт·ч електроенергії. Якщо підрахувати нафтовий еквівалент кремнію рівний 300 МВт · год з урахуванням теплоти згорання нафти 43,7 МДж/кг, то вийде 25 т нафти на 1 кг кремнію. Якщо прийняти ККД теплових електростанцій, що працює на мазуті 33%, то 1 кг кремнію по електроенергії, що виробляється еквівалентний приблизно 75 т нафти.

5. Повторна переробка фотоелектричних модулів, які відслужили свій термін служби, майже повністю усуває стурбованість «зелених» з приводу шкідливості цього виду виробництва електричної енергії.

З іншого боку, СФЕС мають такі переваги [7, 8].

1. Не потребує палива. Основними витратами є капіталовкладення (витрати на придбання обладнання та будівельно-монтажні роботи). При цьому, експлуатаційні витрати (підтримання обладнання у працездатному стані) значно нижчі від порівняно з традиційними та іншими видами джерел електроенергії. Через 4-6 років споживач отримує безкоштовну електроенергію. Розташування панелей на піднесенні і, як правило, основному під кутом 70° сприяє тому, що на панелях СБ не накопичується сніг узимку.

2. Тривалий термін безперервної роботи. Сонячні батареї розраховані працювати протягом щонайменше 25 років. За цей час відбувається поступове, але невелике зниження потужності. Наступні 20 років СФЕС вироблятиме приблизно 80% електроенергії від початкової розрахункової потужності. Загальний термін безперервної (безаварійної) роботи складає від 45 років. Крім того, процеси перетворення, стабілізації параметрів електроенергії та захисту в аварійних режимах повністю автоматизовано.

3. Надійність роботи. Високі показники надійності СФЕС мають рахунок того, що їх основні конструктивні елементи (СБ, інвертори, АБ, контролери) працюють у статичних режимах, тобто не містять пристроїв, що працюють в динамічних режимах.

4. Безшумність роботи. Оскільки електрична енергія виробляється шляхом прямого перетворення сонячної радіації з допомогою СБ та інверторів, виконаних на силових електронних прилади, то практично шуми в процесі роботи відсутні.

5. Загальнодоступність. Сонячна радіація доступна по всій поверхні землі, тобто практично в будь-якому регіоні є можливість отримання електроенергії, що виробляється СБ. Відмінність у здебільшого полягає в кількості годин освітленості, як правило, в середньому 2500-3000 год на рік. Особливості рельєфу, забудови, кліматичні умови, розміру ділянки, можуть не дозволити розмістити ВЕС, а для СБ

потрібна лише не затінена поверхня, звернена на південний бік. При цьому, порівняно з ВЕС, не потрібна установка щогли, оскільки панелі можна розмістити на даху.

Однак СФЕС мають і недоліки, основними з яких є.

1. Залежність роботи від часу доби та погодних умов. Однак ця проблема вирішується при використанні як накопичувач електроенергії акумуляторних батарей (АБ) Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто також рахунок застосування у складі системи електропостачання кілька типів джерел електроенергії, наприклад, крім СФЕС вітроенергетичні установки, газопоршневі станції і т. п. У цьому випадку покращуватиметься не тільки економічні показники, оскільки вартість АБ вироблення на 1 кВт·ч електроенергії більше, ніж у джерел енергії, що розглядаються, але такі системи зможуть забезпечувати безперебійне електропостачання відповідальних споживачів електроенергії (першої категорії).

2. Висока вартість СБ, пов'язана із застосуванням рідкісних елементів. Однак динаміка розвитку технологій показує, що за останні 12 років вартість фотоелементів, на базі яких створюються СБ, зменшилася в кілька разів, а вартість електроенергії, вироблюваної від традиційних джерел збільшилася більш ніж у 8 разів.

3. Необхідність періодичного очищення відбиває поверхні від пилу. Проте загалом експлуатаційні витрати на зміст СФЕС значно нижчий порівняно з традиційними та іншими видами відновлюваних джерел енергії.

4. Втрати надлишків енергії, що виробляється. Коли система електропостачання (СЕС), що генерує електроенергію від СФЕС, виробляє більше електроенергії, ніж потрібно зараз споживачам, цей надлишок міг би прямувати до зовнішньої енергетичну систему. Оскільки СФЕС в даний час застосовуються як автономні джерела живлення, то надлишки електроенергії повинні бути використані. Сонячні батареї відключаються від АБ коли вони повністю заряджені. Один із варіантів підвищення ефективності використання СФЕС надлишок енергії спрямовується на баластну навантаження (нагрівачі пристрою, освітлювальне навантаження тощо).

Незважаючи на розглянуті недоліки СФЕС, можна зробити висновок про те, що фотоперетворення є ефективним способом отримання електроенергії при розсіяному сонячному світлі, можливість створення електростанції різної потужності. Такі системи відрізняються малою витратою електроенергії на власні потреби, легко автоматизуються, безпечні в експлуатації, надійні та ремонтпридатні.

1.3. Особливості роботи сонячних фотоелектростанцій

Для забезпечення тривалого ресурсу роботи СФЕС необхідності знати особливості роботи РБ.

1. У зимовий час продуктивність СБ знижується у 1,5–2 рази. Велика кількість сонячних днів у зимовий період у районах з континентальним кліматом частково компенсує зниження продуктивність сонячних енергетичних систем. Однак потенціал вироблення енергії є мінімальним з листопада та грудень.

2. Низька ефективність СБ для використання в опалювальних системах через подвійне перетворення енергії (з початку сонячна енергія в електричну, а потім електрична теплову. Вже відомо, що для опалення та нагрівання води значно більший ефект дають сонячні колектори оскільки СБ перетворює на електричну до 20% сонячної енергії, а сонячний колектор такої самої площі перетворює на тепло близько 90 % сонячної енергії. При цьому сонячний колектор в 1,5–2 рази дешевше за СБ однієї й тієї ж площі.

3. Відносно висока вартість СБ робить їх рентабельними лише у разі, коли витрата електроенергії оптимізована. Для цього необхідно використовувати сучасну енергозберігаючу техніку, світлодіодне освітлення тощо. З іншого боку використання сучасних технологій робить життя комфортнішим.

4. Природно, що ефективність СБ буде вищою там, де більше сонячного світла. Найменша ефективність може бути в місцях з високою сезонна хмарність або тумани на узбережжі. В цьому випадку слід провести дослідження інтенсивності сонячної радіації, результатам якого буде зрозуміло скільки електроенергії зможуть виробляти СБ у досліджуваному регіоні та чи є установка СФЕС доцільною.

5. З економічної точки зору, власнику СФЕС вигідно в даний час продавати електроенергію енергосистемі в денне час, і купувати її в енергетичній компанії в нічний годинник (через занижених нічних тарифів).

6. В даний час доцільно використовувати СФЕС там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення електроенергією у темний час доби або у періоди без яскравого сонячного світла необхідна АБ або інше резервне джерело електроенергії.

Крім того, необхідно малопотужні СФЕС (до 3 кВт) використовувати для живлення базового навантаження (освітлення, телевізор, холодильник, електрочайник тощо). Більш потужні системи (від 3 до 5 кВт) можуть також живити водяний насос, електроінструмент тощо. У питанні встановлювати чи не встановлювати СФЕС вирішальними є кілька факторів. Є групи споживачів, для яких встановлення сонячних електростанцій для отримання електрики виявляється особливо вигідною.

Головні вигоди від встановлення СФЕС.

1. Якщо споживачі не підключені до загальної електромережі або підключення є дорогим через віддаленість від енергосистеми або нестачі потужності найближчих електричних мереж, то в цьому випадку встановлення автономної СФЕС є вигідним через те, що капітальні витрати на встановлення будуть рівні або нижче вартості підключення до загальної мережі, включаючи вартість ліній електропередачі та трансформаторної підстанції.

2. Якщо споживачі підключені до існуючих електромереж, але що оплачують електроенергію за високими тарифами. При ціні за кіловат-година понад 3 руб, то при встановленні СФЕС термін окупності її буде від 5 до 7 років, з урахуванням ресурсу роботи 20 років та більше. При більш високій ціні за кіловат-годину встановлення СФЕС окупиться швидше. Споживачі з існуючим підключенням до електричної мережі перевага в тому, що вони можуть використовуватися як резервний джерело електроенергії, а СФЕС як основне за наявності сонячної радіації. У цьому випадку можна виключити чи зменшити до мінімуму ємність АБ і цим зменшити терміни окупності сонячної станції.

3. Якщо споживачі електроенергії, підключені до існуючим електромережам отримують електроенергію низької якості (Періодичне відхилення та коливання напруги, частоти струму). У цьому випадку головною вигодою будуть не капіталовкладення, а якість електроенергії, зокрема стабільність її параметрів.

Таким чином, розглянуті особливості установки та роботи СФЕС розкривають їхні перспективи електропостачання споживачів віддалених від централізованих енергетичних систем.

1.4. Огляд факторів, що впливають на енергоефективність фотоелектричних систем

Сонячні фотоелектричні системи поділяються на три категорії: ПСФС без накопичувача, системи ПСФС з накопичувачем та незалежні фотоелектричні системи. Сонячна енергетична система складається з 3 основних компонентів: фотоелектричний модуль, інвертор, захисна шафа та розподільник змінного/постійного струму. Вихідна потужність фотоелектричної системи в цілому та фотоелектричного модуля зокрема та термін її служби залежить від багатьох аспектів. Деякі з цих факторів включають: тип фотоелектричного матеріалу, інтенсивність прийнятого сонячного випромінювання, хмарність та інші ефекти затінення, продуктивність інвертора, пил, орієнтація модуля, погода, географічне розташування, товщину кабелю, деградацію матеріалу, сонячне випромінювання, температуру модуля, бруд, PID-ефект [16].

Деградація фотоелектричного модуля

Виробники сонячних фотоелектричних систем зазвичай гарантують термін служби модулів 25 років. Як показано на рис.1.4, гарантійна крива зазвичай обіцяє, що модулі будуть генерувати не менше 90% номінальної потужності протягом перших 10 років і близько 80% наступні 10-15 років.

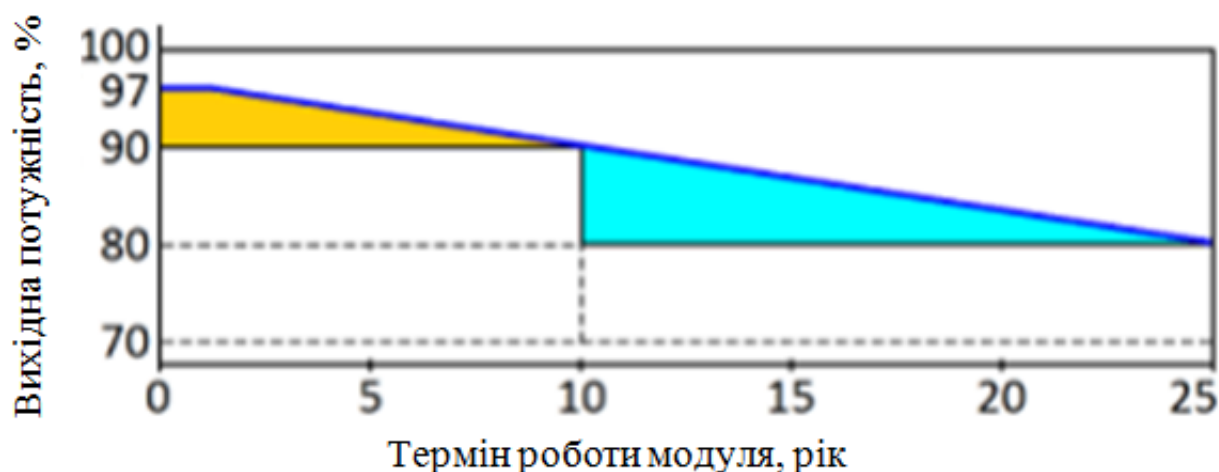


Рис.1.4 Термін служби типового сонячного фотоелектричного модуля

Фотоелектричні модулі зазвичай зношуються швидше протягом перших кілька років їх життя. Як правило, номінальна вихідна потужність фотоелектричних модулів зазвичай знижується приблизно на 0,5% на рік. Тонкоплівкові фотомодулі (a-Si, CdTe та CIGS) деградують швидше, ніж модулі з урахуванням кристалів Si [27]. Ці процеси розкладання можуть бути хімічними, електричними, термічними або механічними за своєю природою. У таблиці 1.1 показані середньорічні втрати потужності, зареєстровані у різних технологіях фотоелектричних модулів, виготовлених після 2000р.

Таблиця 1.1.

Середньорічні втрати потужності фотоелектричних елементів

Тип фотоелектричного елементу	Втрати вихідної потужності, %/рік
Монокристалічний кремній (моно-Si)	0,36
Телурид кадмію (CdTe)	0,4
Полікристалічний кремній (полі-Si)	0,64
Аморфний кремній (a-Si)	0,87
Селенід міді, індію, галію (CIGS)	0,96

Передчасне знос фотоелектричних модулів може бути викликане конструктивними, матеріальними та технічними дефектами, неякісними

матеріалами чи виробничими проблемами. У більшості випадків збої модулів та втрата продуктивності відбуваються через поступове накопичення ушкоджень, спричинених тривалим перебуванням на відкритому повітрі у несприятливих умовах.

Зміна сонячної радіації

Продуктивність фотоелектричних модулів за різних умов освітлення значно відрізнятиметься, що серйозно вплине на продуктивність фотоелектричної системи. Коливання інтенсивності сонячного випромінювання, що потрапляють на фотоелектричний модуль, впливають на багато його параметрів, включаючи I_{sc} , V_{oc} , потужність, FFi продуктивність. На рис 1.5 показані вихідний струм, напруга та потужність модуля із змінним випромінюванням.

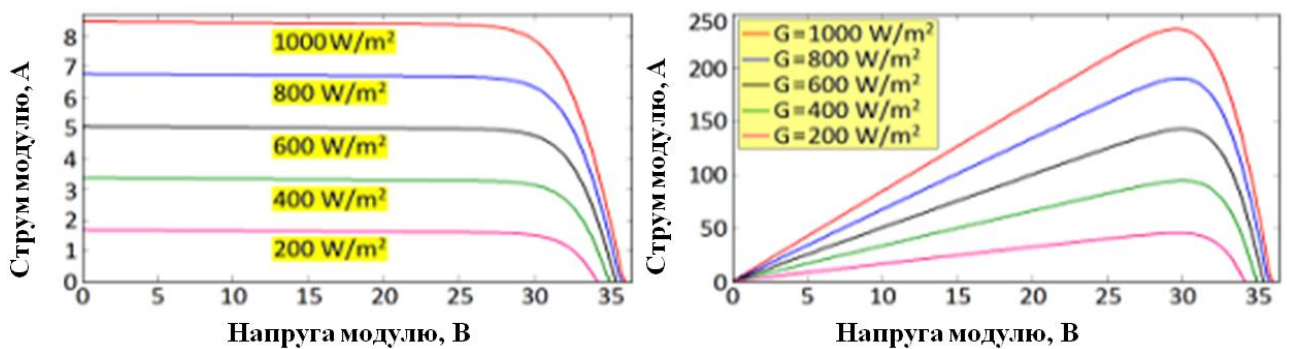


Рис. 1.5 Вплив змін випромінювання на вихідний струм та потужність фотоелектричного модуля

Температура фотоелектричного модуля

Фотоелемент, як і будь-який інший напівпровідниковий пристрій, дуже чутливий до температури. Ефективність та вихідна потужність фотоелементи зменшуються зі збільшенням його температури. Це в здебільшого пов'язано зі збільшенням швидкості внутрішньої рекомбінації носіїв заряду через збільшення концентрації носіїв. Температура фотоелектричного модуля збільшується зі збільшенням сонячної радіації та температури повітря, але знижується зі збільшенням швидкості вітру. Влітку опівдні, коли випромінювання дуже сильне, температура фотомодуля може досягати 60-65 °С.

Вплив температури на струм, напругу та електричну потужність фотоелектричний елемент показано на рис 1.6. З нормованих значень струму, напруги та потужності при 25°C при підвищенні Температура поточної потужності елемента дещо збільшується, але напруга падає з більшою швидкістю, що призводить до більшого зниження вихідної потужності. Якщо температура елемента знижується нижче 25°C, струм трохи зменшується, але напруга та ємність збільшуються.

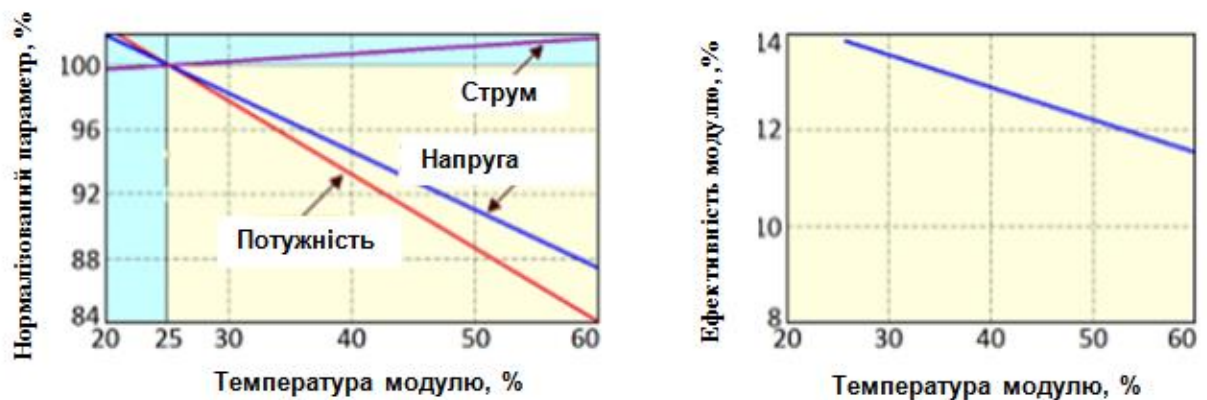


Рис. 1.6 Вплив температури на продуктивність фотоелементів

Напруга V_{oc} падає приблизно на 0,1-0,3 В на кожен градус К підвищення температури, а струм I_{sc} збільшується приблизно на 2,3-4 мА/К. Загальний ефект цього полягає у зниженні вихідної потужності зі швидкістю від 0,4 до 0,5 відсотка при підвищенні температури.

Ці ефекти показано на рис 1.7. Температурні коефіцієнти струму напруги та потужності декількох кристалічних кремнієвих фотоелектричних модулів різних типів показані в таблиці 1.2.

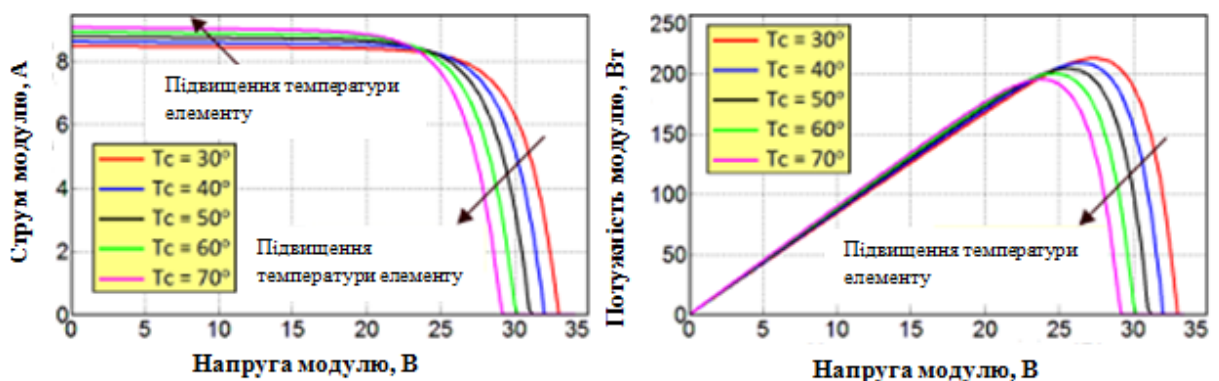


Рис. 1.7 Вплив температури осередку на I-V та P-V фотоелектричного модуля потужністю 240 Вт

Як правило, для кремнієвих елементів типові втрати продуктивності приблизно до 0,5% на кожний градус С підвищення температури.

Таблиця 1.2.

Порівняння температурних коефіцієнтів фотоелектричних модулів

Розташування		P'Blair	Dadri	F'Bad	Singrauli	PMI
Рейтинг, Вт		235	240	230	240	295
Тип модулю		Моно	Полі	Полі	Моно	Полі
Температурний коефіцієнт	Струм	2,28 mA/K	4,4 mA/K	0,05 %/K	0,04 %/oC	0,068 %/oC
	Напруга	-133,26 mV/K	-123 mV/K	-0,34 %/K	-0,35 %/oC	-0,294 %/oC
	Потужність	-0,4846 %/K	-0,47 %/K	-0,43 %/K	-0,42 %/oC	-0,384 %/oC

Ступінь температурного впливу на фотоелектричні модулі буде змінюватись в залежності від типу використовуваного напівпровідник. Щоб зменшити проблеми, пов'язані з температурою на фотоелектричних модулях можна розглянути наступні аспекти:

- Забезпечення достатньої відстані між модулями та дахом (або землею), щоб забезпечити їх охолодження конвекційним потоком повітря.
- Панелі та опорні конструкції з яскравою фарбою для меншого поглинання тепла.
- Використання перфорованої підшви для підвищеного охолодження.
- Неможливість розмістити інвертор під модулями та поруч із ними.
- Використання охолоджуючого вентилятора.

У фотоелектричній системі на даху, встановленому близько до підлоги даху, температура модуля може досягати близько 150% від температури навколишнього

середовища, у той час як при відповідній вентиляції підвищення температури буде не більше 120%.

Затінення

Затінення призводить до розбіжності струмів, що генеруються окремими осередками модуля. Навіть часткове затінення одного осередку може значно знизити вихідну потужність всього модуля, якби все осередки були затінені. Затінені осередки виробляють набагато менший струм, ніж незатінені. Так як комірки в одному модулі з'єднані послідовно, через всі осередки повинен протікати той самий струм.

Якщо струм, що перевищує заштриховану ємність, може бути пропущений через заштриховану комірку, вона перегріється і, можливо, вийде з ладу.

Поширеним рішенням, що дозволяє уникнути перегріву фотоелементів через затінення є використання обхідних діодів. Байпасний діод підключається через ланцюжок суб'єчек в модулі. При нормальній роботі, коли кожен індикатор світиться рівномірним світлом, обхідний діод діятиме як розімкнений вимикач. Проте, коли невідповідність струму виникає через затінення, діод, підключений через заштрихований підчип, діє як замикаючий перемикач і, таким чином, ігнорує цей допоміжний ланцюг.

Фотоелектричні модулі з 60 або 72 осередками зазвичай мають 3 обхідних діодів (рис 1.8а).

Іншим результатом затінення фотоелектричних осередків є спотворення кривих IV та PV, показане на рис 1.8б. Це призводить до неефективну роботу перетворювача частоти MPPT.

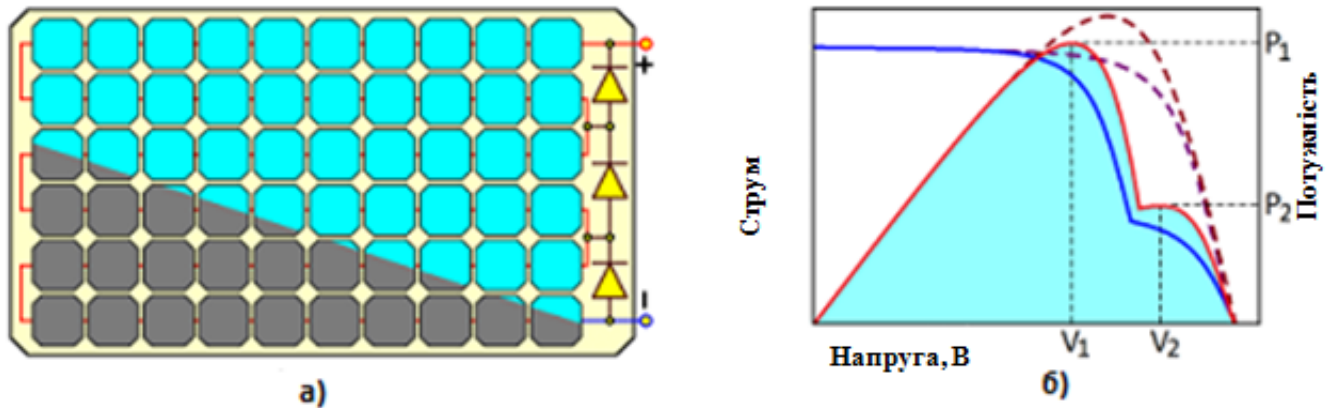


Рис. 1.8 а) розташування обхідних діодів у фотоелектричному модулі; б) Затінений рядок масиву IV і крива P-V

У ланцюговому інверторі кілька модулів послідовного з'єднання сприймаються як єдине ціле (рис 1.8а). Контролер МРРТ буде реагувати на неефективний модуль ланцюжка. Це призведе до тому, що деякі модулі працюватимуть під своїм МРР, що приведе до неефективності. Вирішення цієї проблеми полягає в тому, що алгоритм МРРТ повинен враховувати весь діапазон напруг серії, щоб виявляти наявність загального максимуму замість локального максимуму. Інвертори, здатні на це, називаються тіньовитривалими струнними інверторами.

Мікро інвертор-ще один ефективний спосіб зменшити негативне вплив часткових сонцезахисних парасольок. На цій схемі (рис 1.9 б) кожен модуль має свій перетворювач частоти, підключений паралельно до загальної шини змінного струму. Завдяки паралельному з'єднанню невідповідність струмів між різними модулями не буде проблемою. Мікроперетворювачі частоти зазвичай підключаються під кожним модулем. Вони оснащені МРРТ модульного рівня, який збільшує вихідну потужність масиву приблизно 20%. Тим не менш, мікро інвертор дорожчий за серійний інвертор.

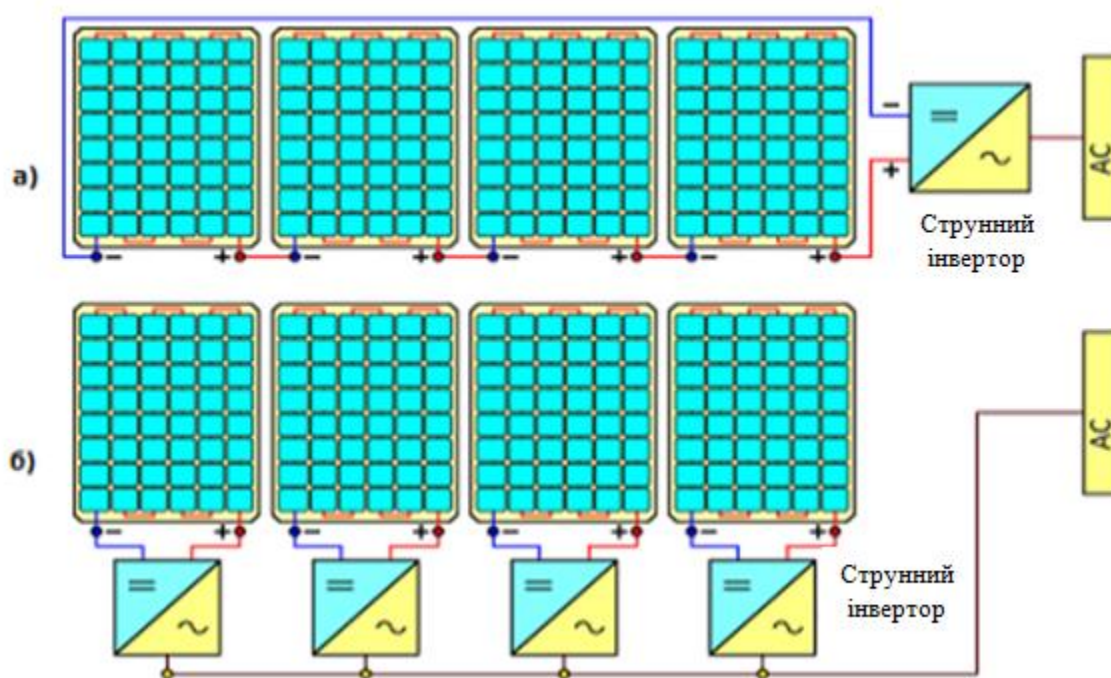


Рис. 1.9 Приклад а) ланцюговий інвертор та б) мікроінвертор

Забруднення

Бруд - це скупчення пилу, бруду та інших забруднень на фотоелектричний модуль. Це призводить до формування тонкого екрану на модуль і, таким чином, зменшує світло, що падає на одну або кілька осередків. Пил є дрібними твердими частинками діаметром менше ніж 500 мкм. Осідання пилу залежить від таких факторів, як характеристики пилу (форма, розмір, вага), погодні умови (дощ, вологість, сніг), місце розташування (прибережна або запилена зона), кут нахилу модуля, якість поверхні та швидкість вітру. Якщо через конденсату пил прилипає до поверхонь, особливо у нижній частині нахилених модулів може статися тривале забруднення.

Брудні фотоелектричні системи можуть призвести до щорічної втрати потужності на 5-17% і більше. На об'єкті Noida (широта: 28,54° пн.ш., нахил модуля: 25°) після 2-тижневого періоду дії без очищення вихід фотоелектричних модулів знизився майже на 10% у період з квітня до травня.

Вплив пилу буде вищим поблизу автомагістралей і в пустельних районах, але менше у районах із частими дощами. Пил меншого розміру, такий як вихлопні гази

двигунів, цемент і т.д. що призводить до більшої втрати продуктивності, ніж пил більшого розміру. Для одного і того ж пилу дрібні частинки надають більший вплив, ніж більші. Це пов'язано з більшою здатністю більш дрібних частинок скорочувати відстань між частинками і, таким чином, блокувати шлях світла більшою мірою, чим більші частки.

Втрати потужності через забруднення фотоелектричних модулів можна значно знизити з допомогою частого очищення. Для очищення PV є безліч методів. Включає в себе: ручне прання, робот-швабра, самоочисне скло, штори з порошковим покриттям і т.п. буд. Самий простий з них - протирати і мити звичайною водою. Частота очищення буде варіюватися в залежності від місця розташування, пори року та монтажу модуля. Бруд є основним фактором збільшення експлуатаційних витрат та витрат на технічне обслуговування фотоелектричних установок.

Орієнтація фотоелектричного модуля та кут нахилу

На позиціях у північній півкулі фотоелектричний модуль має бути орієнтований на південь. В інших напрямках деякі з них будуть затемнені тінню, і тому, як показано на рис 1.10, інтенсивність та тривалість сонячного світла значно відрізняться. Модуль, звернений на північ, завжди буде в тіні, і вплив його буде більш сильним. Це найгірший сценарій, і його слід уникати.

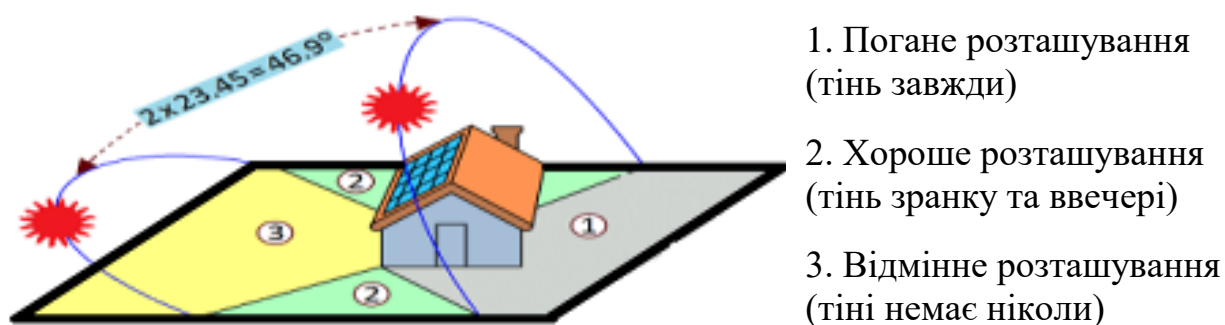


Рис. 1.10 Ефект затінення через орієнтацію фотоелектричної системи

Опівдні Сонце знаходиться у найвищій точці неба, сонячна радіація, що падає на землю, найінтенсивніша. В інших випадках випромінювання проектується під меншим кутом. Це призводить до того, що енергія розподіляється з більшої площі

поверхні, що призводить до зниження її інтенсивності (Рис 1.11). Якщо Сонце знаходиться під кутом 45° , площа поверхні покривається на 40%, а його інтенсивність зменшується на 30% порівняно з площею, що покривається під кутом 90° .

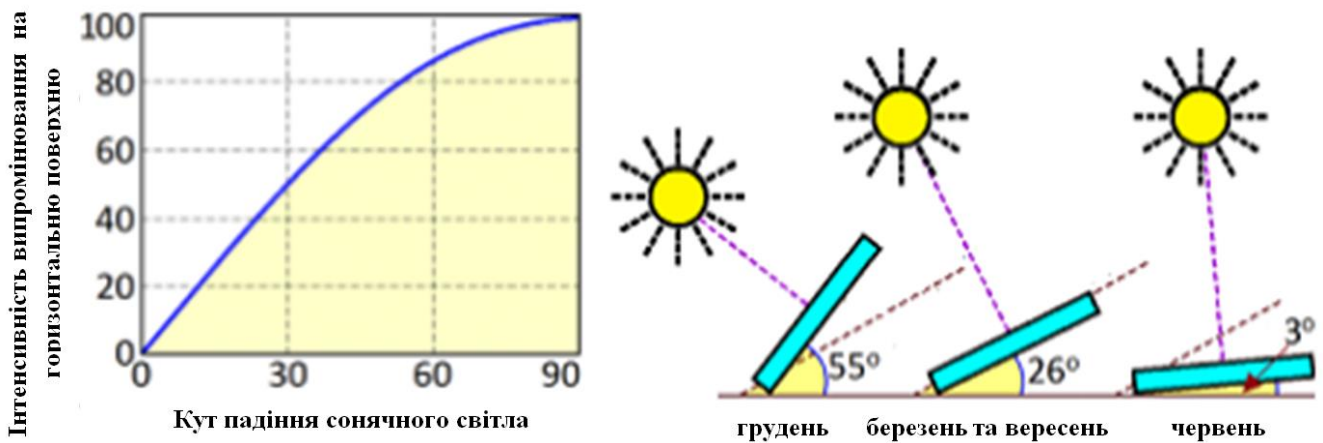


Рис. 1.11 Вплив кута падіння та Пропонований кут нахилу стаціонарної сонячної фотоелектричної системи

Для отримання максимальної сонячної енергії фотоелектричний модуль завжди повинен бути звернений до сонця, щоб падаючий світло був перпендикулярний модулю. Однак це не завжди можливе через добові та сезонних коливань положення Сонця. Використовуючи систему стеження за сонцем, продуктивність фотоелектричних систем може бути оптимізована.

Кут нахилу модуля -це кут між фотоелектричним модулем і горизонтальну поверхню. Для невеликих фотоелектричних систем модулі зазвичай фіксуються під деяким нахилом. Доступно кілька алгоритмів до розрахунку оптимального кута нахилу [30]. Як правило, кут нахилу приймається рівним $\varphi \pm 15^\circ$, де φ -кут широти, "+" для зимового та "-" для літнього періоду часу. У березні та вересні кут нахилу буде майже таким самим, як кут по широті; при цьому влітку ухил зменшуватиметься, а взимку збільшуватиметься. Модульне регулювання нахилу двічі на рік забезпечує більшу продуктивність, ніж повністю стаціонарна система.

1.5. Висновки до першого розділу

На основі проведеного аналізу наукових публікацій можна зробити висновки:

1. В даний час метод фотоелектричного перетворення є пріоритетним при отриманні сонячної електроенергії.

2. Фотоперетворення є ефективним способом отримання електроенергії при розсіяному сонячному світлі, що дає можливість створювати електростанції різної потужності. Такі системи відрізняються малою витратою електроенергії на власні потреби, легко автоматизуються, безпечні в експлуатації, надійні та ремонтпридатні.

4. Розглянуті основні фактори, що знижують продуктивність сонячних фотоустановок.

РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Існує кілька варіантів типових сонячних електростанцій. Принцип їхнього функціонування залежить від технології отримання електричної енергії із сонячного випромінювання. Найбільш поширеними є фототермічні та фотоелектричні установки. Отже необхідно розглянути всі види перетворювачів, вивчити принципи їхньої роботи, їх особливості та технічні параметри, щоб виділити максимально продуктивні установки або установки з найбільшою величиною ККД в процесі перетворення сонячного випромінювання на електрику.

Необхідно вивчити найвідоміші сучасні технології, виділити їх переваги та недоліки, для того щоб розуміти технологічні процеси, пов'язані з уловлюванням сонячних променів та перетворенням сонячного випромінювання на інші види енергії.

Сонячну енергію можна перетворювати на інші види енергії у різний спосіб. Сучасні технології включають параболічні концентратори, сонячні параболічні дзеркала та геліоенергетичні установки баштового типу [7]. Існують інші типи сонячних установок, у цьому розділі будуть згадані найчастіше використовувані.

Сонячні параболічні концентратори: В даний час сонячні системи з параболічними концентраторами (рис. 2.1) є найпоширенішим видом сонячних електростанцій. Ця технологія є найбільш економічно витратною, тому що для неї характерна низька концентрація сонячного проміння.

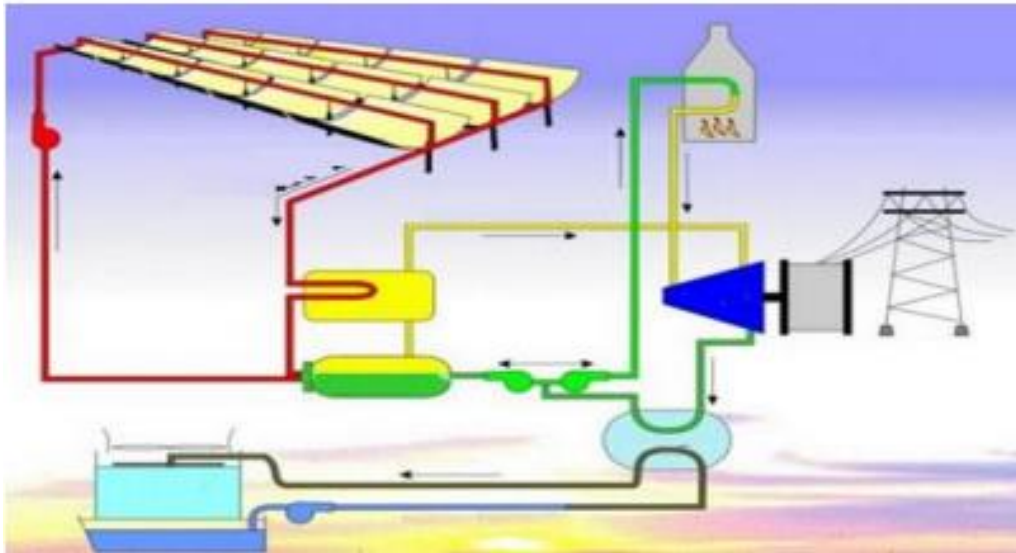


Рис. 2.1 Параболічні концентратори сонячного випромінювання

Сонячні електростанції баштового типу: такі електростанції (рис.2.2) створені для виробництва електричної енергії у великих масштабах. Відмінною особливістю даної технології є застосування геліостатів.

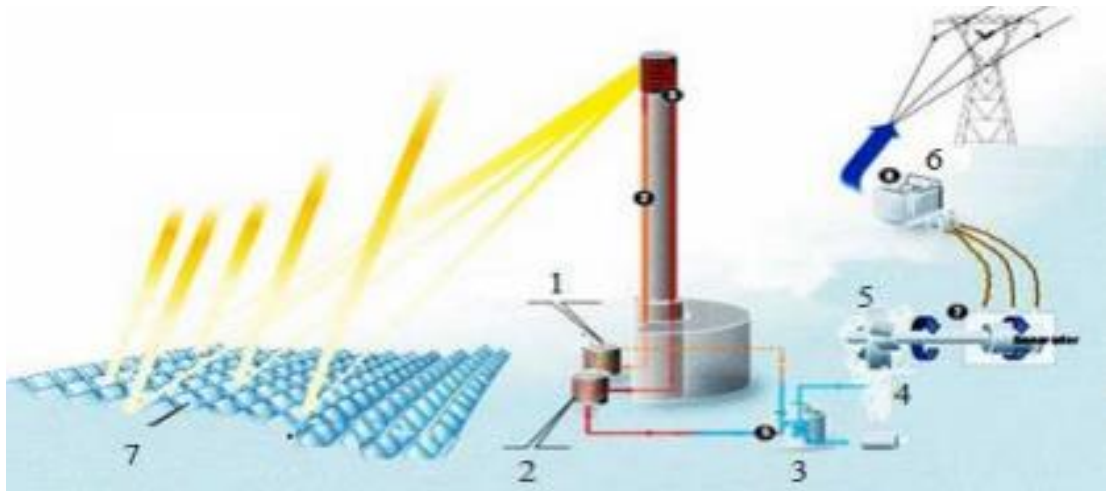


Рис.2.2 Сонячна електростанція баштового типу:

1- холодні солі, 2 - гарячі солі, 3 - теплообмінник, 4 - водяна пара,
5 - турбіна, 6 - трансформатор

Сонячні фотоелектростанції (ФЕС): Основним компонентом ФЕС є ФЕМ, що відповідає за пряме перетворення сонячної енергії в електричну. Залежно від потужності ФЕС та способу підключення до мережі можуть включати до свого

компонентного складу – акумуляторні батареї, перетворювачі, контролери та інші компоненти.

Такі установки призначені для отримання електроенергії із сонячних променів з її подальшим резервуванням або подачею до мережі. На рис.2.3 представлено найбільш поширену структурну схему ФЕС – автономне енергозабезпечення об'єкта. Інші варіанти схем припускають комутацію ФЕС з мережею та/або паралельну роботу ФЕС з іншим джерелом електроживлення.

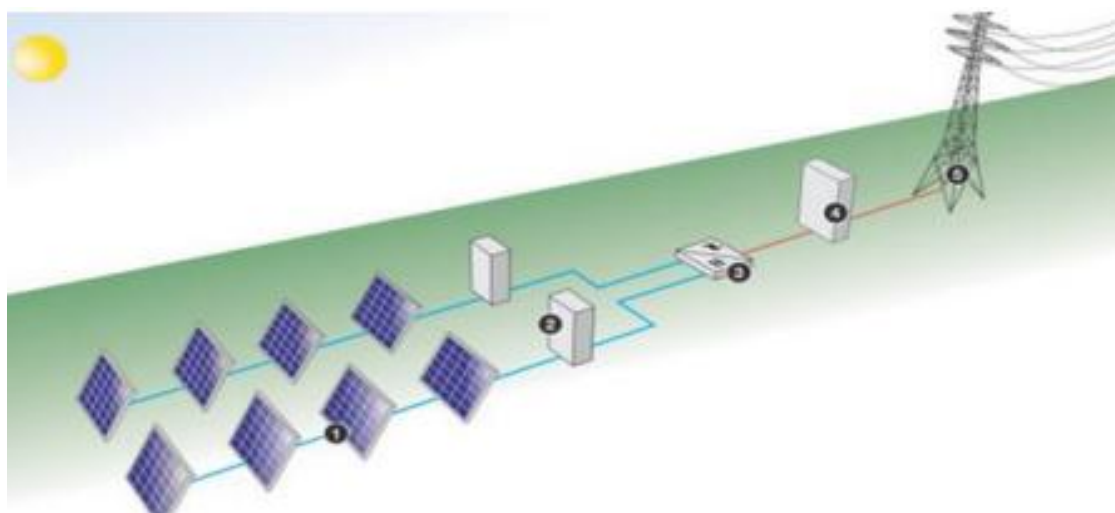


Рис.2.3 Сонячна фотоелектростанція (СФЕС): 1 – фотоелектричний генератор, 2- електричний щит СД, 3- інвертор, 4- електричний щит СА, 5 - електрична мережа автономного об'єкта

Перевагою СФЕС є мінімальне обслуговування та рідкісний ремонт. Сучасні сонячні панелі здатні виробляти електроенергію навіть в умовах короткого світлового дня та малої сонячної активності.

2.1. Автономні сонячні фотоелектростанції

Автономні сонячні електростанції, використовуються в здебільшого в районах, де джерела загального енергопостачання недоступні або надто дорогі. СФЕС використовує ефект перетворення сонячного випромінювання в енергію за допомогою фотоелементів. Така установка містить такі основні функціональні елементи: акумуляторні батареї (АБ), зарядне пристроїв (ЗП), автономний інвертор (АІ), що перетворює напругу постійного струму на змінний струм (рис.2.4) [8, 9].

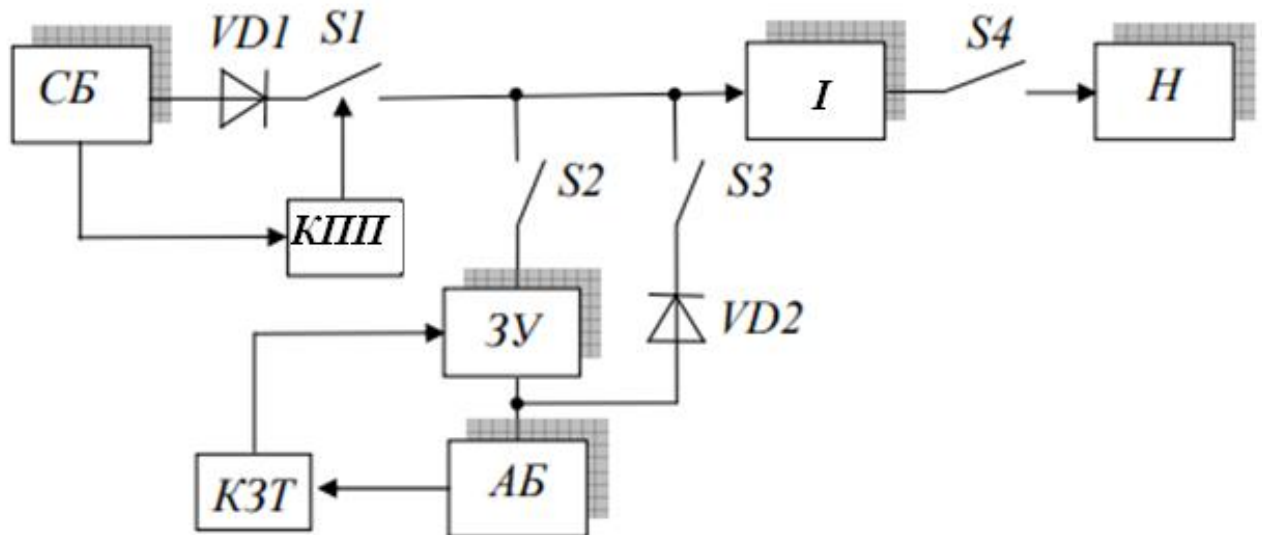


Рис.2.4 Структурна схема СФЕС із підключеним навантаженням Н

СБ перетворюють енергію випромінювання сонця на електричну енергію. КПМ контролює режим генерування максимуму потужності для клімату, а контролер КЗТ здійснює функції керування зарядом АБ. Система управління та захисту (СУЗ) (на рис.2.4. не показана), здійснює керування ключами S1 - S4. У звичайному режимі роботи за наявності сонячних днів АІ перетворює напругу постійного струму в напругу змінного струму, яке трансформатор здійснює узгодження напруги сонячних батарей СБ з напругою навантаження Н. Акумуляторні батареї є резервним джерелом живлення та в нормальному режимі роботи відбувається їх заряд за допомогою зарядного пристрою ЗП.

За відсутності сонячної радіації діод VD1 не дозволяє акумуляторним батареям АБ розряджати на сонячні батареї. Діод VD2 виконує функцію захисту АБ. Система управління та захисту крім виконання функцій комутації силовими ключами S1 – S4 у нормальних та аварійних режимах роботи здійснює стабілізацію напруги на виході автономного інвертора АІ.

Акумуляторні батареї розширюють сферу застосування автономних СФЕС, але водночас вимагають додаткового технічного обладнання та обслуговування. Для заряджання АБ потрібні зарядні пристрої та контролери заряду з функцією відстеження точки максимальної потужності. Такий контролер за наявності достатньої освітленості не перешкоджає надходженню енергії від СБ на АБ, а при

нестачі освітленості накопичує енергію з оптимальними значеннями струму та напруги та подає її порціями на АБ. Крім того, контролер заряду запобігає перезаряду АБ, своєчасно відключаючи СБ від АБ, регулює ступінь зарядки АБ і цим продовжує ресурс їх роботи (термін служби).

Протягом дня СБ заряджають акумулятори та забезпечують живленням споживачів. У нічний час накопичена в АБ енергія споживається навантаженням. Здатність виробляти, накопичувати та зберігати електроенергію робить такі сонячні електростанції надійним джерелом енергії у будь-який час, незалежно від погодних умов та часу доби.

Автономні інвертори істотно впливають на показники надійності СФЕС. Тут перспективним є напрям застосування в їх конструкції трансформаторів з магнітним полем, що обертається, що дозволить зменшити загальне кількість силових електронних приладів та спростити систему управління та захисту перетворювачів [10, 11]. Поліпшити експлуатаційно-технічні характеристики АІ можна також за рахунок застосування проміжного високочастотного перетворення та модульного принципу побудови основних функціональних елементів (вузлів, блоків) [12, 13].

Недоліком СФЕС є втрата енергії, що залишається у режимі малих навантажень. У більшості випадків у таких станціях при малих навантаженнях РБ відключаються, коли АБ повністю заряджені. Основним недоліком автономних СФЕС є використання циклічних АБ. При цьому термін роботи кислотно-свинцевих АБ перебувають у межах 4–5,5 років.

Застосування АБ з великим терміном служби, значно підвищує капіталовкладення у СФЕС.

Ще одним недоліком АБ є те, що в них мають місце втрати енергії. Ефективність процесу заряду-розряду АБ не перевищує 90%, та вона погіршується в міру їхнього старіння.

2.2. Мережеві сонячні фотоелектростанції

Перевага над автономними СФЕС є акумулятор. Схема структурової мережевої СФЕС наведена рис.2.5. До складу схеми входять: мережевий інвертор (МІ) –

інвертор, ведений мережею (джерелом опорного сигналу для їх запуску та синхронізації є зовнішня електромережа); для контролю максимального відбору потужності від СБ (СМ), що відстежує параметри СФЕС; яка через трансформатор (Т) підключена до електростанції. На рис.2.5 показано також навантаження змінного промислового струму частоти (Н).

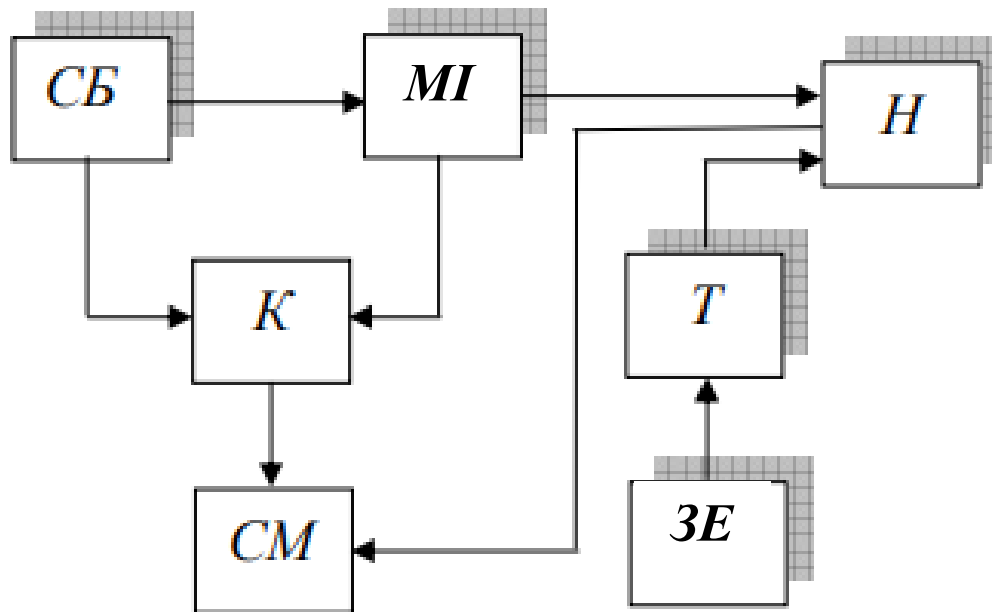


Рис.2.5 Структурна схема мережевої СФЕС

Безаккумуляторні мережеві СФЕС практично не вимагають обслуговування. При цьому максимальна ефективність використання енергії від СБ перебуває у межах 90–98%.

Недоліком мережевих СФЕС є припинення живлення споживачів при відключенні зовнішньої електромережі. Для безперебійного електропостачання споживачів у таких системах застосовуються АБ, що значно ускладнює конструкцію мережевого інвертора в мережевих СФЕС. Інвертори в яких застосовуються АБ, визначаються сумарною потужністю навантаження, яке потрібно на час аварій зовнішньої електромережі, а ємність АБ та потужність СБ визначаються тривалістю аварійних режимів.

2.3. Гібридні сонячні фотоелектростанції

Підвищена надійність, включаючи джерела безперебійного живлення, може бути забезпечена комбінованою системою електропостачання з вітряними електростанціями (ВЕС), газопоршневими або дизельними електростанціями і т.д., встановленими на додаток до СФЕС, такі станції можуть забезпечуватися живленням від зовнішньої електричної мережі.

На рис.2.6 наведено один із варіантів комбінованої системи електропостачання. Шина Ш1 є джерелом напруги постійного струму, а шина Ш2 – змінного струму промислової частоти.

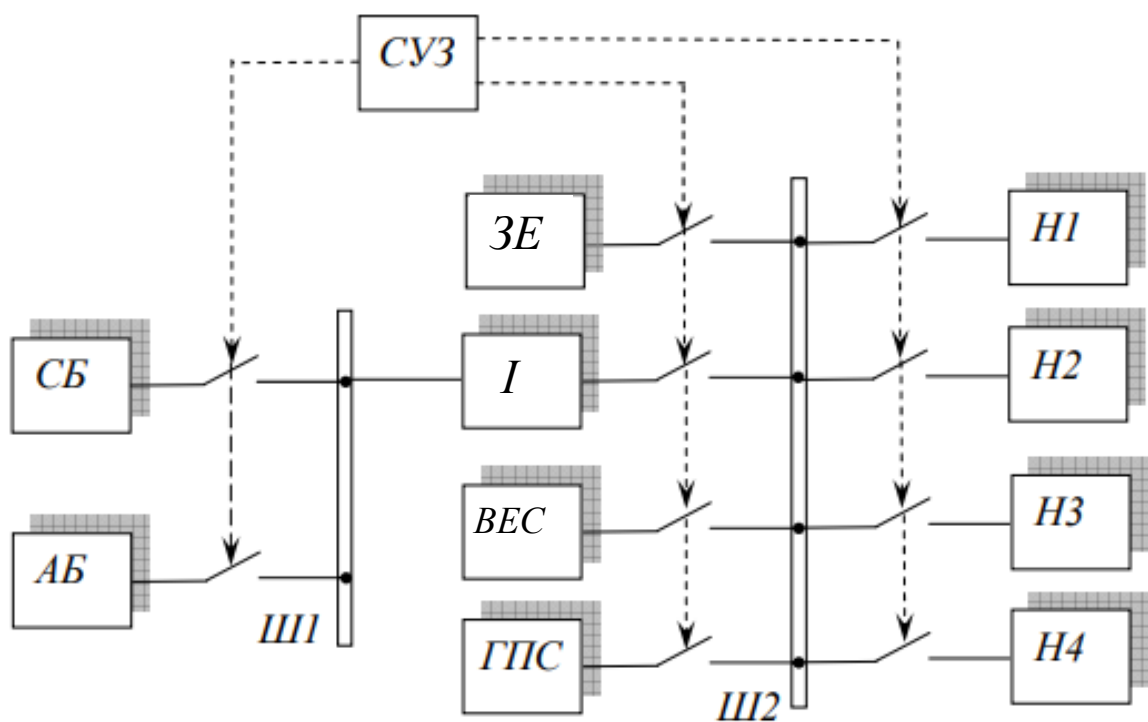


Рис.2.6 Структурна схема гібридної фотоелектростанції

Як джерела постійного струму застосовуються СБ і АБ, а змінного струму – вітроелектрична станція (ВЕС), газопоршнева електростанція (ГПС) та зовнішня електромережа (ЗЕ). Система управління та захисту (СУЗ), здійснює контроль за параметрами електричної системи, виконує функції захисту, відключаючи та підключаючи джерела до навантаження (Н1 – Н2) відповідно до встановленої ієрархії.

У цій схемі АБ мають невелику ємність і застосовуються для електропостачання навантаження лише у випадках переходу живлення від одного джерела до іншого, тобто забезпечують гарантоване (безперебійне) електропостачання споживачів.

Ступінь участі джерел електроенергії в комбінованих схемах систем електропостачання споживачів залежить від багатьох факторів, серед яких основними є: енергетичний потенціал відновлюваних джерел енергії, а також його зміна у часі; рельєф та кліматичні умови місцевості; енергетична потреба та потужність споживачів, а також річний графік електричного навантаження; вимоги до надійності (безперебійності) електропостачання; СБ вимоги до показників якості електроенергії; економічні показники системи електропостачання.

Експлуатаційно-технічні характеристики комбінованих систем електропостачання багато в чому залежить від точної оцінки енергетичної потреби в електроенергії та режимів роботи споживачів (графіка електричного навантаження), від вимог до якості електроенергії.

Найбільшого поширення набули три групи споживачів децентралізованого електропостачання:

- індивідуальні споживачі потужністю від одиниць до десятків кіловат (фермерські господарства, котеджі, заміські будинки, метеостанції тощо. п.);

- групові непромислові споживачі встановленої потужністю від десятків до сотень кіловат (мікрорайони, торгові підприємства, заклади охорони здоров'я, села, села, селища тощо. п.);

- промислові підприємства із встановленою потужністю від сотень до тисяч кіловат.

Характерною рисою споживачів децентралізованого електропостачання є різкий змінний графік електричних навантажень протягом доби, сезону та року.

2.4. Сонячні електростанції із сонячним трекінгом

Плоскі фотоелектричні модулі (ФЕМ), які застосовуються на поверхні Землі перетворюють пряме і розсіяне сонячне випромінювання у видимій частині спектра.

ФЕМ генерують електроенергію незалежно від орієнтації їх поверхні на Сонці, однак, з різною ефективністю, тому для максимізації електричної енергії, одержуваної від прямої складової сонячного випромінювання, застосовуються системи стеження за Сонцем [13].

Сонячні трекери почали застосовувати, коли фотоелектричні системи почали використовуватися для генерації великої кількості електроенергії.

Насамперед, вони використовуються за умови великої площі поверхні ФЕМ (полів), тому що таким чином збільшується виробництво електроенергії фотоелектричними панелями на рахунок того, що панелі завжди розташовуються максимально перпендикулярно до сонячних променів.

В даний час існують різні технології, що застосовуються для розробки систем стеження за Сонцем, які гарантують підвищення ефективності уловлювання сонячних променів. Це призводить до збільшення вироблення електричної енергії всім комплексом. Далі буде розглянуто два типи систем стеження за Сонцем: – одне – та двоосьові трекери.

На рис.2.7 показано різні моделі, розроблені різними виробниками.

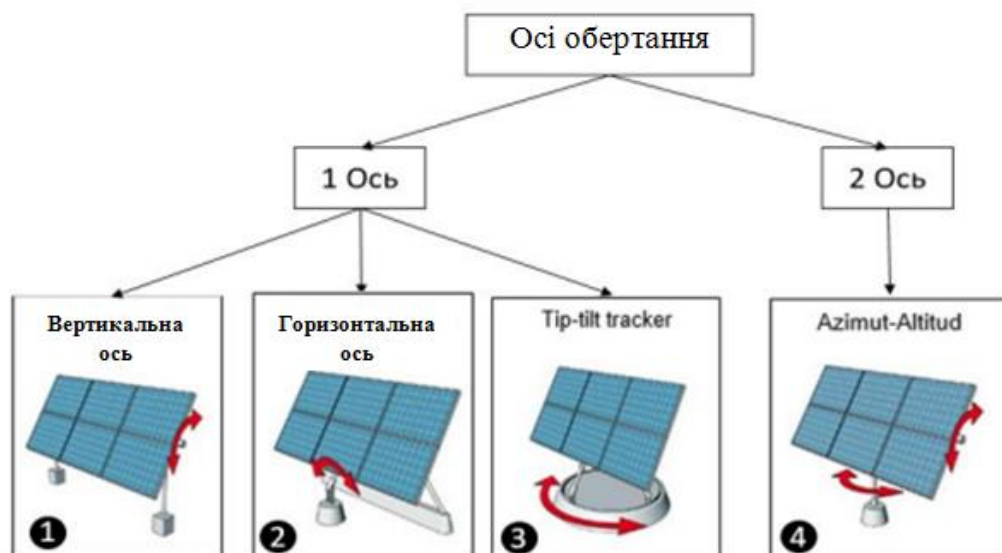


Рис.2.7 Типи систем стеження за сонцем

Країни, переважно з Північної Америки та Європи, сприяли дослідженням та розробці фотоелектричних генераторів, а також сонячних трекерів. У рамках

проведених досліджень системи стеження були оцінені з точки зору їх співвідношення витрат і вигод у процесі фотоелектричної генерації, і повідомляється про збільшення генерації до 35% щодо використання фіксованих панелей через те, що у цих послідовників дві осі, фотоелектричні модулі завжди перпендикулярні Сонцю.

В даний час на міжнародному ринку існують різні виробники та моделі сонячних трекерів. У таблиці 2.1 наведено деякі приклади поточних витрат на ці системи в залежності від їхньої моделі [20]. Дані, подані в таблиці 2.1, відповідають даним на червень місяць 2020 року.

Таблиця 2.1.

Витрати на міжнародному ринку сонячних трекерів за моделями

типи	ціна	*ефективність
1	\$0.08ВА-0.14ВА	10-25%
2	\$0.08ВА-0.14ВА	10-25%
3	--	10-20%
4	\$0.19ВА-0.25ВА \$0.4ВА-0.5ВА**	30-45%

* Ефективність сонячних систем стеження проти немобільними системами.

** Двохосні сонячні системи стеження з GPS.

Основними виробниками сонячних трекерів є такі компанії як: NEXTracker, ArrayTechnologies, PV Hardware, ArctechSolar, Soltec, NClave, ConvertItalia, STiNorland, GameChangeSolar, SunPower. Компанія NEXTracker лідирує у рейтингу виробників фотоелектричних трекерів на світовому ринку. Постачання даної компанії на сьогоднішній день становлять 29% від загального обсягу поставок сонячних трекерів. Другим великим виробником останніх два роки є компанія ArrayTechnologies, далі йдуть іспанські PV Hardware (PVH), ArctechSolar і Soltec займає п'яте місце в даному рейтингу.

Вивчення різних технологій сонячних електростанцій, що існують в даний час, дає достатню інформацію, необхідну для розуміння різних конструкцій та

компонентів, що становлять ці системи. Необхідно знати параметри кожного з електричних та механічних елементів, оскільки дана інформація впливає на прийняття технічних рішень, які дозволяють інженерам та технікам ремонтувати їх у разі збоїв, а також підвищувати їхню ефективність, забезпечувати технічне обслуговування та продовжувати термін служби комплексів.

2.5. Гібридна вітряно-сонячна енергосистема

Гібридна енергосистема може бути описана як система виробництва електроенергії, живлення якої складається з комбінації двох або більше типів джерел вироблення електроенергії, таких як сонячні фотоелектричні панелі, генератори вітряних турбін, гідроелектростанції та/або паливні генератори. Корисними компонентами гібридних систем, що розглядаються у цьому дослідженні, є сонячні фотоелектричні панелі та генератори вітряних турбін. Енергія від фотоелектричної та вітрової енергії в значною мірою залежить від наявності сонячної радіації та швидкості вітру відповідно [28].

Замість того, щоб використовувати тільки енергію вітру або сонячну енергію, поєднання вітру та сонця забезпечує кращу та надійну систему. Обидва джерела разом можуть забезпечувати живлення, і якщо відбувається якесь зниження потужності, то інше джерело може компенсувати перше. Крім того, обидві системи разом можуть забезпечувати вищі навантаження, якщо це необхідно. Щоразу, коли генерована потужність стає надмірною, її також можна зберігати в акумуляторі. Для надійного енергопостачання віддалених місць чи важкодоступних сільських районів необхідно спроектувати та налаштувати гібридну систему, яка б об'єднала переваги двох різних енергетичних технологій. Це можуть бути дві відновлювані технології, або відновлювана і традиційна енергія або технологія викопного палива. Гібридна система забезпечить підтримку оптимального рівня енергопостачання у похмурі дні для фотоелектричних систем та при слабкому вітрі для вітрових електрогенераторів. На думку багатьох експертів із відновлюваних джерел енергії, невелика гібридно-електрична система, що поєднує вітрову енергетику та сонячну фотоелектричну технологію, пропонує кілька переваг у порівнянні з будь-якою окремою системою.

Основною проблемою, з якою стикаються під час виробництва електроенергії з використанням гібридної системи, є зміна навантаження та відновлюваних ресурсів (сонячної радіації та швидкості вітру).



Рис.2.8 Схема гібридної вітро-сонячної електростанції

Тому основним завданням при проектуванні електроенергетичної системи, що використовує відновлювані джерела енергії, є точний вибір комбінації компонентів системи, які можуть задовольнити економічно потребу в навантаженні [29].

На основі вартості компонентів палива, робочої сили, транспортування та технічного обслуговування бажано оцінити найбільш рентабельний розмір всіх компонентів для відповідності прогнозованим піковим навантаженням. У цьому завданні оптимізації розмір гібридної системи виконується з метою мінімізації чистих поточних витрат за одночасного надійного та економічного задоволення заданого попиту. Один із способів зробити це – використовувати моделі комп'ютерного моделювання для гібридних енергетичних систем [30].

Гібридна вітро-сонячна енергетична система збирає енергію, виробляється сонячними панелями та вітряними турбінами. Він також має акумулятор для

зберігання додаткової енергії. Термін служби та ємність батареї, яка використовується в системі, відіграють важливу роль у визначенні ефективності гібридних фотоелектричних та вітряних батарей.

Нерівномірне заряджання та розряджання акумулятора скорочують термін служби акумулятора та його ємність. Крім того, низьке споживання енергії та система управління стали необхідною вимогою для гібридних вітро-сонячних систем. Екологічні та кліматичні фактори, такі як швидкість вітру, температура і сонячна радіація постійно змінюються в різних районах. Так, для різних регіонів, автономні фотоелектричні модулі або вітроенергетичні системи тривалий час протягом року не виробляють корисної енергії, тому дуже важливо вирішити, скільки сонячних батарей, вітряних турбін та батарей використати. Оптимальний розмір може допомогти забезпечити найменші інвестиції та підтримувати найменші витрати за рахунок розумного та адекватного використання гібридної вітро-сонячної системи.

Найбільш ефективною технологією енергопостачання житлового сектору та віддаленої сільської місцевості можна вважати технологію поновлюваної енергетики.

2.6. Висновки до другого розділу

1. Розглянуті основні типи сонячних фотоелектростанцій, їх переваги та недоліки.

2. Автономні сонячні електростанції в основному використовуються в районах, де звичайні джерела енергії недоступні або занадто дорогі. Сонячні електростанції (САТЕ) використовують ефект використання сонячних елементів для прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію.

3. Недоліком мережевих електростанцій є те, що подача електроенергії споживачам припиняється при відключенні зовнішньої електромережі. Через безперебійного живлення споживача, де використовується система, це значно ускладнює конструкцію мережевого інвертора в зоні дії мережі.

4. Гібридна вітро-сонячна енергетична система збирає енергію, виробляється сонячними панелями та вітряними турбінами. Він також має акумулятор для зберігання додаткової енергії.

РОЗДІЛ 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

3.1. Теплова модель фотоелектричного модуля

3.1.1. Гіпотеза балансу енергії та рівняння

Фотоелектричні модулі можна змоделювати як єдине тверде тіло за однорідної температури (T_{PV}). Температура землі, де встановлена система, дорівнює температурі повітря. Фотоелектричні модулі отримують тепло як ізоляцію і віддають тепло у вигляді конвекції в довкілля, випромінюють на землю, випромінюють у небо з температурою неба (T_{sky}) та генерують електроенергію (P_{MP}). Крім того, фотоелектричні модулі будуть втрачати тепло через теплопередачу з холодоагентом системи охолодження.

Рівняння енергетичного балансу:

$$C_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt} = G_t \cdot A_{PV} - q_{rel} - P_{MP} - q_{rads} - q_{radg} - q_{conv} - q_{sp}$$

Де, C_{pv} - еквівалентна теплоємність фотоелектричного модуля, Дж/К; T_{PV} - температура ФЕ модуля, ° С; G_t - сонячна освітленість на поверхні фотомодуля, Вт/м²; q_{ref} - відбита сонячна радіація, Вт; P_{MP} - електрична потужність фотоелектричного модуля, Вт; q_{conv} - конвективний теплообмін між поверхнею фотоелектричного модуля та повітрям, Вт; q_{rads} - радіаційний теплообмін між фотоелектричним модулем та небом, Вт; q_{radg} - радіаційний теплообмін між фотоелектричним модулем та землею, Вт; q_{sp} - конвективний теплообмін між фотоелектричним модулем та водяним струменем, Вт.

3.1.2. Відбите сонячне випромінювання

Сонячне випромінювання потрапляє на поверхню фотоелектричних модулів, що частково проходить через захисне скло і частково відбивається назад у небо. Компонента, відбита назад до неба, розраховується за наступною формулою:

$$q_{rel} = (1 - \tau_g) \cdot A_{PV} \cdot G_t$$

де, τ_g -коефіцієнт пропускання захисного скла фотомодуля, A_{PV} - площа поверхні фотомодуля, м².

Коефіцієнт пропускання захисного скла фотоелектричного модуля не є постійним, тому що він залежить від кута падіння сонячного випромінювання на фотоелектричний модуль. З метою спрощення моделі для цього параметра приймається середньорічне значення без великий втрата точності і приймається рівним 0,9.

3.1.3. Еквівалентна теплоємність фотоелектричного модуля

Фотоелектричний модуль розглядається як єдина маса твердого матеріалу при постійній температурі з еквівалентною теплоємністю, розраховано наступним чином:

$$C_{PV} = A_{PV} \sum \rho_i \cdot x_i \cdot C_{pi}$$

де, ρ_i – густина i -го шару матеріалу, кг/м³; x_i - товщина i -го шару в мм; C_{pi} питома теплоємність, кДж/кг.

Звичайні фотоелектричні модулі мають чотири шари з тепловими параметрами, зазначеними у таблиці 2.1 [60]. Розрахована теплоємність фотоелектричного модуля і вона дорівнює 25464 Дж/К.

Таблиця 3.1.

Теплові параметри шарів фотоелектричного модуля

	Скло	Клітка	Тедлар	Етиленвінілацетат
Товщина, мм	4	0,5	1	0,5
Питома теплоємність, кДж/кгК	0,8	0,7	1,01	3,135
Густина, кг/м ³	2482	2328	1720	1720

3.1.4. Радіаційне тепло

Компонент втрат тепла, що випромінюється, можна розрахувати, враховуючи коефіцієнт випромінювання та температуру поверхонь випромінювача та приймача. Для простих цілей моделювання небо можна уявити як чорне тіло з температурою T_{sky} , земля, на якій встановлено фотоелектричні модулі, має температуру, що вважається такою ж, як температура повітря. Тому променистий теплообмін можна оцінити двома складовими з наступними виразами:

$$q_{rads} = A_{PV} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{rad} [(T_{PV} + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4]$$

$$q_{radg} = A_{PV} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{rad} [(T_{PV} + 273)^4 - (T_{air} + 273)^4]$$

де, q_{rads} – радіаційний теплообмін між фотоелектричним модулем та небом, Вт; q_{radg} – радіаційний теплообмін між фотоелектричним модулем та ґрунтом, Вт; ε_{rad} – коефіцієнт теплового випромінювання фотоелектричного модуля (близько 0,9), σ – постійна Стефана-Больцмана $5,68 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴; T_{PV} – температура ФЕ модуля, °С; T_{sky} – температура піднебіння в °С, яка оцінюється за рівнянням:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_{air}^{1.5}$$

3.1.5. Конвективний теплообмін між поверхнею фотоелектричного модуля та повітрям

Система конвекційного теплообмінника передбачає теплообмін між фотоелектричним модулем та навколишнім середовищем, в основному за рахунок примусової конвекції під впливом швидкості вітру.

В дослідженні розглядається лінійна модель між швидкістю вітру і коефіцієнтом конвективної теплопередачі, що моделює конвективний теплообмін між фотоелектричними модулями та повітрям, що описується наступною формулою:

$$q_{conv} = A_{PV} \cdot h_{conv} (T_{PV} - T_{air})$$

$$h_{conv} = 3v_{wind} + 2.8$$

где v_{wind} – швидкість вітру, м/с; h_{conv} – коефіцієнт конвективної теплопередачі, Вт/м²К; T_{air} – температура повітря навколо ФЕ модуля, °С.

3.2. Розробка математичної моделі фотоелектростанції

Існує безліч програмних додатків, що використовуються для моделювання та дослідження фотоелектричних систем, найбільш найпоширенішими з яких є: MATLAB/ Simulink, PVsyst (професійний інструмент для моделювання фотоелектричних систем), PSpice (проектування та моделювання аналогових та цифрових схем), PSIM (програмне забезпечення для моделювання силової електроніки, управління двигунами та моделювання динамічних систем), CASPOC (програмне забезпечення для моделювання та моделювання в галузі промислової силової електроніки та електроприводів), Labview (графічне середовище програмування для розробки тестових, вимірювань та додатків управління), Transys (програма для моделювання перехідних систем), Homer (програма для моделювання та оптимізації гібридних енергосистем з використанням різних нетрадиційних джерел енергії), RETScreen (програмна система управління чистою енергією для підвищення енергоефективності), PowerFactory Digsilent (Програмний додаток для аналізу енергосистем), SAM (System Advisor Model).

Конструкція системи перетворення сонячної енергії

Видача електроенергії із сонячною електростанцією здійснюється в відповідно до вимог постачальника електроенергії.

Доступні два варіанти підключення: на шини нижчої напруги 630 В та на шини середньої напруги (33 кВ), за допомогою трансформатора, що підвищує.

Модель фотоелектричної системи потужністю 3 МВт включає до свого складу наступне обладнання, як показано на рис. 3.1:

- 1) масив фотоелектричних панелей, згрупованих послідовно та/або паралельно для видачі максимальної потужності 3 МВт.
- 2) підвищує перетворювач постійного струму, використовуваний як регулятора навантаження та, відповідно, для перетворення величини вихідної напруги фотоелектричної батареї в необхідну величину напруги для інвертора.
- 3) трифазний перетворювач постійного струму змінний - інвертор.
- 4) трифазний трансформатор для приєднання інвертора з вихідною напругою 0,63 кВ до електричної мережі номінальною напругою 33 кВ.

5) контролер фотоелектричної системи, який включає до свого складу контролер, що забезпечує максимум потужності фотоелектричної панелі та контролер інвертора.

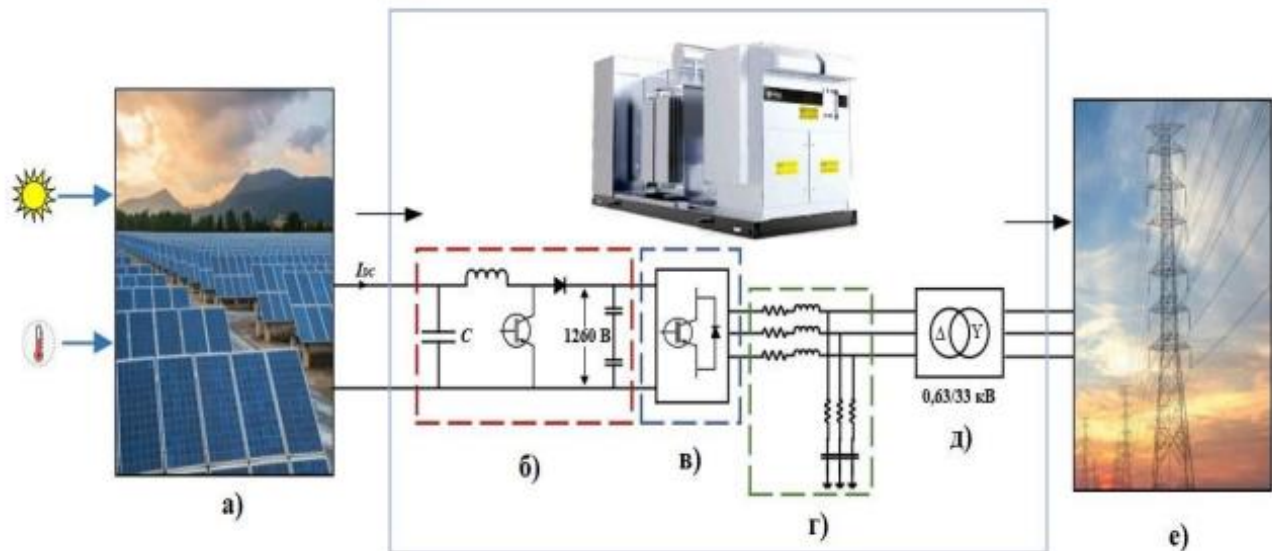


Рис.3.1 Конструкція системи перетворення сонячної енергії та схема її приєднання до електричної мережі: а) масив фотоелектричних перетворювачів; б) підвищуючий перетворювач постійного струму; в) інвертор; г) LC-фільтр; д) перетворюючий трансформатор; значенням напруги 33 кВ

Контролер, що забезпечує максимум потужності фотоелектричної панелі використовується для керування робочим циклом, щоб забезпечити робочу точку якомога ближче до точки максимальної потужності P_{max} фотоелектричних елементів.

Точка максимальної потужності знаходиться на перетині вольт-амперної характеристики фотоелектричної батареї та еквівалентної навантажувальної характеристики.

Конструкція фотоелектричних модулів

Кожна фотоелектрична панель (модуль), що використовується у складі сонячної електростанції, складається з осередків послідовно та паралельно з'єднаних фотоелектричних осередків. Фотоелектричні осередки накріті листом

високопрозорого скла, що характеризується значною стійкістю до механічних впливів. Опорний каркас модуля виготовлений з анодованого алюмінію. Все це забезпечує достатній захист фотоелектричної панелі від атмосферних явищ, таких як град, сніг, лід та вітер високої швидкості (ураган).

Кожен модуль містить шунтуючі діоди, що розміщуються в сполучній (розподільній) коробці. Ці діоди дозволять «відключити» модулі, на які не потрапляє сонячне світло, щоб запобігти їхньому функціонуванню як споживачі електроенергії, і уникнути їх небажаного нагрівання [88].

Еквівалентна схема фотоелектричного модуля, що складається з кількох фотоелементів, включає джерело струму, що генерує фотострум, величина якого залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, діод відповідний p_n переходу фотоелемента, послідовно включений опір, моделює втрати напруги і потужності у фотоелементі і паралельний опір, що відображає струм витоку.

На ринку представлено декілька моделей фотоелементів таких виробників як Mitsubishi, Sharp, Sanyo, LDK, BP Solar, Suntech.

3.3. Висновки до третього розділу

1.Проведено аналіз впливу значень параметрів та точності управління положенням та температурою ФЕС із застосуванням нечіткої логіки та сформульовані вимоги до системи для підвищення ефективності фотоелектричного модуля.

2.Представлена модель фотоелектричної системи та перелічені програмні додатки, що використовуються для моделювання та дослідження фотоелектричних систем.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

4.1. Рекомендації щодо вибору сонячної фотоелектростанції

Ефективність фотоелектричної системи залежить від рівня сонячної радіації. Основною складовою фотоелектричних систем є модулі, які об'єднуються фотоелементи. Модулі бувають розраховані на будь-яку напругу, аж до кількох сотень вольт. Якщо в системі є навантаження змінного струму, то для перетворення на змінний струм до складу системи входять інвертори. При виборі фотоелементів для автономної сонячної енергії необхідно знати ККД того чи іншого виду фотоелементів. Відомо, що ККД фотоелемента є відношенням енергії, що потрапляє на фотоелемент до електроенергії, що надійшла споживачам електроенергії. Існує практичне значення ККД, теоретичне та лабораторне. Нижче наведено значення практичного ККД фотоелементів промислового виробництва:

- фотоелементи з монокристалічного кремнію: 16-17%;
- фотоелементи із полікристалічного кремнію: 14–15%;
- фотоелементи з аморфного кремнію: 8-9%.

Особливості розрахунку фотоелектричної системи.

Принцип роботи системи: сонячна батарея перетворює сонячну радіацію на електричну енергію постійного струму в денний час за допомогою контролерів заряджається акумуляторна батарея (АБ). Рівень заряду АБ контролюється автоматично. Інвертор перетворює напруга постійного струму змінний струм [6, 7].

1. Визначення необхідних параметрів та підбір необхідних компонентів починається зі складання списку всіх передбачуваних навантажень із зазначенням їх потужності та середнього часу роботи кожної з них у протягом доби (потужність кожного споживача вказується у паспорті електроустаткування).

2. Зменшити список споживачів електроенергії за рахунок зменшення кількості особливо енергоємних приладів, що дозволить зменшити як первісну вартість енергосистеми, так і витрати її експлуатацію. Прилади, що залишилися, повинні

бути енергозберігаючими (світлодіодні лампи). Електропобутові прилади також необхідні купувати, які працюють на постійному струмі. Це дозволить:

- зменшення потужність інвертора, а значить і його вартість;
- зменшити втрати електроенергії;
- підвищити надійність системи електропостачання;
- підвищити безпеку системи.

У таблиці 4.1 наведено зразкове енергоспоживання та потужності найпоширеніших електропобутових приладів.

Таблиці 4.1

Типові потужності побутових приладів

Споживач	Потужність Вт	К- сть	Час роботи за день год	Енергоспоживання за день Вт/год
Мікрохвильовка	1500	1	0,5	750
Телевізор	60	1	3	180
Електрочайник	1500	1	0,3	500
Електронасос	600	1	0,5	300
Холодильник	100	1	24	2400
Музичний центр	40	1	2	80
Праска	1500	1	0,5	750
Комп'ютер	350	1	4	1400
Пилосос	700	1	0,1	58
Лампа накаливання	60	5	3	900
Енергозберігаюча лампа	11	5	3	165
Всього за день:				7500

3. Необхідно розрахувати ємність та кількість АБ та вибрати їх тип.

Тут доцільно використовувати герметичні необслуговувані Свинцево-кислотні акумулятори, що мають найбільшу ефективність і більш високі електричні

характеристики, а також більший термін служби в порівнянні зі звичайними батареями. Необхідно визначити, яку кількість енергії необхідно отримувати від акумулятора.

Після розрахунку енергоспоживання системи треба обов'язково розрахувати ємність акумуляторних батарей. Щоб це вкнати необхідно підібрати номінальну напругу акумуляторних батарей i , відповідно задати приблизну кількість похмурих днів. Напруга, за якої установка працює в номінальному режимі може становити 12, 24, 48 і тобто має бути кратно 12В.

Для потужностей системи менше 1 кВт можливе застосування аб з номінальною напругою 12 ст. Вибір АБ в залежності від загальної потужності системи забезпечує більш ефективну роботу інверторів та сприяє зменшенню струмів, що протікають через контролер, інвертор та з'єднувальні кабелі.

Слід враховувати те що, що термін служби АБ безпосередньо залежить від глибини розряду, що має становити трохи більше 50–60% від ємності АБ.

5. Визначення потужності інвертора.

Потужність інвертора слід вибирати, додаючи до сумарної потужності підключених електроприладів не менше 25% резервної потужності. [8].

6. Кількість необхідних сонячних модулів залежить від розміру майданчики для розміщення модулів, необхідної кількості електроенергії та вартості.

Комбіновані(гібридні)автономні системи, такі як вітрові електростанції та фотоелектричні системи, є найбільш ефективними, в тому числі з точки зору економічної ефективності та надійності.

Повністю автономні системи мають нижчу продуктивність, оскільки розмір і кількість модулів підбирається з урахуванням достатнього виробництва енергії взимку, хоча перевиробництво влітку неминуче. Комбіновані системи є більш ефективними, оскільки розмір сонячних елементів підбирається на основі необхідного літнього навантаження, а додаткова електроенергія генерується газопоршневими станціями та вітрогенераторами взимку і в похмуру погоду [9].

Підключені до мережі фотоелектричні системи є найбільш ефективними, оскільки майже вся вироблена електроенергія або використовується споживачами в автономній системі, або подається в зовнішню мережу.

Незважаючи на розвиток сонячних технологій, сонячна енергія залишається найдорожчою з усіх відомих відновлюваних джерел енергії. Наразі використання сонячних елементів для потреб автономного електропостачання є економічно ефективним лише у віддалених від централізованих джерел енергії районах або у випадках, коли інші автономні джерела енергії не можуть бути використані з екологічних причин, наприклад, дизельні електростанції.

Важливим завданням для підвищення надійності СЕС є впровадження нових елементних баз для їх проектування, зокрема, автономних інверторів на основі однофазних три фазних трансформаторів з обертовими магнітними полями.

4.2. Розрахунок економічної ефективності фотоелектростанції

Економічна оцінка заснована на індивідуальних технічних параметри для кожної фотоелектричної системи. У процесі оцінки Початкові витрати на фотоелектричні системи та щорічні грошові потоки в результаті роботи сонячних електростанцій відіграють істотну роль. Економічна оцінка здійснюється з використанням різних фінансових критеріїв.

Технологія фотоелектричних систем є однією з форм виробництва поновлюваної енергії, яка стрімко розвивається у всьому світі. Джерелом виробництва енергії є сонячна енергія, тому негативний вплив на довкілля незначне. Тому багато країн сприймають фотоелектричні системи як надійну альтернативну форму виробництва енергії.

Однак, купівля та встановлення сонячних панелей, як і раніше, є дорогим процесом. Витрати придбання відповідного обладнання, особливо фотоелектричних модулів, можуть доходити до 50% від всіх початкових витрат за будівництво сонячної електростанції.

У всіх інвестиціях, пов'язаних із фотоелектричними системами, основна частина інвестицій призначена для купівлі та встановлення сонячних панелей, цей

параметр характеризується найбільшим економічним ефектом від інвестицій у сонячні системи.

Сонячні батареї не вимагають постійного обслуговування, але час від часу, вони вимагають уваги протягом усього терміну служби, який складає близько 25 років. Слід зазначити, що в залежності від розташування сонячних панелей, на їх поверхні може накопичуватися листя або бруд.

Тому необхідне періодичне очищення їхньої поверхні. Проте, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування фотоелектричних систем виробництва електроенергії низькі та становлять від 0,5% до 1,5% на рік від початкових інвестиційних витрат (Breyer et al, 2009; IEA, 2010c).

Заробітна плата розраховується з використанням середнього значення заробітної плати для цієї галузі та з урахуванням зміни заробітної плати по регіону.

Для подальшого розрахунку необхідно визначити показники, які схильні до інфляції щороку. Рівень інфляції - це відсоток, при якому відбувається щорічна зміна рівня цін на товари та послуги або, як очікується, станеться.

Доходи розраховуються за мінімальною ціною проектів та прогнозованого зростання. Дохід розраховується за такою формулою:

$$C_d = C_{\text{мін}} \cdot W \cdot \sum_{n=1}^T (1 + r_i)^n$$

де: $C_{\text{мін}}$ - мінімальна ціна електроенергії (\$ 0,10/кВт/г); W - вироблена електроенергія (кВтч); r_i - ставка зростання (%).

Для аналізу рентабельності інвестицій був використаний чистий дисконтований прибуток. Для розрахунку чистої наведеної вартості чистих грошових потоків та дисконтування потоків грошових коштів, що генеруються в ході реалізації проекту термін експлуатації того чи іншого проекту становить 25 років. Оскільки середній термін служби основного обладнання у системі (сонячні панелі, інвертор тощо) становить близько 25 років.

ЧДД розраховує за такою формулою:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{CF}{(1+r)^t} - C_0$$

де: C_0 – Загальні початкові інвестиційні витрати; CF - (грошовий потік) це кількісне вираження грошей, наявних у розпорядженні організації, для керівників та власників компанії це план майбутнього руху фінансових фондів підприємства у часі або зведення даних про їх рух у попередніх періодах, а для інвестора CF – очікуваний у майбутньому прибуток від інвестицій (з урахуванням дисконту).

Параметр CF розраховується за такою формулою:

$$CF = EAT - D_{ep} - I_{nv}$$

Параметр DCF або метод ДДП (метод дисконтованих грошових потоків) розраховується:

$$DCF = CF \cdot (1+r)^t$$

де: t - додаткова ставка.

Тах (Податок) розраховується за такою формулою:

$$T_{ax} = t \cdot EBT$$

ЕВТ (прибуток до оподаткування) розраховується за наступною формулі:

$$EBT = C_d - CT$$

де: CT - сумарні витрати; C_d – дохід.

EAT (прибуток після оподаткування) розраховується за наступною формулі:

$$EAT = EBT - T_{axes}$$

При ухваленні інвестиційних рішень ВНД (внутрішня норма прибутковості) використовується для розрахунку ставки альтернативних вкладень. При виборі з кількох проектів з різними ВНД, вибирається проект з максимальним значенням ВНД.

Рентабельність будь-якого технічного проекту визначається економічним показником ВНД. Якщо цей показник вищий за облікову ставку, встановлену фінансовим банком регіону, то можна говорити про прибутковість проекту.

4.3. Висновки до третього розділу

1. Якщо споживачі не підключені до загальної електромережі або підключення є дорогим через віддаленість від енергосистеми або нестачу потужності найближчих електричних мереж, то в цьому випадку встановлення автономної СФЕС є вигідним через те, що капітальні витрати на установку будуть рівними або нижчими від вартості підключення до загальної мережі, включаючи вартість ліній електропередачі та трансформаторної підстанції.

2. З економічної точки зору, власнику СФЕС вигідно в даний час продавати електроенергію енергосистемі в денний час, і купувати її у енергетичної компанії в нічний час (через занижені нічні тарифи). Але тут невирішено питання із законодавчою базою.

3. В даний час доцільно використовувати СФЕС там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення електроенергією в темний час доби або в періоди без яскравого сонячного світла необхідне АБ або інше резервне джерело електроенергії.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень отримано нове рішення **актуального наукового завдання**, встановлення закономірності тепломасообмінних процесів, які протікають при використанні сонячних фотоелектростанцій.

1. В даний час метод фотоелектричного перетворення у світі став одним із пріоритетних напрямів отримання сонячної електроенергії.

2. Важливою обставиною є те, що сонячні фотоелектричні установки (СФЭУ) відрізняються відносною простотою конструкції, низькою металоємністю, можуть працювати з однаковою ефективністю в будь-якому діапазоні потужності та на будь-якій географічній широті.

3. Фотоперетворення є ефективним способом отримання електроенергії при розсіяному сонячному світлі, що дає можливість створювати електростанції різної потужності. Такі системи відрізняються малою витратою електроенергії на власні потреби, легко автоматизуються, безпечні в експлуатації, надійні та ремонтпридатні.

4. Розглянуті основні типи сонячних фотоелектростанцій, їх переваги та недоліки.

5. Автономні сонячні електростанції в основному використовуються в районах, де звичайні джерела енергії недоступні або занадто дорогі. Сонячні електростанції (САТЕ) використовують ефект використання сонячних елементів для прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію.

6. Недоліком мережевих електростанцій є те, що подача електроенергії споживачам припиняється при відключенні зовнішньої електромережі. Через безперерйного живлення споживача, де використовується система, це значно ускладнює конструкцію мережевого інвертора в зоні дії мережі.

7. Гібридна вітро-сонячна енергетична система збирає енергію, виробляється сонячними панелями та вітряними турбінами. Він також має акумулятор для зберігання додаткової енергії.

8.Проведено аналіз впливу значень параметрів та точності управління положенням та температурою ФЕС із застосуванням нечіткої логіки та сформульовані вимоги до системи для підвищення ефективності фотоелектричного модуля.

9.Представлена модель фотоелектричної системи та перелічені програмні додатки, що використовуються для моделювання та дослідження фотоелектричних систем.

10.Найбільш практичне застосування у світі отримали гібридні (комбіновані) сонячно-паливні електростанції з параметрами: ККД близько 14%, температура пари 371°C, тиск пари 100 бар, вартість електроенергії, що виробляється 0,08 - 0,12 дол/кВт год.

11.Оскільки питома вартість сонячної електростанції не залежить від її розмірів і потужності, в ряді випадків доцільно модульне розміщення СФЕС на даху сільського будинку, котеджу, ферми. годинник. Перевагою такого використання, крім політики заохочення. малих та незалежних виробників енергії, є економія на опорних конструкціях та площі землі, а також поєднання функції даху та джерела енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Проект оновленої «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року». – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
2. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://eenergy.com.ua/news/sonyachna-energetyka-vukrayini-2019/>.
3. Аналіз проведених робіт по будівництву сонячних електричних станцій за 2018 рік [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України – Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=244972812
4. Litovchenko V.G., Strikha M.V. Solar energetics: agenda for the world and Ukraine. Kyiv: K.I.C., 2015.
5. Oksanych A.P., Terban V.A., Volokhov S.O., Klyui M.I., Skrishevskii V.A., Kostylyov V.P., Makarov A.V. Modern technologies for silicon and silicon based photoelectrical solar energy converters manufacturing. Kriviy Rig: Mineral, 2010.
6. Kostylyov V.P., Chernenko V.V., Andros S.P., Nazarenko L.A. Metrology and standartization of the phototechnical testing of solar energy converters and moduli. In: Modern Problems of Light and Electricity Engineering. Proc. IV Int. Conf. (13–14 April 2011, Kharkiv, Ukraine).
7. Klyui M.I., Kostylyov V.P., Makarov A.V., Chernenko V.V. Metrological aspects of the photoelectric solar energy converters testing. Complex Systems and Processes. 2007. 1(11): 42.
8. Oberemok O., Kladko V., Litovchenko V., Romanyuk B., Popov V., Melnik V., Sarikov A., Gudymenko O., Vanhellefont J. Stimulated Oxygen Impurity Gettering Under Ultra-Shallow Junction Formation in Silicon. Semiconductor Science and Technology. 2014. 29: 055008. <http://doi.org/10.1088/0268-1242/29/5/055008>
9. Gorban A.P., Kostylyov V.P., Sachenko A.V., Serba O.A., Sokolovskyi I.O., Chernenko V.V. Effect of floating p-n junctions on the efficiency of silicon back side contact solar cells. Ukr. J. Phys. 2010. 55(7): 783.

10. Gamov D.V., Gudymenko O.I., Kladko V.P., Litovchenko V.G., Melnik V.P., Oberemok O.S., Popov V.G., Polishchuk Yu.O., Romanyuk B.M., Chernenko V.V., Naseka V.M. Research of recombination characteristics of Cz-Si implanted with iron ions. *Ukr. J. Phys.* 2013. 58(9): 881. <http://doi.org/10.15407/ujpe58.09.0881>

11. Litovchenko V.G., Romanyuk B.M., Popov V.G., Melnik V.P., Oberemok O.S., Kladko V.P., Lisovskii I.P., Strelchuk V.V., Chernenko V.V., Shapovalov V.O. Complex investigations of crystalline material for solar energetics. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii (Physics of Metals and Advanced Technologies)*. 2011. 104: 873. [in Ukrainian].

12. Liu F., Wang W., Wang L., Yang G. Ferroelectric-semiconductor photovoltaics: Non-PN junction solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2014. 104: 103907. <http://doi.org/10.1063/1.4868304>

13. Azab. M. (2010). Optimal power point tracking for stand-alone PV System using particle swarm optimization, *IEEE Int Symposium on, in Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 969-973.

14. Luque. A and Hegedus. S. (2003). " Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" . John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, pp.

15. Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED. Solar cell efficiency tables (Version 48). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2016;

16. Haney J, Burnstein A (2013) Solar America Board for Codes and Standards Report, 2013. www.solarabcs.org. Accessed Jan 2014

17. Blankenship RE, Tiede DM, Barber J, Brudvig GW, Fleming G, Ghirardi M, Gunner MR, Junge W, et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science*. 2011; 332:805–809. doi:10.1126/science.1200165.

18. Soori P.K. Modelling of a Grid Connected Solar PV System Using MATLAB/Simulink // *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2016.

19. Benaissa O.M., Hadjeri S., Zidi S.A. Modeling and simulation of grid connected PV generation system using Matlab/Simulink // International journal of power electronics and drive systems. IAES Institute of Advanced Engineering and Science, 2017. Vol. 8, № 1. P. 392.
20. Shweta Dash, Vishwanath Prasad kumri. A Design of 400 KW Photovoltaic Array Connected Micro Grid System Using Matlab Simulink Model // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2018. Vol. 7, № 12. P. 4257–4262.
21. H-Sanchez J. et al. Modeling and Performance Analysis of 1-MW PV Farm for Varying Solar Irradiance Conditions // 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). Ixtapa, Mexico: IEEE, 2018. P. 1–6. 187
22. Asiedu-Asante A.B., Ofosu R.A. Cascaded Loop Control of a Three-Phase GridConnected PV Inverter System // Ghana Journal of Technology. 2020. Vol. 5, № 1. P. 40–53.
23. Adebisi A.A. et al. Performance analysis of grid-tied photovoltaic system under varying weather condition and load // IJECE. 2021. Vol. 11, № 1. P. 94.
24. Bentouba S. et al. Performance assessment of a 20 MW photovoltaic power plant in a hot climate using real data and simulation tools // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 7297– 7314.
25. Shiva Kumar B., Sudhakar K. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India // Energy Reports. 2015. Vol. 1. P. 184–192.
26. Tripp C. A history of Iraq. Cambridge University Press, 2002. 14. Sluglett P., Tejel J., Bocco R. Writing the Modern History of Iraq: Historiographical and Political Challenges. Singapore: World Scientific Company, 2013.
27. Rosner K. Water and Electric Power in Iraq and Syria: Conflict and Fragility Implications for the Future // Robert Strauss Centre [https://www. strausscenter. org/wpcontent/uploads/Water-and-Electric-Power-in-Iraq-and-Syria-2016. pdf](https://www.strausscenter.org/wpcontent/uploads/Water-and-Electric-Power-in-Iraq-and-Syria-2016.pdf). 2016.
28. Marr P., al-Marashi I. The Modern History of Iraq. 4th ed. Routledge, 2018.