

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Підвищення рівня енергетичної безпеки шляхом застосування гібридних
вітросянних енергоустановок
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Пилип ГАБАЛЬ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Олег КОНДРАТЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Пилипу ГАБАЛЮ

1. Тема «Підвищення рівня енергетичної безпеки шляхом застосування гібридних вітросонячних енергоустановок»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від « 12 » 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проекту: статистичні дані інтенсивності вітряних та сонячних потоків по регіонах країни та Європи; параметри електрообладнання для подібних електричних станцій

4. Зміст роботи/проекту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1.ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ; РОЗДІЛ 2.ЕФЕКТИВНІСТЬ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ; РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ; ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «_12_» _____ 10 _____ 2024_ р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

Пилип ГАБАЛЬ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Пилип ГАБАЛЬ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Підвищення рівня енергетичної безпеки шляхом застосування гібридних вітросонячних енергоустановок» магістрантом

Пилипом ГАБАЛЕМ

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел ____.

У 2010 – 2012 роках світ пройшов пік видобутку органічного палива. З цього часу видобуток вуглеводневої сировини поступово зменшується (до 7% на рік). Тому з 2020 – 2024 рр нафта та газ уже не масово використовуватиметься як паливо, і людство змушене буде переходити повністю на нетрадиційні, у тому числі поновлювані джерела енергії. Зниження залежності від викопного палива та підвищення частки ВДЕ зменшує витрати на імпорт енергоносіїв. Крім того, розробка та впровадження таких проєктів створюють нові робочі місця, особливо в регіонах, де впроваджуються станції.

Україна отримує суттєву технічну та фінансову підтримку для впровадження відновлюваної енергетики від міжнародних партнерів. Гібридні станції – перспективний напрямок, який може залучити інвестиції та грантове фінансування.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – : розробити науково обґрунтовані підходи та рекомендації щодо розвитку гібридних вітро-сонячних електричних станцій з урахуванням техніко-економічних, екологічних та енергетичних аспектів, які забезпечать підвищення енергетичної безпеки, стабільність енергосистеми та сприятимуть сталому розвитку енергетичного сектору.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, система електропостачання, математична модель, гібридна електростанція, міні-енергокомплекси

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Increasing the level of energy security through the use of hybrid wind-solar power plants" by master's student Pylyp GABAL

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, used literary sources_____.

In 2010-2012, the world passed the peak of fossil fuel production. Since then, hydrocarbon production has been gradually decreasing (up to 7% per year). Therefore, from 2020-2024, oil and gas will no longer be used as fuel on a large scale, and humanity will be forced to switch completely to non-traditional, including renewable energy sources. Reducing dependence on fossil fuels and increasing the share of renewable energy sources reduces the cost of importing energy carriers. In addition, the development and implementation of such projects create new jobs, especially in regions where stations are being implemented.

Ukraine receives significant technical and financial support for the implementation of renewable energy from international partners. Hybrid plants are a promising direction that can attract investments and grant funding.

The purpose of the master's qualification work is: to develop scientifically sound approaches and recommendations for the development of hybrid wind-solar power plants, taking into account technical, economic, environmental and energy aspects, which will ensure increased energy security, stability of the energy system and contribute to the sustainable development of the energy sector.

Keywords: renewable energy sources, power supply system, mathematical model, hybrid power plant, mini-power complexes

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СПЕЦИФІКА РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІТРОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1. Особливості роботи фотоелектричних станцій

1.1.1. Перспективи використання фотоелектричних перетворювачів у світі

1.2. Особливості роботи вітрових електростанцій

1.2.1. Підвищення ефективності вітрових енергетичних установок

1.3. Гібридні вітро-сонячні енергетичні установки

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТИВНІСТЬ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

2.1. Конкурентоспроможність сонячних та вітрових електричних станцій

2.2. Принципи побудови гібридних вітро-сонячних енергоустановок

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

3.1. Особливості вибору оптимального складу вітро-сонячної електростанції з дизельними генераторами

3.2. Автономні системи електропостачання з відновленими джерелами енергії та розумною мережею

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАЊ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ГВСЕС – гібридні вітро-сонячні електричні станції

ЕЕС – електроенергетична система

ЕЕ - електрична енергія

СФЕС - сонячна фотоелектрична станція

ККД - коефіцієнт корисної дії

СФЕУ - сонячна фотоелектрична установка

ВЕС - вітрова електрична станція

ВЕУ - вітрова енергетична установка

ВЕМУ – вітроенергетична морська установка

КВВП - коефіцієнт використання встановленої потужності

РГ - розподілена генерація

СЕС – сонячна електростанція

ВСТУП

Актуальність.

Сьогодні більшість з нас не можуть уявити життя без електрики. Крім зручності, вона забезпечує роботу важливих об'єктів: лікарень, споруджень цивільної оборони, шкіл, дитячих садків, промислових підприємств. Але існують місця, куди неможливо або нерентабельно тягнути проводи від основної магістралі. Крім того, навіть у надійній та сучасній системі можуть бути збої. Саме тому треба шукати варіанти рішення проблеми енергозабезпечення споживачів в територіально ізольованих районах. З часом вимоги до надійності електропостачання та якості електроенергії промислових та побутових споживачів тільки зростають. Отже, необхідно розвивати та модернізувати територіально ізольовані райони, втілювати інноваційні технології.

Одним з найбільш перспективних напрямів такого розвитку є створення гібридної електростанції з використанням декількох синхронізованих джерел генерації електроенергії, які містять відновлювані джерела з великим заміщенням використання дизельного пального, на 50% і більше, та з високим ступенем автоматизації, що дозволить знизити експлуатаційні витрати не менше, ніж на 25%. Це не тільки привело б до збереження джерела постійної генерації електроенергії, але й дозволило б знизити поставки дизельного палива в територіально ізольовані регіони та зробити виробництво енергії більш екологічним.

Розвиток гібридних вітро-сонячних електричних станцій (ГВСЕС) є актуальним з кількох причин, що обумовлені сучасними викликами в енергетичній сфері:

1. Енергетична безпека та незалежність.

Гібридні установки дозволяють зменшити залежність від викопних енергоресурсів, значна частина яких імпортується. В умовах глобальної енергетичної кризи ГВСЕС сприяють зміцненню енергетичної незалежності країн.

2. Оптимальне використання ресурсів.

Поєднання вітрових і сонячних установок дозволяє ефективніше використовувати природні ресурси, оскільки сонячна енергія зазвичай доступна вдень, а вітрова – вночі чи під час погіршення погоди. Це знижує нерівномірність генерації електроенергії.

3. Зменшення впливу на довкілля.

Гібридні електростанції суттєво знижують викиди парникових газів та інші види забруднень порівняно з традиційними електростанціями, що працюють на викопному паливі.

4. Підвищення ефективності енергосистеми.

Завдяки гібридності вдається зменшити навантаження на енергосистему та потребу в будівництві додаткової резервної потужності. Також це сприяє зниженню втрат електроенергії при її передачі.

5. Економічна доцільність.

Попри високі початкові інвестиції, ГВСЕС забезпечують зниження вартості електроенергії у довгостроковій перспективі завдяки відсутності витрат на паливо та низьким експлуатаційним витратам.

6. Гнучкість та інтеграція з розподіленими енергоресурсами (DER).

Гібридні станції легко інтегруються з розподіленими енергоресурсами, забезпечуючи стабільність локальних енергосистем та сприяючи розбудові "розумних мереж" (Smart Grids).

7. Відповідь на кліматичні виклики

Збільшення кількості природних катаклізмів через зміну клімату стимулює країни до впровадження стійких рішень у енергетиці. ГВСЕС є одним із найбільш перспективних варіантів адаптації до змінних умов.

Застосування гібридних електричних станцій, зокрема вітро-сонячних, в Україні сьогодні є надзвичайно актуальним і виправданим через кілька ключових факторів.

Україна активно працює над скороченням залежності від імпортованих енергоресурсів, особливо природного газу та вугілля. Гібридні електростанції

дозволяють створити стабільні та автономні джерела електроенергії, зменшуючи залежність від зовнішніх поставок енергоносіїв.

Україна має сприятливі природні умови для розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ):

- Вітрові ресурси – особливо на півдні та сході країни (Приазов'я, Причорномор'я, Карпати).

- Сонячна енергія – високий потенціал у центральних, південних і східних регіонах.

Поєднання цих джерел в рамках однієї гібридної системи дозволяє оптимізувати використання природних умов.

У 2010 – 2012 роках світ пройшов пік видобутку органічного палива. З цього часу видобуток вуглеводневої сировини поступово зменшується (до 7% на рік). Тому з 2020 – 2024 рр нафта та газ уже не масово використовуватиметься як паливо, і людство змушене буде переходити повністю на нетрадиційні, у тому числі поновлювані джерела енергії. Зниження залежності від викопного палива та підвищення частки ВДЕ зменшує витрати на імпорт енергоносіїв. Крім того, розробка та впровадження таких проєктів створюють нові робочі місця, особливо в регіонах, де впроваджуються станції.

Україна отримує суттєву технічну та фінансову підтримку для впровадження відновлюваної енергетики від міжнародних партнерів. Гібридні станції – перспективний напрямок, який може залучити інвестиції та грантове фінансування.

Україна також взяла на себе зобов'язання в межах Європейського зеленого курсу (Green Deal) [1], який передбачає скорочення викидів CO₂. Гібридні станції допоможуть досягти цих цілей, скорочуючи залежність від вуглецевоемних джерел енергії.

Гібридні станції можуть інтегруватися з системами накопичення енергії (батареями), забезпечуючи стабільність навіть у пікові години споживання. Це

важливо для української енергосистеми, яка наразі стикається з нерівномірним навантаженням.

Гібридні електричні станції є важливим елементом модернізації енергетики України. Вони будуть сприяти підвищенню енергетичної безпеки, забезпечать ефективне використання ресурсів, допоможуть зменшити вплив на довкілля та будуть сприяти інтеграції України в європейську енергетичну спільноту. Їх впровадження – це стратегічний крок до сталого розвитку та економічного зростання.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи: розробити науково обґрунтовані підходи та рекомендації щодо розвитку гібридних вітро-сонячних електричних станцій з урахуванням техніко-економічних, екологічних та енергетичних аспектів, які забезпечать підвищення енергетичної безпеки, стабільність енергосистеми та сприятимуть сталому розвитку енергетичного сектору.

Об'єкт дослідження: процеси виробництва, інтеграції та оптимізації використання енергії в гібридних вітро-сонячних електричних станціях в умовах сучасних енергетичних систем.

Предмет дослідження: техніко-економічні, екологічні та експлуатаційні характеристики гібридних вітро-сонячних електростанцій, а також методи їх проєктування, розміщення, оптимізації та інтеграції в енергосистему.

Задачі дослідження:

- оцінити сучасний стан та перспективи розвитку гібридних вітро-сонячних електростанцій;
- визначити технічний та економічний потенціал використання вітро-сонячних станцій в Україні і світі;
- проаналізувати ефективність поєднання вітрових і сонячних енергетичних установок;
- розробити модель режимів роботи автономних гібридних електростанцій з урахуванням природних, технічних та економічних умов;

- провести моделювання параметрі управління інтегрованою системою;
- визначити можливості взаємодії ГВСЕС із системами накопичення енергії та іншими джерелами.

Наукова новизна роботи: полягає у розробці нових підходів до оптимізації проектування, розміщення та інтеграції гібридних вітро-сонячних електростанцій в енергосистему з урахуванням техніко-економічних, екологічних та кліматичних факторів, що сприяє підвищенню їх ефективності, надійності, енергетичної безпеки та стійкості до змінних умов.

Теоретичне значення роботи полягає у розширенні наукових уявлень про процеси взаємодії вітрових і сонячних енергетичних установок у складі гібридних систем, розробці методів їх оптимізації та інтеграції в енергосистему, а також формуванні наукової бази для подальшого розвитку відновлюваної енергетики.

Практичне значення роботи полягає у створенні рекомендацій для проектування, розміщення та експлуатації гібридних вітро-сонячних електростанцій, що забезпечують підвищення ефективності енергетичної генерації, зменшення витрат та екологічного впливу, а також сприяють розвитку сталої енергетики та енергетичної незалежності регіонів.

Методи дослідження: аналіз літератури та інформаційних джерел; математичне моделювання (створення моделей для аналізу роботи гібридних систем за різних кліматичних і технічних умов; оптимізація параметрів роботи станції); системний аналіз (комплексне дослідження впливу гібридних станцій на енергосистему, оцінка взаємозв'язків між компонентами гібридних установок і зовнішніми умовами); енергетичне моделювання (аналіз виробництва енергії за різних сценаріїв роботи ГВСЕС, дослідження впливу на баланс енергосистеми та її стабільність); методи оптимізації (застосування алгоритмів оптимізації для вибору найкращих технічних рішень і конфігурацій станцій).

РОЗДІЛ 1. СПЕЦИФІКА РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІТРОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1. Особливості роботи фотоелектричних станцій

У 2010 – 2012 роках світ пройшов пік видобутку органічного палива. З цього часу видобуток вуглеводневої сировини поступово зменшується (до 7% на рік). Тому з 2020 – 2024 рр. нафта та газ уже не масово використовуватиметься як паливо, і людство змушене буде переходити повністю на нетрадиційні, у тому числі поновлювані джерела енергії.

За різними прогнозами, відсоток забезпечення потреб людства до 2050 року електроенергією від сонячних фотоелектричних станцій (СФЕС) може досягти рівня 80%.

В даний час Україна відстає від рівня генерації енергії відновлюваними джерелами від європейських держав. Частка сонячної генерації становить менше 0,001% у загальному енергобалансі. Аналіз науково-технічної літератури показав, що перспективним напрямком у питаннях енергозбереження та підвищення ефективності електропостачання споживачів віддалених від зовнішніх мереж у країні є застосування СФЕС [1,2].

Найбільшого поширення набули сонячні фотоелектричні установки (СФЕУ) на основі кремнію трьох видів: монокристалічного, полікристалічного та аморфного.

Сьогодні відомо, що для фотоперетворювачів з монокристалічного кремнію в лабораторних умовах на дослідних зразках можна досягти ККД 24%. Для полікристалічного кремнію ці значення дорівнюють приблизно 17%, для аморфного кремнію на дослідних модулях досягнуто ККД близько 11%.

Усі ці дані відповідають одношаровим фотоелементам. В даний час відомі двох- та тришарові фотоелементи, які дозволяють використовувати більшу частину сонячного спектру за довжиною хвилі сонячного випромінювання. Для двошарового фотоелемента на дослідних зразках отримано ККД 30%, а для тришарового 35-40%.

Основними перевагами СФЕУ та, відповідно, сонячних фотоелектричних станцій (СФЕС) є:

- 1) повсюдна поширеність на Землі;
- 2) необмеженість ресурсів;
- 3) енергія, одержувана від сонячних електростанцій, безкоштовна;
- 4) високий термін служби (понад 30 років);
- 5) екологічна чистота;
- 6) низький рівень експлуатаційних витрат.

Основними недоліками СФЕС є:

- 1) низький загальний ККД, який залежить від ККД фотоелементів та інверторів;
- 2) висока вартість (фотоелементів та акумуляторних батарей).

Ці недоліки призводять до того, що в даний час вартість електроенергії, що виробляється за допомогою СФЕС перевищує вартість електроенергії, що виробляється від традиційних джерел електроенергії.

Однак, оскільки питома вартість сонячної електростанції не залежить від її розмірів і потужності, у ряді випадків доцільно розміщення фотоелемента СФЕС на даху будинків, котеджів, ферм тощо. У цьому випадку власнику СФЕС необхідно продавати електроенергію енергосистемі в денний час, і купувати її в енергетичної компанії вночі. Переваги такого підходу використання пов'язані з економією на опорних конструкціях та площі землі, а також поєднання функції даху та джерела енергії.

Враховуючи, що 1 кг кремнію в сонячному елементі виробляє за 30 років 300 МВт год електроенергії, легко підрахувати нафтовий еквівалент кремнію. Прямий перерахунок електроенергії 300 МВт год теплоти згоряння нафти 43,7 МДж/кг дає 25 т нафти на 1 кг кремнію. Якщо прийняти ККД теплових електростанцій, що працюють на мазуті, 33%, то 1 кг кремнію по електроенергії, що виробляється, еквівалентний приблизно 75 тон нафти.

У зв'язку з високою надійністю термін служби СФЕС за основним компонентом – кремнієм та сонячним елементам може бути збільшено до 100

років. Єдиним обмеженням може бути необхідність їх заміни на більш ефективні елементи, оскільки ККД до 30% буде досягнуто у виробництві найближчим часом. У разі заміни сонячних елементів кремній може бути використаний повторно та кількість циклів його використання не має обмежень у часі.

Основними компонентами СФЕУ є сонячні акумулятори (модулі); автономні інвертори. Найбільшого поширення набули сонячні батареї, виконані на монокристалічних або полікристалічних кремнієвих елементах.

Сонячні батареї, як правило, розробляються на номінальну напругу 12 В, а їхня потужність на 1 м^2 знаходиться в межах 100-350 Вт.

Електричні параметри сонячних батарей видаються у вигляді вольт-амперної характеристики, знятої за стандартних умов, тобто коли потужність сонячної радіації становить 1000 Вт/м^2 , температура елементів – 25°C та сонячний спектр – на широті 45° (рис.1.1).

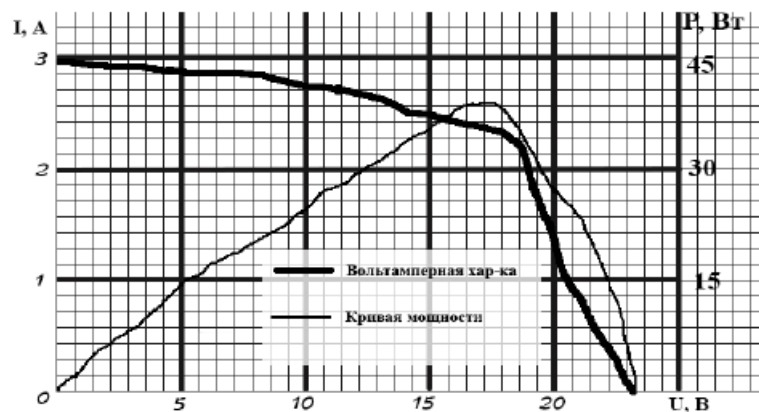


Рисунок 1.1 – Вольт-амперна характеристика сонячної батареї

На рис.1.1 також наведена крива потужності, що відбирається від сонячної батареї залежно від напруги навантаження. Номінальна потужність модуля визначається як найбільша потужність при стандартних умовах.

На СФЕУ знайшли застосування електрохімічні акумулятори, які є джерелом електроенергії у темний час доби. Основними умовами щодо вибору акумуляторних батарей є: стійкість до циклічному режиму роботи (заряд –

розряд); здатність витримувати глибокий розряд; низький саморозряд; довговічність; простота в обслуговуванні [3].

Основними перевагами акумуляторних батарей є:

- тривалий термін служби -15 років;
- стійкість до циклічного режиму – понад 1000 циклів;
- відсутність необхідності обслуговування протягом терміну служби;
- не вимагають обслуговування у період терміну служби;
- саморозряд становить приблизно 3% на місяць.

Для перетворення постійного струму акумуляторної батареї на змінний синусоїдальної форми застосовується інвертор. Інвертори поділяються на два типи [3,4]:

- Інвертори для автономних систем;
- Інвертори для застосування в мережі.

Головна відмінність інверторів у роботі схеми управління: перший тип має генератор еталонної частоти (генератор опорного сигналу), а другий повинен працювати синхронно з промисловою мережею (і в якості генератора частоти використовується сама мережа). Для всіх типів інверторів основний електричний параметр – ККД, який знаходиться в межах 85 -92%.

Вихідна напруга автономних інверторів у більшості випадків становить 220 В (50/60 Гц). Інвертори потужністю від 10 до 100 кВт зазвичай виконуються трифазними на напругу 380 В. Усі автономні інвертори перетворюють напругу постійного струму акумуляторних батарей напругою 12, 24, 48 та 120 В. Чим більше вхідна напруга, тим простіше інвертор і тим вищий його ККД. При великих напругах значно менше втрати на передачу енергії від сонячних батарей до акумуляторної батареї, але при цьому ускладнюється конструкція сонячних батарей та їх експлуатація при підвищеній напрузі (вище 40 В).

До якості вихідної напруги автономних інверторів висуваються менш жорсткі вимоги. Якщо дозволяє навантаження у складі СФЭУ застосовуються автономні інвертори з трапецеїдальною вихідною напругою. Що важливо, такі

інвертори в 2...3 рази дешевші за інвертори з синусоїдальним вихідним сигналом. Важливим параметром автономних інверторів є залежність ККД від потужності навантаження [5]. Відомо, що ККД має незначно зменшуватися при підключенні навантаження вдсятеро меншого (за споживаною потужністю), ніж номінальна потужність інвертора. В ідеальному випадку до автономних інверторів пред'являються такі вимоги:

- здатність витримувати навантаження;
- низькі втрати електроенергії при малих навантаженнях та на холостому ходу;
- забезпечувати стабілізацію вихідної напруги;
- високий ККД;
- відсутність електромагнітних перешкод, створюваних силовими електронними приладами.

Відомо, що залежно від призначення споживача, вимоги до якості електроенергії розрізняють три типи СФЕС: автономні; резервні; працюють із мережею. У віддалених районах, де немає централізованого електропостачання, СФЕС використовується для електропостачання окремих споживачів. У таких станціях вироблена електроенергія споживається навантаженням та одночасно акумулюється в батареях для використання у темний час доби або у період слабкої сонячної радіації.

Усі типи СФЕС мають загальну структуру та містять (рис.1.2): фотоелектричні модулі (ФЕМ); контролер заряду (КЗ), який служить для захисту акумуляторних батарей від надлишкової підзарядки, а також від надлишкової розрядки в ході використання; систему акумуляції (СА), яка містить акумуляторні батареї, ємність яких повністю забезпечує потрібний рівень автономності щодо електропостачання підключеного навантаження; інвертор (І); навантаження (Н).

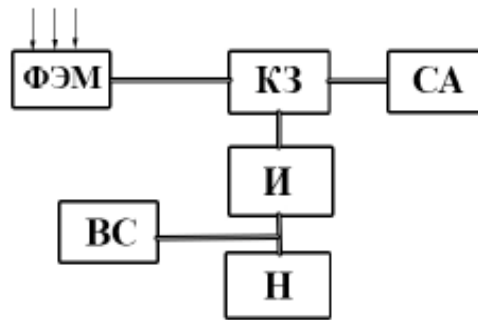


Рисунок 1.2 - Структурна схема підключення СФЕС
(автономні, резервні, що працюють з мережею)

Резервні СФЕУ застосовуються, якщо є введення від мережі централізованого електропостачання. У разі відключення мережі або недостатньої мережної напруги в роботу включаються СФЕУ. Малі резервні СФЕУ застосовуються для електропостачання відповідальних споживачів електроенергії, перерва в електропостачанні яких може привести до збою в роботі комп'ютерної техніки, технологічних процесів тощо. Чим більша потужність, необхідна для електропостачання відповідальних споживачів, і чим довше періоди відключення мережі, тим більше потрібна потужність СФЕС.

Якщо СФЕУ підключено до мережі централізованого електропостачання, надлишок електричної енергії доцільно продавати електромережам, якщо є відповідний закон, що дозволяє це робити.

Для підвищення надійності роботи СФЕС необхідно їх конструювати за модульним принципом [5,6]. Практично, сонячні батареї – це окремі модулі. Доцільно також застосовувати типові акумуляторні батареї, які також представляють окремий модульний функціональний блок. Модульне агрегування необхідно також застосувати для автономних інверторів, де у якості функціональних модульних елементів можна представити вхідні та вихідні фільтри, силову електронну схему та систему стабілізації напруги та захисту. Значно підвищити показники надійності автономних інверторів та

СФЕУ в комплексі можна за рахунок застосування в їх конструкції однофазно-трифазних трансформаторів з магнітним полем, що обертається [7, 8].

Таким чином, розглянуті переваги та недоліки, особливості роботи СФЕС, дозволять у перспективі розробляти їх структурно-схемні рішення з покращеними експлуатаційно-технічними характеристиками.

1.1.1. Перспективи використання фотоелектричних перетворювачів у світі

У другій половині ХХ ст. одну з найважливіших позицій серед загальносвітових проблем зайняла проблема глобального потепління. У період 1950-2004 рр. середньосвітова температура підвищилася з 13,87 до 14,53 ° С [8]. У свою чергу зростання температури впливає на танення льодів на Північному та Південному полюсах, провокуючи підвищення рівня Світового океану. В даний час завдяки міжнародним угодам і протоколам багато країн світу переглянули свою політику у сфері регулювання процесів викидів, що призвело до поточного загальносвітового зниження викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Якщо зупинитися докладніше на сфері виробництва, слід зазначити, що більшою мірою завдають шкоди навколишньому середовищу підприємства з виробництва електричної енергії: частка електроенергетики складає третину від загального обсягу шкідливих викидів у повітря, приблизно 32 % [8]. Основною метою 21-ї сесії Конференції сторін РКООНІК є досягнення універсальної та обов'язкової для виконання угоди, що дозволяє ефективно боротися зі зміною клімату та прискорювати перехід до суспільства та економіки, які мало споживають вуглецеві технології. Одним із рішень даної проблеми є заміна виробітку електричної енергії традиційними способами використанням енергії Сонця.

Переваги встановлення ФЕП вже розглянули, а до недоліків ще треба віднести: дорожнечу елементів, нерівномірний розподіл сонячної енергії по поверхні землі і, що є серйозною загрозою, негативний вплив на організм

людини, так як при виробництві сонячних елементів і акумуляторів використовується свинець, а у фотоелементах присутні кадмій, галій та миш'як.

Тільки протягом одного тижня кількість сонячної енергії, що надходить на Землю, у багато разів перевищує енергію всіх світових запасів корисних копалин, а кількість сонячної енергії в Україні оцінюється більш ніж 2000 млн тон умовного палива. Проте використання сонячної енергії поки залишається малопопулярним, навіть незважаючи на те, що кількість сонячних днів в південних областях нашої країни приблизно дорівнює кількості сонячних днів у Центральній Європі, де сонячна енергія використовується широко (рис.1.3).

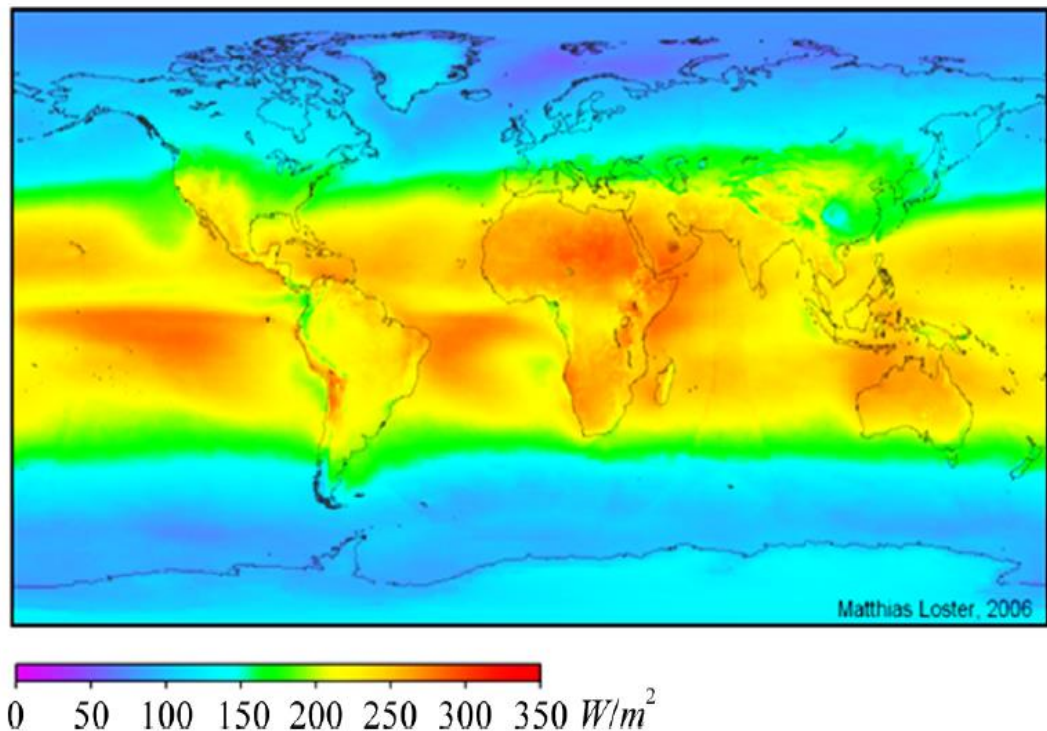


Рисунок 1.3 - Мапа розподілу сонячної енергії, що надходить на Землю

Існує два способи підключення сонячних батарей (рис.1.4): паралельне та послідовне. У кожного з цих способів є свої переваги та недоліки. При підключенні сонячних елементів паралельно збільшується сила струму, але при цьому в силу різного освітлення найбільш ефективно буде працювати та з батарей, яка краще освітлена. Підключення ж послідовним способом збільшує

напругу сонячної батареї, але струм, що виходить з такої батареї, еквівалентний самому низькому струму елемента. Таким чином, найбільш ефективним підключенням буде спільне застосування двох способів.

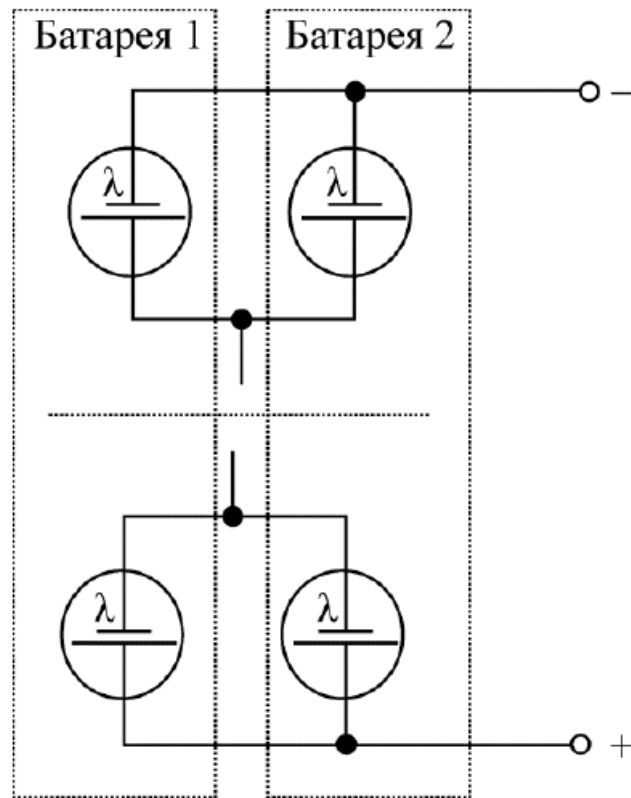


Рисунок 1.4 – Підключення сонячних батарей

Енергію, яку отримують у процесі роботи сонячних батарей, можна використовувати у забезпеченні ресурсами населення або у виробництві. Наприклад, у такій сфері, як нафтовидобуток, деякі країни переходять на використання сонячних технологій: в Омані збираються використовувати третинний метод видобутку нафти в комплексі із сонячною енергетикою, сумарне підвищення ефективності родовища очікується 40-60% [8].

Але, мабуть, найперспективнішим можна вважати застосування сонячної енергії в сільському господарстві [9]. Сільськогосподарські об'єкти найчастіше віддалені від центральних енергетичних мереж, і підключення їх до цих мереж економічно не вигідно. Для забезпечення таких споживачів

застосовуються дизельні або газові установки та станції. Але даний спосіб забезпечення споживачів енергією має недоліки:

- 1) через неякісні сільські дороги споживачі мають перебої з поставкою палива для генераторів;
- 2) шум від цих джерел енергії негативно впливає на тварин і птахів, що використовуються в сільському господарстві;
- 3) під час доставки та використання палива можливий його розлив, який негативно впливає на ґрунт та водойми;
- 4) при використанні генераторів необхідно постійне обслуговування та ремонт, який не завжди можна здійснити.

Саме тому альтернативою для віддалених господарств може бути сонячна енергія. Застосування ФЕП найбільш вигідно для віддалених та важкодоступних поселень, приєднання яких до центральних мереж важко. Електроенергія, одержана таким чином, може застосовуватися як для життєзабезпечення людей, які проживають у даній місцевості, так і для безпосереднього використання у сільському господарстві. Наприклад, фотоелектрика може застосовуватися: для внутрішнього та зовнішнього освітлення, відкриття та закриття воріт, зрошення, опріснення та очищення води, автоматичного включення годівниць та інших необхідних технологічних процесів [7, 8].

Фотоелектричні насоси є гарною заміною ручних та механічних насосів, що застосовуються для зрошення полів і запасання води в резервуарах, такі насоси добре застосовні для віддалених пасовищ, а також місць вигулу худоби. Надлишки води можуть застосовуватись у домашньому побуті або в системі опалення. Використання ФЕП у сільському господарстві є найбільш перспективним напрямом, адже отримана таким чином енергія є найбільш екологічною і має найменші фінансові показники за поточними витратами, що зменшить собівартість сільськогосподарської продукції [9, 10].

Нині стали досить широко використовуватися фотоелектричні перетворювачі. Спостерігається збільшення потужності наземних елементів

від 1 Вт до сотень кіловат, а космічних – до 10 кВт та більше. У наші дні реалізуються проєкти використання сонячних елементів потужністю в сотні та навіть тисячі кіловат, також намітилася тенденція збільшення ККД сонячних батарей при зменшенні їх вартості.

1.2. Особливості роботи вітрових електростанцій

Вітрові електричні станції (ВЕС) є однією з ключових технологій для отримання відновлюваної енергії. Їх застосування має як значні переваги, так і певні недоліки, які варто враховувати при їх проєктуванні, будівництві та експлуатації.

Переваги вітрових електричних станцій:

1. Екологічність: відсутність викидів вуглекислого газу та інших парникових газів під час роботи; відсутність забруднення води та ґрунту; зменшення залежності від викопного палива.

2. Відновлюваність ресурсу: вітер є нескінченним джерелом енергії, доступним у багатьох регіонах світу.

3. Економія ресурсів: зменшення витрат на експлуатацію та обслуговування після встановлення; можливість локального виробництва енергії, що зменшує витрати на передачу електроенергії.

4. Швидкість впровадження: порівняно швидкий процес будівництва вітрових станцій.

5. Розвиток регіонів: створення робочих місць на етапах будівництва, обслуговування та управління станціями; підвищення енергетичної незалежності регіонів.

6. Сумісність з іншими видами генерації: легке інтегрування з іншими джерелами відновлюваної енергії, такими як сонячні електростанції.

Недоліки вітрових електричних станцій:

1. Нестабільність генерації: залежність від погодних умов, що ускладнює прогнозування виробництва енергії; необхідність додаткових резервних потужностей або систем накопичення енергії для балансування.

2. Висока початкова вартість: значні витрати на будівництво, проєктування та встановлення.

3. Вплив на екосистему: можливий негативний вплив на птахів і кажанів через рухомі лопаті турбін; зміна природного ландшафту, що може викликати опір місцевого населення.

4. Шум і візуальний вплив: генерація шуму турбінами під час роботи, що може створювати незручності для людей, які проживають поруч; порушення естетичного вигляду ландшафту.

5. Обмеження розташування: необхідність встановлення вітрових станцій у місцях із достатньою силою вітру, що може бути далеко від центрів споживання енергії.

6. Проблеми з утилізацією: лопаті турбін часто виготовляються з матеріалів, які складно утилізувати або переробити, що створює проблему з відходами після завершення терміну служби.

7. Вплив на енергосистему: необхідність модернізації інфраструктури для прийому електроенергії від ВЕС через їхню розподіленість і змінність.

На рис.1.5 приведена карта, яка демонструє розподіл швидкостей вітру на території України. Вона ілюструє потенціал використання вітрової енергії у різних регіонах країни.

Експлуатація вітрових електричних станцій (ВЕС) має такі особливості: постійний контроль за роботою турбін і вітрових умов; використання автоматизованих систем для оптимізації роботи; регулярне технічне обслуговування для запобігання зносу компонентів (лопатей, генераторів, трансмісій); наявність висококваліфікованого персоналу для ремонту; необхідність прогнозування вітру для планування генерації; зупинка турбін при надмірно сильному вітру для безпеки; узгодження змінної генерації з енергосистемою; використання систем зберігання енергії для стабільності; мінімізація шуму, впливу на флору і фауну.

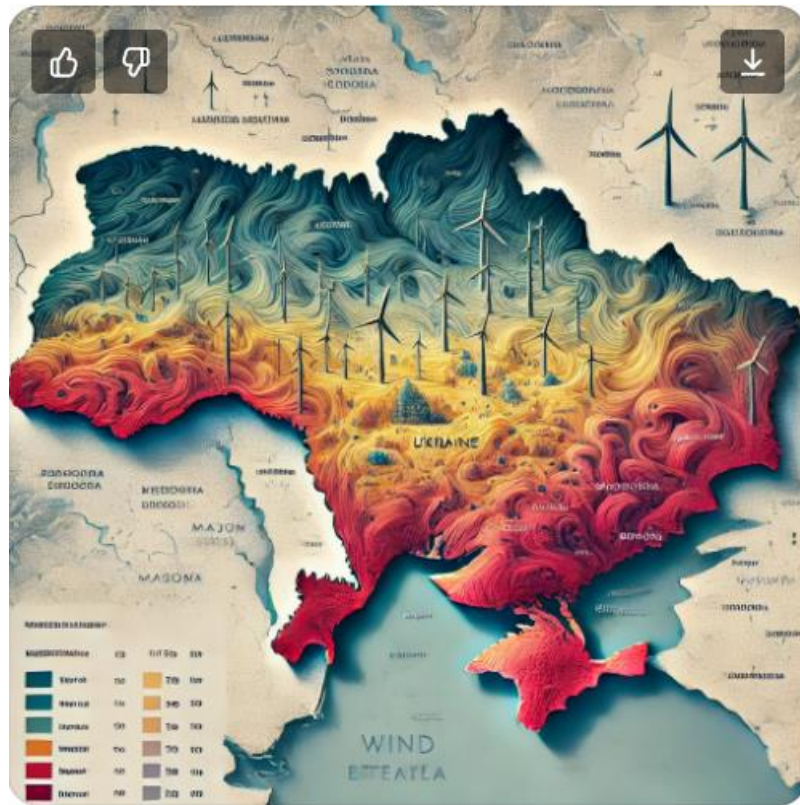


Рисунок 1 5 – Карта розподілу швидкості вітру на території України

Загалом ефективна експлуатація ВЕС вимагає балансу між технологічними, екологічними та соціальними аспектами, вона є ефективним і екологічним способом генерації енергії, особливо в умовах переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте для максимального використання їхніх переваг необхідно враховувати їхню специфіку, впроваджувати технології накопичення енергії, оптимізувати місця розташування та забезпечувати гармонійне поєднання з іншими елементами енергосистеми.

1.2.1. Підвищення ефективності вітрових енергетичних установок

В даний час активно проводяться наукові та інженерні дослідження щодо вітроенергетичних установок (ВЕУ), їх конструкції та методів управління. Важливим завданням, яке доводиться вирішувати при цьому, є підвищення ефективності роботи ВЕУ, а також управління потужністю при високих швидкостях вітру.

Сьогодні для найпоширеніших типів вітрових турбін з горизонтальною віссю обертання вітроколеса існує два основних механізми обмеження потужності ВЕУ – звані pitch і stall методи. В останньому використовують лопаті спеціальної конструкції, для яких при перевищенні швидкості вітру відбувається зрив повітряного потоку, починаючи з краю лопаті. При цьому знижується створюваний крутний момент, що не дозволяє вітроколесу розігнатися до критичних швидкостей. Метод pitch регулювання, або метод зміни кута установки лопаті, в ранній літературі вважався надмірно складним для застосування [11], але зараз, з розвитком техніки, він став практично стандартним всім великим ВЕУ. Більше того, здійснено перехід до більш складної системи регулювання кожної лопаті окремо [12], що дозволяє здійснювати покращений контроль управління потужності та підвищити ефективність генерації енергії. Зазвичай ВЕУ великої потужності (більше 3 МВт) використовують вітроколесо з горизонтальним розташуванням осі та малим числом лопатей аеродинамічного профілю.

Головною особливістю ВЕУ великої потужності є значний діаметр та мала швидкість обертання ротора. При цьому постає питання про те, чи можна при розрахунку характеристик використовувати припущення про рівномірний потік вітру через переріз ротора. Для малих турбін це наближення працювало, оскільки опосередкування проводилося за малою площею та за малий час одного обороту. Для великих ВЕУ вже неможливо вважати, що вітровий потік буде постійним через весь переріз ротора протягом одного часу обороту. Оскільки вітровий потік буде непостійним, то досягти оптимального кута установки лопаті для підвищення ефективності перетворення енергії вітру в існуючих системах неможливо.

Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати лопать, поділену на кілька сегментів (рис.1.6).

Кожен сегмент може змінювати свій кут установки незалежно від інших. Інформація про аеродинамічні умови визначається виходячи з сигналів від датчиків тиску, які масивом розташовані на кожному сегменті лопаті.

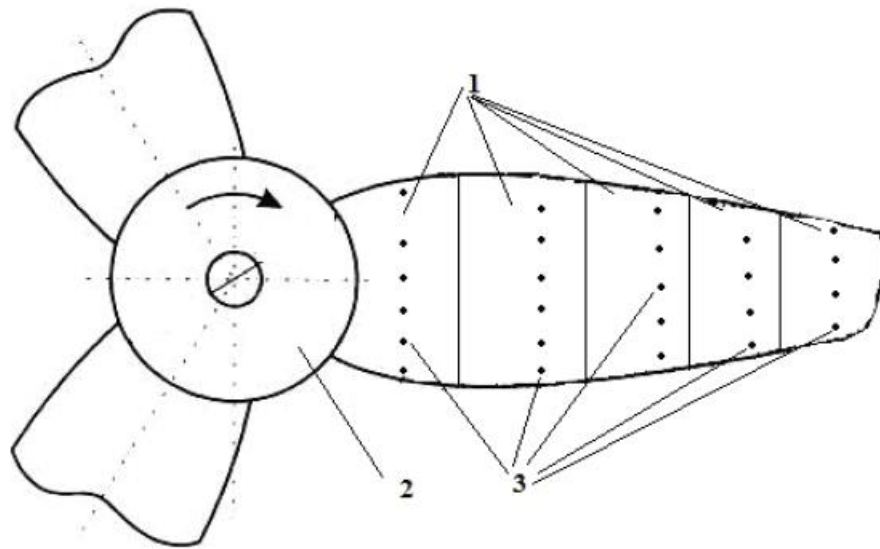


Рисунок 1.6 - Конструкція лопаті: 1 – сегмент лопаті; 2 – ступиця; 3 – датчики тиску

За такої архітектури системи можливий контроль кута атаки сегмента лопаті в режимі реального часу та підтримання його оптимальним шляхом управління кутом установки при зміні характеристик вітрового потоку протягом усієї траєкторії руху розглянутого сегмента.

Ефективність роботи ВЕУ при цьому може бути підвищена на величину, що дорівнює обсягу енергетичних втрат, що відбуваються за причиною неоптимального розташування лопаті у нерівномірному вітровому потоці. Для того, щоб оцінити ці величини, розглянемо аеродинамічні сили, що виникають на лопаті ВЕУ. На (рис.1.7) показаний профіль лопаті, на яку впливає справжній вітер зі швидкістю V_a і вітер V_{rot} , що здається, обумовлений обертанням лопаті. Складаючись, ці швидкості утворюють вимпельний вітер V_{rel} , спрямований під кутом φ до площини обертання вітроколеса. Кут атаки, який вимірюється між V_{rel} і хордою лопаті, дорівнює α , а кут установки лопаті щодо площині обертання становить θ . Саме під дією вимпельного вітру виходить утворення аеродинамічних сил на профілі, які зрештою змушують рухатися лопать.

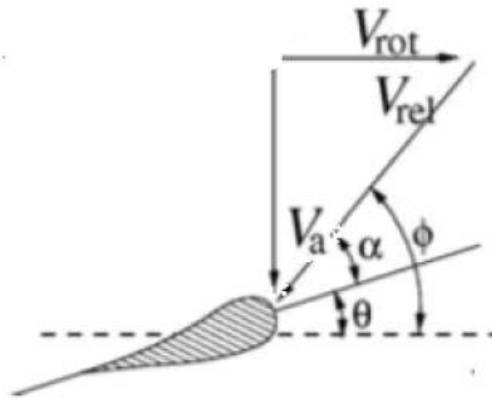


Рисунок 1.7 - Схема складання швидкостей вітру

Чим більша підйомна сила і менше опір, тим краще, а значення аеродинамічної якості більше. Воно залежить від кута атаки, має своє максимальне значення при оптимальному куті та знижується при його зміні як у велику, так і в меншу сторону.

Оскільки вітроколесо потужної турбіни має велику масу і момент інерції, то перехідні процеси, пов'язані зі зміною швидкості обертання відбуваються повільно. Тобто, може виникати ситуація, коли справжній вітер змінив свою швидкість, а вітроколесо ще не встигло відреагувати на ці зміни. Як можна помітити, незначна зміна частоти обертання призводить до великих варіацій кута ϕ , при цьому втрати енергії можуть досягати 8-9% для кінців лопаті, та 20–25% для середньої частини. При цьому якщо швидкість вітру, змінюється постійно, то фактично близько 40% часу вітроколесо буде мати швидкість обертання, яка відрізняється від оптимальної, що значно знижує ККД вітрогенератора.

Таким чином, ефективність перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію за допомогою ВЕУ істотно залежить від аеродинамічних параметрів вітроколеса. Кут атаки варіюється в значних межах через такі фактори: зміна швидкості вітру за перетином вітроколеса, у тому числі і з висотою, зміна швидкості вітру в часі за швидкістю та за напрямом, зміна частоти обертання вітроколеса. В реальних умовах експлуатації вплив цих факторів призводить до зниження ефективності роботи ВЕУ на 10-15%.

Модифікація схеми управління, а також застосування запропонованої конструкції лопаті призведе до усунення втрат енергії на ВЕУ і, як наслідок, до підвищення її ефективності та потужності.

1.3. Гібридні вітро-сонячні енергетичні установки

Для вирішення проблем глобальних, таких як боротьба зі зміною клімату, насамперед необхідно розширювати використання найдешевших, максимально екологічно чистих джерел енергії, та які мають найбільші запаси відновлюваних енергоресурсів. За цими критеріям у відновлюваній енергетиці вже давно сформувалися лідери – вітрова та сонячна енергетика [12].

Об'єктивно використання ВДЕ суттєво стримується недоліками, властивими кожному з них. Основним недоліком абсолютної більшості ВДЕ слід визнати непостійність і часто погано передбачуваний характер потужності, що видається. Даний недолік доводиться долати дуже витратними заходами акумулювання енергії або резервування енергетичними установками традиційної генерації. Властивий він і вітроенергетичним установкам (ВЕУ), робота яких залежить від швидкості вітру. Для фотоенергетичних установок (ФЕУ) характерна залежність потужності від інтенсивності сонячного випромінювання (функція часу доби, пори року, погодних умов) та температури. На щастя, зазначені фактори непостійності характеристик ВЕУ та ФЕУ, як правило, мають слабку кореляцію, що дозволяє значною мірою зменшити їх вплив у комбінованих (гібридних) вітро-сонячних установках.

Генерація на основі ВДЕ дійсно має змінний характер, що залежить від низки зовнішніх умов, унаслідок чого пропозиція електроенергії від ВДЕ нестабільна, важко прогнозована та не коригується під коливання попиту.

В даний час це дійсність, під яку доводиться підлаштовуватись у процесі впровадження енергоустановок, які використовують ВДЕ. На рис.1.8 наведена гістограма добового енерговироблення ФЕУ у м. Київ встановленою потужністю 100 кВт та ВЕУ USW-56-100 вітроелектростанції у жовтні 2018 р.

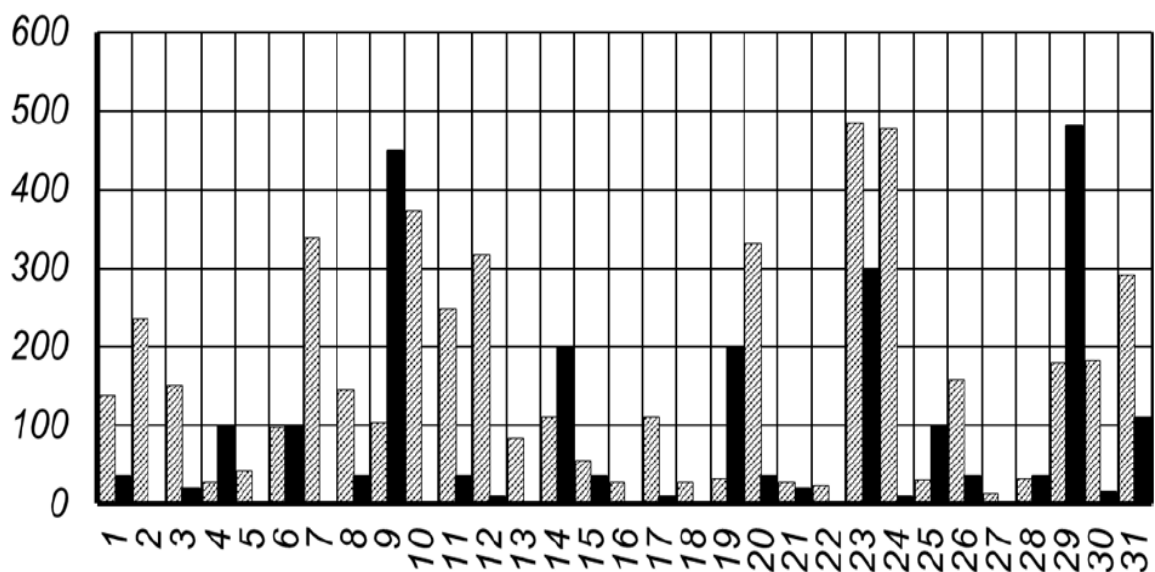


Рисунок 1.8 - Добове енерговироблення ФЕУ встановленою потужністю 100 кВт та БЕУ встановленою потужністю 100 кВт

Однак негативні наслідки від природно нестабільного характеру вироблення на абсолютній більшості видів установок з ВДЕ можуть бути виключені або принаймні зменшені кількома шляхами.

По-перше, вплив нестабільності вироблення таких установок знижується шляхом їх підключення до розгалужених магістральних електричних мереж, що тягнуться на багато сотень і тисяч км. У цьому випадку, наприклад, падіння вироблення через слабкий вітер на БЕУ, розташованих в одному районі, компенсується виробленням енергії на БЕУ у іншому районі, де послаблення вітру немає. Однак при цьому потрібне деяке резервування потужності енергоустановок, зростають витрати на підтримку мережевої інфраструктури та виникають неминучі втрати у мережах. Частково допомогти тут можуть технології Smart Grid, розвиток яких багато в чому був ініційований збільшенням частки розподіленої та відновлюваної генерації.

По-друге, широко використовується компенсація зменшеного вироблення з ВДЕ за рахунок включення до тієї ж мережі резервної потужності традиційної генерації, наприклад, теплової. Однак цим

обмежуються можливості для значного збільшення частки ВДЕ в енергобалансі з метою боротьби зі зміною клімату. Якщо енергоустановка з ВДЕ працює автономно, наприклад, у віддаленому від магістральних електромережі районі, то вона також найчастіше резервується традиційною генерацією, як правило, дизель-генератором. Однак дуже висока вартість самого дизель-генератора, його експлуатації та обслуговування погіршує економічні показники такої гібридної енергоустановки.

По-третє, застосовується включення до енергосистеми або автономної енергоустановки з ВДЕ накопичувачів енергії різних видів з відповідним обладнанням для заряду та розряду. Місткість накопичувачів і потужність навантаження тут повинні відповідати очікуваній тривалості перерв у роботі основного генератора на ВДЕ та його потужності відповідно. Недоліком цього рішення є дуже висока вартість встановленої потужності накопичувача та обладнання перетворення енергії. Наприклад, вартість такого обладнання для ФЕУ, встановленою потужністю до 10 кВт, становить 50-75% вартості всієї установки [13]. Крім того, у більшості типів накопичувачів енергії дуже обмежений ресурс роботи, наприклад, кількість циклів заряд/розряд, досить жорсткі вимоги щодо режимів заряду, спостерігається ефект пам'яті, що знижує ємність накопичувача, використовуються рідкісні та дуже часто токсичні матеріали.

Витрати на акумулювання можна значно зменшити за рахунок раціонального комбінування поновлюваних джерел різної фізичної природи. Такий підхід можна розглядати як четвертий, найбільш раціональний та «чистий» шлях вирішення проблеми нестабільності виробітку. При цьому створюються гібридні установки, у яких недоліки одного з перетворювачів відновлюваної енергії частково компенсуються роботою перетворювача (перетворювачів) енергії іншого типу з видачею енергії всіх перетворювачів у мережу в одній точці.

Нечисленними прикладами тут є вітро-сонячні установки, що дозволяють у світлий час доби компенсувати вироблення електроенергії за

відсутності вітру [9-11] і навпаки, термофотоелектричні геліоустановки [12], що дозволяють отримувати теплову та електричну енергію з однієї робочої поверхні (абсорбера), сонячно-геотермальні системи теплопостачання тощо.

Вирішити цю проблему дозволяє використання комбінованих гібридних установок, конструкція однієї з яких показана на рис.1.9. В основі даної установки використовується комбінована вертикально-осьова ВЕУ з співвісно розташованими роторами Савоніуса та Дар'ї, причому ротор Савоніуса розташовується всередині ротора Дар'ї, та на всій поверхні його скручених лопатей з двох сторін закріплені фотоелектричні перетворювачі. Електрична енергія від електричного генератора ВЕУ та фотоелектричних перетворювачів надходить у накопичувач електричної енергії через контролер та індукційний струмо передавальний вузол. Від накопичувача електрична енергія розподіляється споживачу.

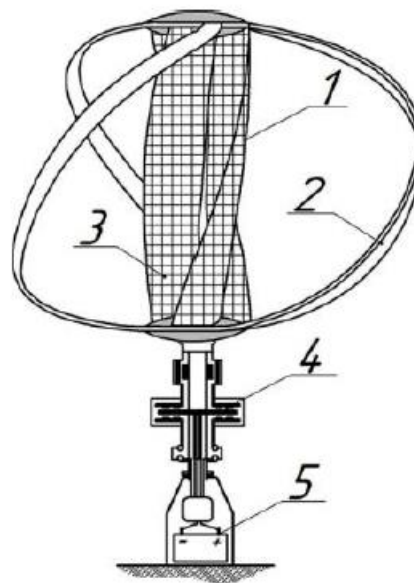


Рисунок 1.9 - Гібридна вітро-сонячна установка з вертикальною віссю обертання:

1 – ротор Савоніуса, 2 – ротор Дар'ї, 3 – фотоелектричні перетворювачі, 4 – індукційний струмопередавальний вузол, 5 – накопичувач електричної енергії

Основною перевагою даної гібридної установки є здатність виробляти електроенергію при малих швидкостях вітру за рахунок конструкційних особливостей та комплексного використання енергії вітру та сонця. Однак така здатність потребує суттєвого ускладнення конструкції та матеріаломісткості, а також зменшує надійність. Враховуючи те, що потужність вітрового потоку залежить від швидкості вітру в кубі, використання даної ВЕУ не дозволить суттєво збільшити енерговироблення в порівнянні з класичними конструкціями, суттєво поступаючись останнім у вартості та надійності. Також недоліком цього рішення є низька ефективність роботи. Причиною цього є нерівномірна освітленість, що безперервно змінюється, фотоелектричних перетворювачів, викликана обертанням лопатей ротора та поворотної платформи, а також використанням способу їх освітлення за допомогою оптичних концентраторів. Таке нерівномірне освітлення практично не дозволяє використовувати послідовну та змішану комутацію фотоелектричних перетворювачів. Це пов'язано з тим, що в модулі, що складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних перетворювачів, струм обмежується струмом найменш освітленого перетворювача, а у разі відключення затіненого перетворювача шунтуючим діодом, знижується вихідна напруга модуля, що не дозволяє йому передавати енергію споживачеві при паралельному з'єднанні з модулями.

В останні роки розробляється проєкт нового типу ВЕУ підвищеної потужності – вітроенергетичних морських установок (ВЕМУ) [13-15]. ВЕМУ відрізняються наявністю великогабаритної турбіни з вертикальними лопатями, яка при повільному обертанні навколо вертикальної осі утримується на поверхні води, що обертається тороподібним понтоном (рис.1.10).



Рисунок 1.10 - турбіни ВЕМУ номінальною потужністю 10 МВт

Результати проведених аеродинамічних досліджень методами цифрового моделювання з повнорозмірними розрахунковими областями показують можливість отримання значень коефіцієнта використання енергії вітру згори вище 50% попри малу (менш 1) величину швидкохідності.

У розділі було розглянуто проблему нестабільності вироблення енергії з поновлюваних джерел та можливі шляхи її вирішення. Наведено переваги використання гібридних установок, що використовують від кількох відновлюваних джерел енергії, особливо, вітро-сонячних енергетичних установок.

В даний час ведеться робота над проєктами вітроустановок нового типу, у конструкції яких використання фотоелектричних перетворювачів є досить перспективним. Однією з них є вітроенергетична морська установка, що має у верхній частині конструкції кільцеву поверхню, придатну для розміщення фотоелектричних модулів.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 1:

Розглянуті переваги та недоліки, особливості роботи СФЕС, дозволять у перспективі розробляти їх структурно-схемні рішення з покращеними експлуатаційно-технічними характеристиками.

Реалізуються проєкти використання сонячних елементів потужністю в сотні та навіть тисячі кіловат, також намітилася тенденція збільшення ККД сонячних батарей при зменшенні їх вартості.

Ефективна експлуатація ВЕС вимагає балансу між технологічними, екологічними та соціальними аспектами, вона є ефективним і екологічним способом генерації енергії, особливо в умовах переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте для максимального використання їхніх переваг необхідно враховувати їхню специфіку, впроваджувати технології накопичення енергії, оптимізувати місця розташування та забезпечувати гармонійне поєднання з іншими елементами енергосистеми.

Ефективність перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію за допомогою ВЕУ істотно залежить від аеродинамічних параметрів вітроколеса. Кут атаки варіюється в значних межах через такі фактори: зміна швидкості вітру за перетином вітроколеса, у тому числі і з висотою, зміна швидкості вітру в часі за швидкістю та за напрямом, зміна частоти обертання вітроколеса. В реальних умовах експлуатації вплив цих факторів призводить до зниження ефективності роботи ВЕУ на 10-15%.

Було розглянуто проблему нестабільності вироблення енергії з поновлюваних джерел та можливі шляхи її вирішення. Наведено переваги використання гібридних установок, що використовують від кількох відновлюваних джерел енергії, особливо, вітро-сонячних енергетичних установок.

В даний час ведеться робота над проєктами вітроустановок нового типу: однією з них є вітроенергетична морська установка.

РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТИВНІСТЬ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

2.1. Конкурентоспроможність сонячних та вітрових електричних станцій

У розділі аналізуються конкурентоспроможність та умови для розвитку сонячних та вітрових електростанцій в Україні та суміжних країнах (рис.2.1). Очікується, що між ними будуть розвиватися міждержавні електричні зв'язки, які дадуть як економічний, так і екологічний ефект, у тому числі завдяки широкомасштабному впровадженню ВДЕ.



Рисунок 2.1 - Політична карта України та її сусідніх країн

Світовим лідером із розвитку ВДЕ є Китай. Станом на кінець 2018 р. у КНР зосереджено близько 30% сумарної потужності ВДЕ у світі, у тому числі 36% сонячної та 33% вітрової енергетики. У країнах Центральної Азії істотна

роль у виробництві електроенергії належить гідроенергетиці, і лише в Казахстані будуються сонячні та вітрові електростанції.

Згідно з аналізом Міжнародного енергетичного агентства, у 2019 р. встановлені потужності ВДЕ збільшилися на 200 ГВт, з яких 115 ГВт склали СЕС та понад 50 ГВт – ВЕС. Передбачається, що у період 2019-2025 років потужності ВДЕ збільшаться ще на 1200-1500 ГВт, тобто в 1,5-1,6 рази порівняно з 2018 [14]. Близько 40% світового приросту потужності ВДЕ доведеться на Китай, який ще більше зміцнить світове лідерство в області відновлюваної енергетики. Також швидко зростатимуть потужності ВЕС та особливо СЕС з фотоелектричним перетворенням енергії. У період до 2025 р. прогнозується приріст потужності фотоелектричних перетворювачів від 697 до 877 ГВт [15].

Необхідно оцінити конкурентоспроможність електростанцій різних типів та впливу на неї обмеження викидів діоксиду вуглецю, а також визначити оптимальну структуру вітро-сонячних електростанцій для різних поєднань економічних та кліматичних умов України та суміжних країн.

Для попередньої оцінки та порівняння економічної ефективності слід визначити питомі витрати на виробництво електроенергії (її вартість) для енергетичних джерел різних типів. Також необхідно врахувати вплив системних ефектів, що виникають внаслідок взаємодії енергетичних джерел між собою та з навколишнім середовищем, додаткових умов та обмежень.

Оптимальна структура системи електропостачання вибиралася з вирішення задачі математичного програмування: мінімізація витрат з урахуванням балансів первинної, вторинної та кінцевої енергії та низки додаткових умов та обмежень (на рівні електроспоживання, встановлені потужності енергоджерел, режими роботи акумуляторів та енергоджерел, дублюючих стохастичне вироблення ВДЕ тощо). Для розрахунків використовували математичну модель REM-2, в якій враховувалася зміна вироблення електроенергії сонячних та вітрових установок по годинах доби та сезонів року. Така система електропостачання представлена на рис.2.2.

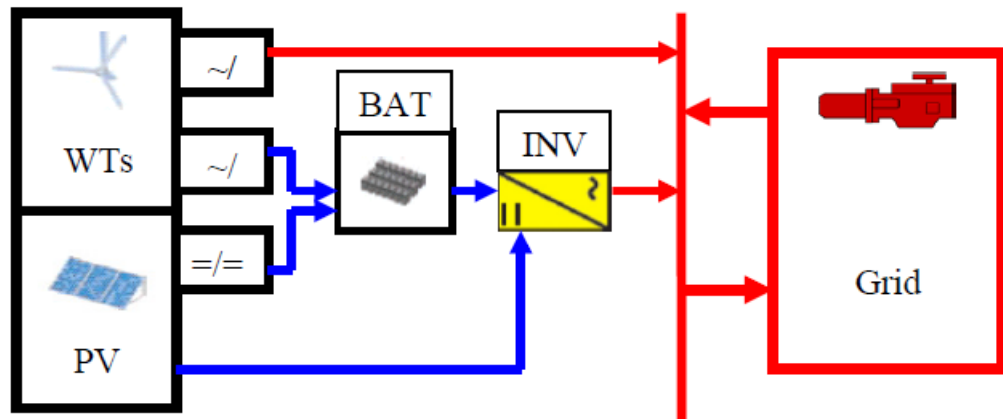


Рисунок 2.2 - Схема енергосистеми: WTs - БЕУ; PV - ФЕП; BAT – акумулятори; INV – інвертор; Grid – мережа, що дублює енергоджерела

Система складається з фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), вітроелектричних установок (БЕУ) з можливістю короткострокового акумулювання електроенергії. Система включає контролери заряду акумуляторних батарей (АБ), перетворювачі напруги, засоби сполучення з мережею (мережеві інвертори (CI)) і дублююче енергоджерело, умовно назване «Мережа». У разі недостатнього вироблення ВДЕ електроенергія надходить від зовнішнього джерела за заданою ціною. Надлишок електроенергії продається в мережу за тією ж ціною.

При порівнянні енергетичних технологій як критерій часто використовують вартість енергії. Вона дорівнює питомим витратам на виробництво енергії і водночас є її мінімальною ціною, за якої проект енергопостачання залишається ефективним. Вартість можна подати у вигляді суми додатків, що враховують витрати на будівництво та експлуатацію установки, витрати на паливо та плату за викиди шкідливих речовин [16].

Перша складова вартості електроенергії прямо пропорційна питомим капіталовкладенням k і обернено пропорційна коефіцієнту використання встановленої потужності CF (КВВП) і залежить від коефіцієнта повернення капіталу F , річної норми дисконту d , термінів будівництва ΔT і служби T , щорічних умовно постійних витрат μ , витрат енергії на власні потреби β .

Паливна складова прямо пропорційна ціні палива p і обернено пропорційна ККД η . Для обліку плати за викиди ціна палива замінюється на добуток коефіцієнта емісії α на ціну викидів діоксиду вуглецю p^* . Для визначення вартості електроенергії використовували таку формулу:

$$S = \left[F \frac{e^{\sigma \Delta T} - 1}{\sigma \Delta T} + \mu \right] \frac{k}{CFH(1-\beta)} + \frac{p}{8,15 \cdot 10^3 \eta} + \frac{\alpha p^*}{8,15 \cdot 10^3 \eta},$$

$$F = \sigma / (1 - e^{\sigma T}); \quad \sigma = \ln(1 + d);$$

H – кількість годин у році.

Економічна ефективність та конкурентоспроможність ФЕП та ВЕУ визначаються насамперед техніко-економічними показниками енергоустановок, ціною електроенергії дублюючого енергоджерела та коефіцієнтом використання встановленої потужності. Величина цього коефіцієнта для ФЕП залежить від приходу сонячної радіації на поверхню сонячної панелі, а для ВЕУ - від швидкості вітру на висоті осі ротора.

При оцінці вартості електроенергії розглядалися два варіанти:

- 1) несприятливий для відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та сприятливий для ТЕС на органічному паливі;
- 2) сприятливий для ВДЕ та несприятливий для ТЕС.

Варіанти відрізняються значеннями КВВП для ВДЕ відповідно до кліматичних факторів та інших техніко-економічних характеристик. У першому варіанті плата за викиди дорівнює нулю, у другому – 30 дол./т CO₂ в усіх країнах. Коефіцієнти емісії прийняті відповідно, норма дисконту дорівнює 5%.

Вартість електроенергії для теплових електростанцій (ТЕС) на органічному паливі (мінімальної для вугільних або газових ТЕС) та для відновлюваних джерел енергії в Україні та інших сусідніх країнах наведена на рис.2.3.

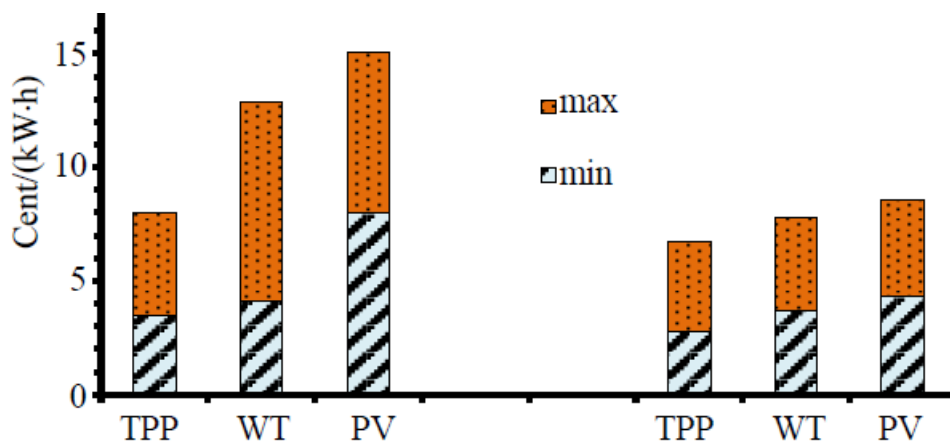


Рисунок 2.3 - Вартість електроенергії для енергоджерел різних типів в Україні та інших країнах: TPP – теплові електростанції; WT – вітроелектричні установки; PV – фотоелектричні перетворювачі

З рис.2.3 видно, що з урахуванням плати за викиди діоксиду вуглецю інтервали невизначеності вартості електроенергії теплових, вітрових та сонячних електростанцій перетинаються. Це свідчить про те, що за певних умов ВЕС та СЕС конкурентоспроможні з електростанціями на органічному паливі. Розрахунки вартості електроенергії дозволяють попередньо оцінити ефективність застосування ФЕП та ВЕУ. При роботі в системах автономного та централізованого електропостачання виникають системні ефекти, зумовлені спільною роботою ФЕП, ВЕУ та дублюючих джерел електричної енергії. Для їхнього обліку використовується математична модель.

У розділі систематизовано техніко-економічні показники електростанцій різних типів з урахуванням інтервалу їхньої невизначеності для країн Європи; проведено порівняння відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії за критерієм вартості вироблюваної електроенергії. Показано, що з урахуванням плати за викиди відновлювані джерела енергії можуть виявитися конкурентоспроможними на енергетичних ринках; за сприятливих умов сонячні та вітрові електростанції у ряді районів можуть виробляти дешеву електроенергію вартістю 3–5 цент/(кВт·год).

Моделювання режимів роботи фотоелектричних перетворювачів та вітроелектричних установок за часом для різних значень приходу сонячної

радіації та швидкості вітру дозволило визначити оптимальні співвідношення між встановленою потужністю та виробництвом електроенергії фотоелектричними перетворювачами та вітротурбінами.

2.2. Принципи побудови гібридних вітро-сонячних енергоустановок

Енергетики змушені вирішувати складні завдання управління електромеханічними перехідними процесами при перевантаженнях в енергосистемі та для забезпечення її динамічної стійкості, вдаватися до використання керованих джерел реактивної потужності – спеціальних навантажувальних опорів, статичних тиристорних компенсаторів, керованих реакторів. Зазначені технічні прийоми дозволяють запобігати в перших циклах взаємних коливань роторів випадіння з синхронізму окремих генераторів або їх взаємозалежних груп (підсистем), забезпечити згасання перехідного процесу і тим самим тимчасово, але (до наступної аварійної ситуації) стабілізувати режим електроенергетичної системи.

Для того, щоб вирішити це завдання до великої енергосистеми необхідно підключити ланцюжок локальних електростанцій невеликої потужності (порівняно з потужністю основних генеруючих центрів), які були б розташовані у безпосередній близькості до споживачів електроенергії і які при збоях у великій енергосистемі могли б протягом деякого часу забезпечити децентралізоване електропостачання об'єктів [117,18]. Як такі локальні електростанції слід використовувати фотоелектричні (ФЕУ) та вітроенергетичні установки (ВЕУ) та їх комбінації, стійка тенденція у розвитку яких спостерігається у промислово розвинених країнах Європи та в США.

Україна має значний потенціал сонячної енергії. Як впливає з Атласу енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії [1], загальний потенціал сонячного випромінювання для України еквівалентний $89,4 \cdot 10^9$ т умовного палива (у.п.) на рік, технічно досяжний потенціал становить $42,6 \cdot 10^7$ т у.п., а доцільно-економічний потенціал еквівалентний $5,99 \cdot 10^5$ т у. т.

Технічно досяжний потенціал вітрової енергії становить близько 30 млрд. кВт год. У таких регіонах України як Азово-Чорноморське узбережжя, Одеська, Херсонська, Ніколаївська, Запорізька області, та район Карпат, питомий технічно досяжний потенціал енергії вітру близький до доцільного відповідно до економічного потенціалу.

У зв'язку з цим при розробці ФЕУ та ВЕУ вимагається вирішити цілу низку завдань, основними з яких є: по-перше, стабільне знімання енергетичних потоків малої щільності від джерел сонячної та вітрової енергії в широкому діапазоні їх змін; по-друге, високоефективне перетворення отриманої енергії в електричну за заданими характеристиками електричних навантажень; по-третє, можливість підключення до існуючого енергогенеруючого обладнання традиційного типу.

Вирішення цих завдань слід здійснювати шляхом підвищення ефективності вітроагрегатів і сонячних енергоустановок, удосконалення тих установок, що вже є і створення нових типів електрогенераторів з обліком особливостей їх роботи у складі ВЕУ, а також – шляхом ефективного перетворення електроенергії постійного струму, одержуваної від ФЕУ, в електроенергію змінного струму.

Основним елементом ВЕУ є вітроколесо, що характеризується коефіцієнтом використання енергії вітру. Цей коефіцієнт визначається як відношення механічної потужності на валу вітроколеса P_M до потужності повітряного потоку P_B :

$$K_H = P_M \cdot P_B \quad , \quad (2.1)$$

Справедливе відношення:

$$P_B = \rho v^2 \cdot S / 2 \quad ,$$

де ρ – щільність повітря, кг/м³, v – швидкість вітру, м/с, S – площа поперечного перерізу вітроколеса, м². З цього співвідношення випливає, що потужність P_M на валу вітроколеса прямо пов'язана з кутовою швидкістю обертання вітроколеса.

$$\omega = Lv^2 \sqrt{\pi \rho v K_H / 2 P_M},$$

де $L = R_{\text{ВК}} \cdot \omega / v$ – коефіцієнт швидкохідності вітроколеса; $R_{\text{ВК}}$ – радіус вітроколеса, м, ω – кутова швидкість вітроколеса, рад/с.

При $L = 3 \div 5$ вітроколесо вважається швидкохідним, при менших значеннях – тихохідним. Максимальний коефіцієнт використання енергії вітра мають швидкохідні вітроколеса. З наведених на рис.2.4 залежностей частоти обертання вітроколеса різної потужності від швидкості вітру випливає, що навіть за малої потужності вітроколеса (менше 2 кВт) та великих швидкостях вітру ($v > 6 \text{ м/с}$) частота обертання валу n не перевищує 300 об/хв.

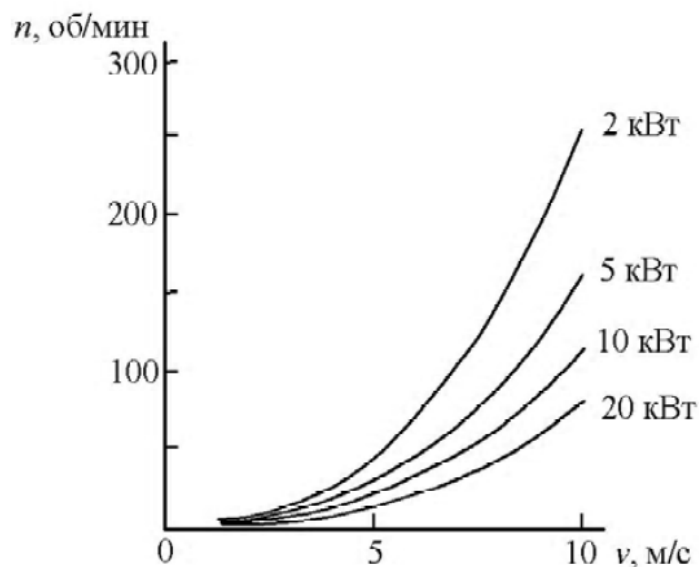


Рисунок 2.4 - Залежність частоти обертання вітроколеса від швидкості вітру

У відносно потужних вітроенергоустановках (100–200 кВт) частота обертання вітроколеса складає приблизно 40-50 об/хв. Можливості підвищення частоти обертання швидкохідних вітроколес обмежені аеродинамічними факторами.

При розробці гібридних вітро-сонячних електростанцій, що використовуються як у складі загальної енергосистеми, так і як джерела автономного енергопостачання, суттєвої технічної проблемою є встановлення балансу виробництва та споживання енергії залежно від технічних

Запропоновано концепцію синтезу ВЕУ, що містить у складі гібридної вітро-сонячної системи багатофункціональні модулі, які виконують суміщені функції: перетворення, накопичення та генерування енергії (у поєднанні з активним демпфуванням величини енергії, що надходить від вітроагрегату та батарей сонячних елементів у накопичувачі у разі зміни в широкому діапазоні значень енергії вітру та сонячної енергії), а також із зміни потреб у вихідній енергії у зв'язку зі зміною навантаження у мережі споживачів.

Система включає в себе наступні функціональні елементи: батарею сонячних елементів 1 з контролером 2, систему керування 3, трансформатор 4,

два генераторних модуля 5 і 9, зарядний пристрій 6, батарею акумуляторів 7, випрямляч 8 і вітроагрегат 10, механічно з'єднаний з генераторним модулем 9. У даній енергосистемі функцію енергоперетворення виконують генераторні модулі на основі буферного накопичувача кінетичної енергії нового типу, конструкція та принцип дії якого описані в [18].

Момент на валу вітроколеса зазвичай представляють у вигляді відносної величини. При цьому за базовий приймається момент, що розвивається вітроколесом без втрат:

$$M_B = \pi \rho (R_{BK})^3 \cdot v^2 / 2 ,$$

де ρ – густина повітря, кг/м³; R_{BK} - радіус вітроколеса, м; v – швидкість вітру, м/с.

Механічний момент ротора-маховика без урахування втрат енергії на тертя визначається з виразу:

$$M_{PM} = (\pi m R n)^2 ,$$

де R - маса і радіус ротора-маховика відповідно, n – число оборотів ротора-маховика.

При поєднанні валу вітроколеса і ротора-маховика, тобто при виконанні умови $M_B \approx M_{PM}$, вдається запобігти надмірному розгону вітроколеса при різких поривах вітру. Це дозволяє відповідно зменшити діапазон зміни швидкостей обертання вітроколеса при зміні швидкості вітру (у тому числі і при короткочасних спадах вітрового потоку) і домогтися відносної сталості потужності електроенергії на виході генераторного модуля. При цьому запасена в маховику кінетична енергія дає можливість демпфувати різкі зміни значення електричної енергії на виході генераторного модуля при зміні швидкості вітру у великому діапазоні.

За рахунок суміщення в одній конструкції генераторного модуля функцій приводного двигуна, генератора змінного струму та накопичувача кінетичної енергії максимально усуваються втрати енергії на її перетворення в механічну та електричну і назад. Це дозволяє підвищити ККД системи та її надійність,

дозволяє підвищити якість електроенергії в мережі споживачів за рахунок стабілізації частоти та амплітуди напруги і підвищення коефіцієнта синусоїдальності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Було систематизовано техніко-економічні показники електростанцій різних типів з урахуванням інтервалу їхньої невизначеності для країн Європи; проведено порівняння відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії за критерієм вартості вироблюваної електроенергії. Показано, що з урахуванням плати за викиди відновлювані джерела енергії можуть виявитися конкурентоспроможними на енергетичних ринках; за сприятливих умов сонячні та вітрові електростанції у ряді районів можуть виробляти дешеву електроенергію вартістю 3–5 цент/(кВт·год).

Моделювання режимів роботи фотоелектричних перетворювачів та вітроелектричних установок за часом для різних значень приходу сонячної радіації та швидкості вітру дозволило визначити оптимальні співвідношення між встановленою потужністю та виробництвом електроенергії фотоелектричними перетворювачами та вітротурбінами.

Об'єднання функцій приводного двигуна, генератора змінного струму та накопичувача кінетичної енергії в одній конструкції генераторного модуля дозволяє мінімізувати втрати, пов'язані з перетворенням енергії між механічною та електричною формами. Такий підхід не лише підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи та її надійність, але й сприяє покращенню якості електроенергії в мережі споживачів. Зокрема, це забезпечує стабілізацію частоти і амплітуди напруги, а також підвищення коефіцієнта синусоїдальності, що є важливим для забезпечення стабільної роботи електрообладнання.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

3.1. Особливості вибору оптимального складу вітро-сонячної електростанції з дизельними генераторами

В даний час відома велика кількість методів визначення оптимального складу гібридних комплексів [19]: класичні (ітераційні, аналітичні, графічні, лінійні), сучасні (штучні та гібридні), комп'ютерні (генетичні алгоритми). Частина з них передбачає широке використання усереднених статистичних даних про рівень інсоляції, швидкість вітру, добовий графік навантаження.

Деякі методи, наприклад комп'ютерні, дозволяють збільшити деталізацію розрахунків. Вони передбачають використання ретроспективних даних про інсоляцію та швидкість вітру через малі проміжки часу (аж до кожної години року), а також набір усереднених добових графіків навантаження [18]. Техніко-економічні параметри розраховуються для кожного проміжку часу протягом усього періоду експлуатації гібридної електростанції. До недоліків такого підходу можна віднести необхідність наявності великої деталізованої бази метеорологічних даних за попередні роки, а до переваг – можливість моделювання роботи комплексу на будь-якому етапі експлуатації, що дає змогу оптимізувати режими його роботи. Відмову від використання великої кількості середніх значень можна оцінювати по-різному: з одного боку, з'являється відхилення від статистично вивіреного типового опису метеоумов, з іншого – можуть бути враховані зміни клімату та загалом знижена ймовірність використання застарілої та неактуальної статистичної інформації.

Більшість класичних методів використовують одноцільову оптимізацію, у той час, як сучасніші методи дозволяють визначити оптимальний склад комплексу з урахуванням кількох критеріїв. Як правило, головним критерієм вибирається собівартість електроенергії, проте оптимізація може вестись і з урахуванням інших критеріїв – вартості життєвого циклу, суми капітальних

витрат, емісії CO₂, ймовірності втрати джерела живлення, кількості непридатної енергії (енергії дамба) тощо.

Визначення оптимального складу гібридного комплексу ВСЕС відповідно до обраних умов є необхідною умовою ефективності його роботи. Однією з найпоширеніших критеріїв оптимізації є собівартість виробленої комплексом електроенергії, так як цей параметр враховує як капітальні, так і експлуатаційні витрати (тобто вартість життєвого циклу). Разом з тим, у реальній практиці потрібен облік додаткових критеріїв: встановлюється верхня межа капітальних витрат або інших економічних критеріїв (наприклад, нижня межа окупності інвестицій).

В ході аналізу результатів однокритеріальної оптимізації складу гібридного комплексу було проаналізовано вплив критерію обмеження капітальних витрат на результат вирішення завдання. Показано, що співвідношення між частками ВЕС і СЕС, розраховане методом однокритеріальної оптимізації, дорівнює 6,4/1, який завжди змінюється залежно від рівня наявних інвестицій.

Інтегрована енергетична система з гібридними станціями відкриває нові можливості для ефективного управління енергетичними ресурсами та підвищення стійкості мережі. Гібридні станції, що поєднують кілька джерел енергії (наприклад, сонячну, вітрову генерацію та акумуляторні системи зберігання енергії), дозволяють гнучко адаптувати виробництво та споживання електроенергії до змінних умов.

До основних можливостей управління можна віднести: гнучкість у балансуванні попиту та пропозиції, тобто, гібридні станції можуть швидко реагувати на зміну попиту, використовуючи енергію з накопичувачів у періоди пікового навантаження або обмежуючи генерацію у разі надлишку. Оптимізація використання ресурсів має на увазі комбінацію джерел енергії, яка дозволяє підвищити ефективність системи. Наприклад, у денний час може використовуватися сонячна енергія, а вітрова — вночі, що забезпечує стабільне енергопостачання.

Зменшення втрат у мережі йде завдяки розподіленій генерації, гібридні станції можуть розташовуватися ближче до споживачів, що знижує навантаження на магістральні лінії електропередачі та зменшує технічні втрати, а підтримка стабільності мережі - накопичувачі енергії у складі гібридних станцій забезпечують резервну потужність і можуть використовуватися для регулювання частоти та напруги в мережі.

Інтеграція з цифровими системами управління здійснюється за рахунок використання сучасних програмних рішень та технологій Інтернету, дозволяє здійснювати прогнозування виробництва та споживання, а також автоматизацію процесів управління.

Виклики та перспективи такі: хоча гібридні станції забезпечують значний потенціал для модернізації енергосистеми, для їх ефективного впровадження необхідно врахувати такі аспекти:

- розвиток інфраструктури накопичувачів;
- інтеграцію з системами управління попитом споживачів;
- удосконалення регуляторної бази для стимулювання розподіленої генерації.

Впровадження гібридних станцій у складі інтегрованих енергетичних систем сприятиме підвищенню їх ефективності, надійності та екологічності, водночас створюючи умови для енергетичного переходу до стійкого майбутнього. На рис.3.1 наведений ілюстративний матеріал, що демонструє гібридну енергетичну станцію, інтегровану в сучасну енергетичну систему. На ній відображено сонячні панелі, вітряні турбіни, накопичувачі енергії та їх зв'язок із навколишніми будівлями й міськими об'єктами. Це дозволяє краще зрозуміти принципи роботи та розподілу енергії в таких системах.



Рисунок 3.1 - Гібридна електрична станція, інтегрована в сучасну енергетичну систему

3.2. Автономні системи електропостачання з відновленими джерелами енергії та розумною мережею

В останні роки у вітчизняній електроенергетиці відбулися зміни, що змушують переглядати вимоги як до інфраструктури, так і до об'єктів електроенергетики. Серед інших частіше вказується на знос, що збільшується, основних коштів, що вимагає залучення нових інвестицій на заміщення потужності, що вибуває, і будівництво нових. При цьому без зміни існуючої структури потужності та практики їх використання нові інвестиції неминуче призведуть до зростання ціни на енергію для споживачів. Сучасні технології та пристрої, такі як мікрогенерація, автономні джерела та накопичувачі енергії, засоби регулювання навантаження, оперативне інтелектуальне управління та ін., формують нові моделі поведінки споживачів та вимоги до

доступності, надійності та якості електричної енергії.

Актуальність забезпечення дедалі більшого попиту на якісну електроенергію та зниження навантаження на навколишнє середовище призвели до необхідності створення нової інфраструктури на засадах інтеграції до мережі розподіленої генерації, накопичувачів, мікромереж, створення віртуальних електричних станцій для зниження піку резерву потужності у системі. Робляться спроби використання розумної мережі у системі електропостачання споживачів. В даний час заходи щодо підтримки відповідності пропозиції зростання попиту на енергію можуть бути не лише витратними, а й неефективними при тривалій експлуатації. Тому мета розумної мережі - це не тільки відповідність пропозиції попиту, а й навпаки, приведення у відповідність попиту існуючій пропозиції з використанням сучасних технологій та зацікавленості споживачів через оптимальне ціноутворення.

Для забезпечення підвищеного попиту на електроенергію енергопостачальні компанії відстежують його та задіяють потужність додаткових ресурсів, наприклад, пікових електростанцій. При цьому залучення додаткових ресурсів генерації енергії вимагає великих капітальних вкладень та оперативного розширення частини компаній. Якщо для виробництва енергії застосовують традиційні джерела, то вони ще можуть несприятливо впливати на довкілля.

Частка цих джерел може бути скорочена шляхом вирівнювання графіка споживання електричної енергії. Теоретично домогтися усереднення попиту можна за рахунок мотивації приватних споживачів регулювати попит на електроенергію з подальшим їх заохоченням. У цьому полягає ключова ідея підтримки розумної мережі: стимулювати споживачів, знижувати або збільшувати енергоспоживання відповідно до пропозиції у той чи інший час доби. Реалізація цієї ідеї можлива шляхом розробки системи ціноутворення, а також доступності енергії від власних вітрових чи сонячних електростанцій. Це не тільки покращить оперативну ефективність енергопостачальних

компаній, але також допоможе уникнути капітального інвестування для генерування додаткової енергії, знизити залежність від вуглеводневого палива, що в результаті призведе до скорочення негативного впливу на довкілля [20].

Мережа, що застосовується в даний час, складається з наступних головних елементів: генераційної системи, системи розподілу електроенергії (шини розподільчих підстанцій), системи передачі (повітряні та кабельні лінії) та споживачів. Генераційна система може складатися із сукупності різних джерел.

Інтелектуальна мережа дає різноманітні можливості кожному споживачеві через оптимальне керування електроживленням врівноважити енергію в системі, пов'язаній з власними джерелами енергії, навантаженням (споживанням) та зберіганням з використанням енергоємних батарей.

На рис.3.2 показана модель системи з локальними джерелами та споживачами, об'єднаними через мікромережу. У такій системі відомості про рівень споживання енергії окремими навантаженнями та про вироблення електроенергії розподіленими генераторами (РГ) передаються в керуючий центр, що здійснює оптимальне регулювання та розподіл потужності між споживачами.

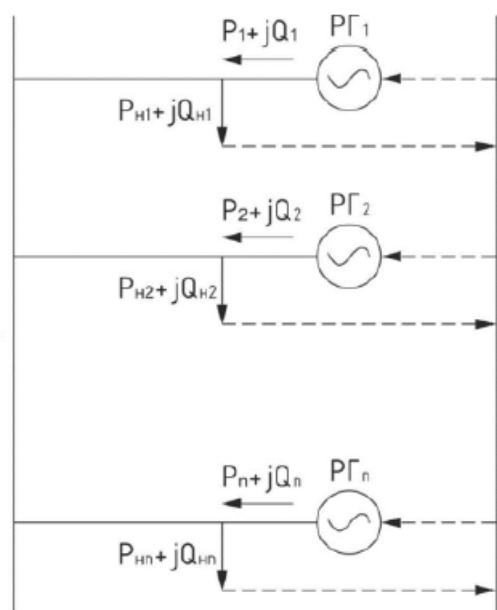


Рисунок 3.2 - Модель системи з локальними джерелами та споживачами

Система генерації для живлення споживачів має кілька альтернативних джерел. Найчастіше це вітроенергетична установка (ВЕУ), сонячні батареї (СБ), а також дизель-або бензогенераторна установка.

При надлишку потужності, що виробляється, зазначені джерела забезпечують живленням баластне навантаження, а також заряджання акумуляторних батарей (АБ). При відсутності вітру та сонця в роботу будуть введені акумуляторні батареї, щоб працювати на повне навантаження. Складність полягає в тому, що при використанні поновлюваних джерел енергії вироблення ними електроенергії носить випадковий характер, що залежить від кліматичних факторів, погодних умов у цій місцевості, пори року, доби. Індивідуальні споживачі також мають нерівномірний добовий графік споживання. Можливість рознести у часі виробництво та споживання електроенергії шляхом її накопичення у великих масштабах - один з найбільш ефективних шляхів вирішення проблеми покриття піків споживання. У зв'язку з цим потрібна наявність ємних накопичувачів енергії та засобів контролю за виробленою та споживаною потужністю.

Наприклад на рис.3.3–3.5 [3] представлені графіки енергії ВЕУ, що виробляється, сонячною батареєю та графік споживання електроенергії навантаженням. Для узгодження режимів роботи елементів мікромережі необхідно розробити математичну модель.

Генерація електроенергії від сонячних батарей змодельована як джерело енергії, чий вихід може контролюватись. Під час розрахунку можуть бути використані значення сонячної радіації, виміряної на найближчій метеостанції. Графіки, що характеризують надходження сонячної енергії протягом трьох днів показано на рис.3.3.

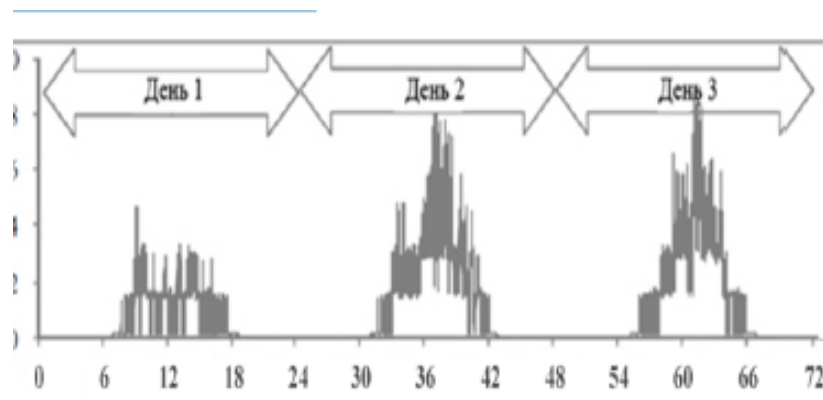


Рисунок 3.3 - Надходження сонячної енергії

Вироблення енергії вітроустановками протягом трьох днів показано на рис.3.4. Графік побудований на підставі вимірювань швидкості вітру, які відповідають даній місцевості. Вихід енергії вітру регулюється зміною кута атаки щодо лопатей вітряка. Також передбачається, що співвідношення між кутом атаки, швидкістю вітру та виходом енергії вітрогенератора відомі.

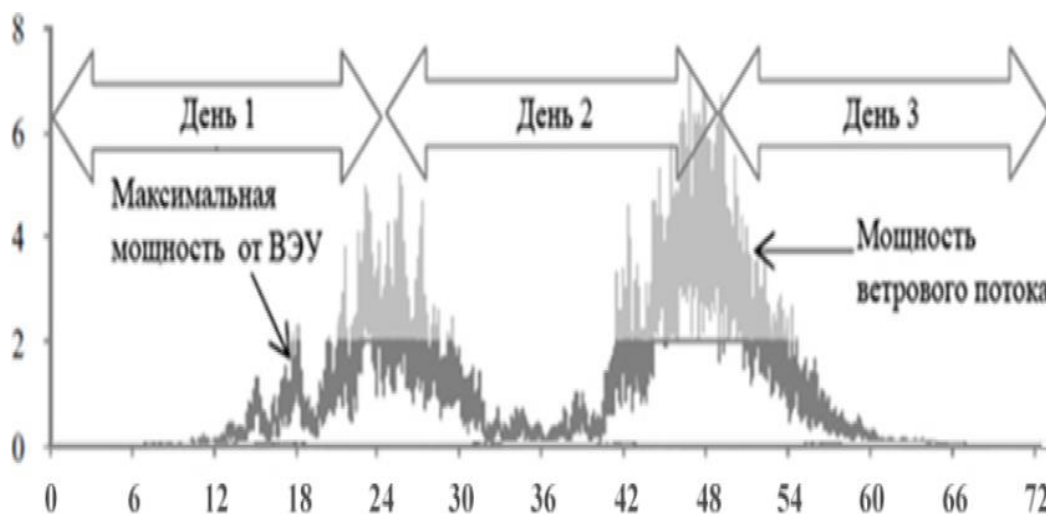


Рисунок 3.4 - Графік вироблення енергії вітроустановкою

Різноманітність неконтрольованих навантажень за три дні показано на рис.3. 5. Вибраний для вивчення графік відповідає навантаженню споживачів для трьох довільних днів. Передбачається також, що в навантаження включено заряджання акумуляторів [21].

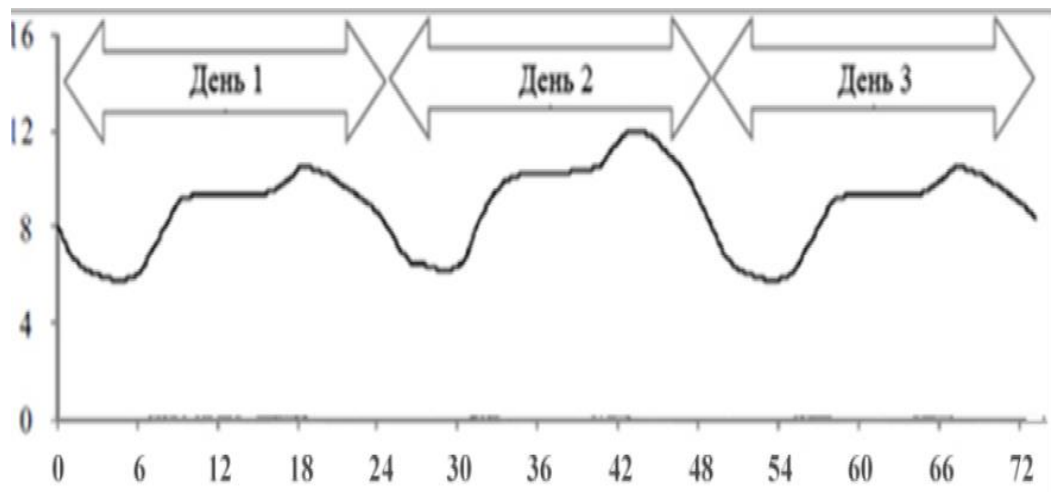


Рисунок 3.5 - Графік споживання навантаження

Для вирішення задачі оптимального управління вводяться характерні параметри, які слід контролювати у процесі роботи (X_i). З точки зору інформативності для визначення стану автономної мережі використовують такі параметри: P_{BEU} – потужність, що виробляється БЕУ; P_H – потужність навантаження автономної мережі; U_B – напруга на АБ; Q_B – величина заряду батарей; P_{CB} – потужність, що виробляється сонячними панелями. Ці параметри є змінними вхідними для моделі системи.

Крім того, необхідно врахувати впливи Z_i , що збурюють, які не піддаються контролю, отже є випадковими або такими, що змінюються в часі (швидкість вітру, інсоляція, температура повітря та ін.). Наявність таких випадкових обурень ускладнює завдання оптимального управління та вимагає статистичних методів для визначення динамічних характеристик системи.

Для оцінки впливу зовнішніх кліматичних факторів зазвичай застосовують методи описової статистики, які використовують комбінацію двох основних підходів:

- 1) усереднення в межах тривалих інтервалів часу (наприклад, середньомісячні та середньорічні значення); 2) використання статистичних розподілів, параметри яких також отримані усередненням за часом, наприклад, опис вітрових режимів розподілом Вейбула [22].

Вітрогенератор у моделі, як електрична машина на постійних магнітах,

описується системою рівнянь, заданою в осях q та d:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5p \left[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q \right], \\ \frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt}\vartheta = \omega_r, \end{cases}$$

де L_q, L_d - індуктивності статора по осях q і d; R – опір обмотки статора; i_q, i_d – проекції струму статора на осі q та d; U_q, U_d – проекції напруги статора на осі q та d; ω_r – кутова частота обертання ротора; λ – магнітний потік постійних магнітів; p – кількість пар полюсів; T_i – електромагнітний момент; J – сумарний момент інерції ротора та навантаження; F – коефіцієнт тертя; θ – кут ротора; T_m – момент опору.

Значення середньої продуктивності ВЕУ із номінальною потужністю $P_{ВЕУ}$, початковою швидкістю вітроколеса v_0 , номінальною швидкістю $v_{ном}$ та граничною швидкістю $v_{макс}$ визначається за формулою:

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_p^3}{v_{ном}^3} \cdot P_e \cdot T,$$

де: середній куб швидкості в діапазоні робочих швидкостей -

$$\bar{v}_p^3 = \bar{v}_n^3 \left[I(x_{ном}, m) - I(x_0, m) + I(x', m) \right]$$

$$I(x, m) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^x e^{-t} t^{m-1} dt$$

Неповна гамма-функція:

Обчислити значення неповної гамма-функції $I(x_{ном}, m)$, $I(x_0, m)$ та $I(x', m)$ можна, скориставшись довідковими таблицями або спеціалізованими програмами через розкладання в ряд, або вираз через безперервні дробы (залежно від значень аргументів).

Модель вітроустановки на постійних магнітах отримує вхідний сигнал механічного моменту від вітроколеса виводи фаз підключаються до навантаження. У цій моделі роль навантаження виконує активне трифазне навантаження. Надалі трифазний струм буде випрямлений для можливості передачі потужності на шину постійного струму.

Для розрахунку струму та напруги на виході сонячної батареї скористаємося формулами:

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right];$$
$$U_T = \frac{kT}{q} \times nl \times N_{cell},$$

де I_d - струм діода (А); U_d - напруга діода (В); I_0 – струм насичення (А); k – постійна Больцмана ($1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); q – заряд електрона ($1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл); T – температура елемента (К); N_{cell} – кількість елементів у модулі.

Потужність сонячної батареї P_{CB} визначається добутком струму на напругу:

$$P_{CB} = I_d U_T$$

Модель комбінованої установки, що включає локальні джерела енергії та навантаження, показана на рис.3.6. Математична модель реалізована з використанням програмного забезпечення із пакету MATLAB-Simulink. Модель дозволяє оцінити вплив вхідних та збурювальних впливів на струм і напругу на виході системи [23].

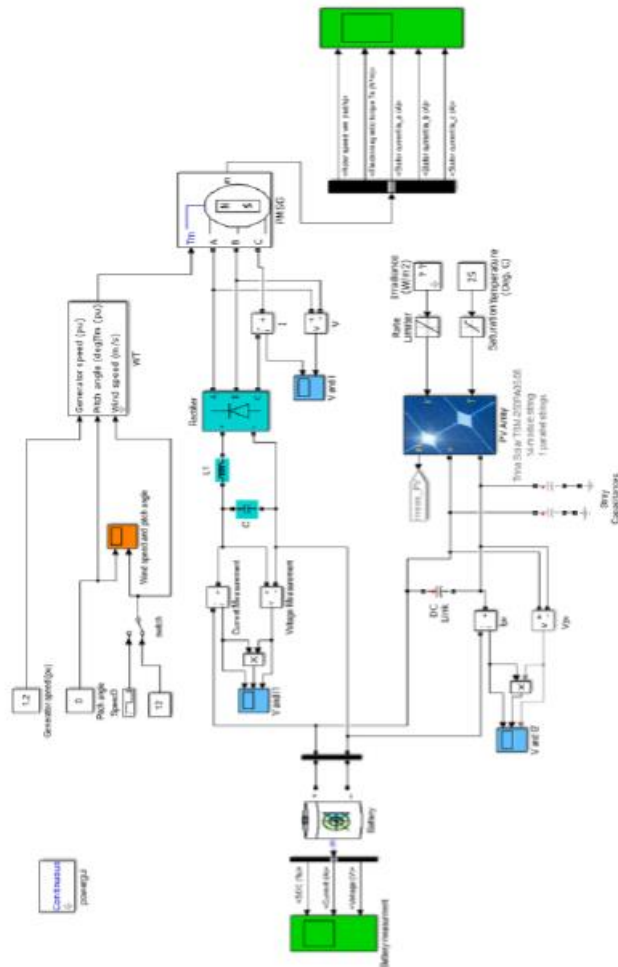


Рисунок 3.6 - Модель комбінованої вітро-сонячної установки

У даній моделі енергія, що надходить від ВЕУ та сонячних батарей, накопичується в акумуляторній батареї, яка виконує роль навантаження. Для моделювання батареї використовується стандартний блок “Battery” з бібліотеки Simulink з напругою 48 В та ємністю 100 А·год. Зарядка проводиться через найпростіший контролер, що вимикає батарею від мережі при повній зарядці. Як випрямляч використовується діодний міст з LC-фільтром.

Використання в дослідженнях методу математичного та комп'ютерного моделювання дозволяє замінити реальну систему автономного електропостачання спрощеною копією і, тим самим, передбачити характер та хід зміни вихідних параметрів при зміні вхідних та збурювальних факторів. Цей метод найбільш ефективний, коли вхідні параметри мають випадковий

характер і для опису процесів використовуються імовірісно-статистичні моделі.

Результати комплексних досліджень при різному поєднанні тих факторів, що збурюють, можуть бути використані при проєктуванні та експлуатації автономних систем електропостачання та визначення найкращого (найоптимальнішого) рішення з безлічі допустимих рішень.

Спільна робота розумних енергомереж і відновлюваних джерел енергії є надзвичайно актуальною в умовах сучасних викликів енергетичної галузі та глобального переходу до сталого розвитку. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідроенергія та біомаса, відіграють ключову роль у зменшенні залежності від викопних палив і зниженні викидів парникових газів. Однак через їхню природну мінливість і непередбачуваність виникає необхідність у впровадженні інноваційних підходів для забезпечення стабільності енергетичних систем.

Розумні енергомережі, які поєднують цифрові технології, автоматизацію, моніторинг і прогнозування, виступають важливим інструментом для вирішення цих проблем. Вони дозволяють ефективно інтегрувати відновлювані джерела, забезпечуючи гнучке управління потоками енергії, баланс між виробництвом і споживанням, а також оперативне реагування на зміни в мережі. Завдяки впровадженню розумних лічильників, систем зберігання енергії та технологій управління попитом, споживачі отримують можливість активно брати участь в енергетичному ринку, що сприяє розвитку концепції "активного споживача" або "прос'юмера".

Крім того, інтеграція розумних мереж із відновлюваними джерелами енергії сприяє зниженню енергетичних втрат, оптимізації роботи мережі та забезпеченню стабільного енергопостачання навіть у пікові періоди. Це не лише підвищує надійність енергетичної інфраструктури, але й відкриває можливості для інноваційного розвитку економіки, створення нових робочих місць і залучення інвестицій у "зелені" технології.

У сучасному світі, коли кліматичні зміни та енергетична криза стають дедалі гострішими проблемами, синергія між розумними мережами та відновлюваними джерелами енергії є фундаментальним кроком до досягнення низьковуглецевої економіки, енергетичної незалежності та екологічної безпеки. Їхня співпраця закладає основу для довгострокового сталого розвитку, відповідаючи потребам сьогодення без шкоди для майбутніх поколінь.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

До основних можливостей управління можна віднести: гнучкість у балансуванні попиту та пропозиції, тобто, гібридні станції можуть швидко реагувати на зміну попиту, використовуючи енергію з накопичувачів у періоди пікового навантаження або обмежуючи генерацію у разі надлишку.

Інтеграція з цифровими системами управління здійснюється за рахунок використання сучасних програмних рішень та технологій Інтернету, дозволяє здійснювати прогнозування виробництва та споживання, а також автоматизацію процесів управління.

Впровадження гібридних станцій у складі інтегрованих енергетичних систем сприятиме підвищенню їх ефективності, надійності та екологічності, водночас створюючи умови для енергетичного переходу до стійкого майбутнього.

Використання в дослідженнях методу математичного та комп'ютерного моделювання дозволяє замінити реальну систему автономного електропостачання спрощеною копією і, тим самим, передбачити характер та хід зміни вихідних параметрів при зміні вхідних та збурювальних факторів. Цей метод найбільш ефективний, коли вхідні параметри мають випадковий характер і для опису процесів використовуються імовірнісно-статистичні моделі, в роботі розроблена така модель.

Результати комплексних досліджень при різному поєднанні тих факторів, що збурюють, можуть бути використані при проектуванні та експлуатації автономних систем електропостачання та визначення найкращого (найоптимальнішого) рішення з безлічі допустимих рішень.

Спільна робота розумних енергомереж і відновлюваних джерел енергії є надзвичайно актуальною в умовах сучасних викликів енергетичної галузі та глобального переходу до сталого розвитку. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідроенергія та біомаса, відіграють ключову роль у зменшенні залежності від викопних палив і зниженні викидів парникових газів. Однак через їхню природну мінливість і непередбачуваність виникає

необхідність у впровадженні інноваційних підходів для забезпечення стабільності енергетичних систем.

Крім того, інтеграція розумних мереж із відновлюваними джерелами енергії сприяє зниженню енергетичних втрат, оптимізації роботи мережі та забезпеченню стабільного енергопостачання навіть у пікові періоди. Це не лише підвищує надійність енергетичної інфраструктури, але й відкриває можливості для інноваційного розвитку економіки, створення нових робочих місць і залучення інвестицій у "зелені" технології.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі розглянуті переваги та недоліки, особливості роботи СФЕС, дозволять у перспективі розробляти їх структурно-схемні рішення з покращеними експлуатаційно-технічними характеристиками.

Реалізуються проєкти використання сонячних елементів потужністю в сотні та навіть тисячі кіловат, також намітилася тенденція збільшення ККД сонячних батарей при зменшенні їх вартості.

Ефективна експлуатація ВЕС вимагає балансу між технологічними, екологічними та соціальними аспектами, вона є ефективним і екологічним способом генерації енергії, особливо в умовах переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте для максимального використання їхніх переваг необхідно враховувати їхню специфіку, впроваджувати технології накопичення енергії, оптимізувати місця розташування та забезпечувати гармонійне поєднання з іншими елементами енергосистеми.

Ефективність перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію за допомогою ВЕУ істотно залежить від аеродинамічних параметрів вітроколеса. Кут атаки варіюється в значних межах через такі фактори: зміна швидкості вітру за перетином вітроколеса, у тому числі і з висотою, зміна швидкості вітру в часі за швидкістю та за напрямом, зміна частоти обертання вітроколеса. В реальних умовах експлуатації вплив цих факторів призводить до зниження ефективності роботи ВЕУ на 10-15%.

Було розглянуто проблему нестабільності вироблення енергії з поновлюваних джерел та можливі шляхи її вирішення. Наведено переваги використання гібридних установок, що використовують від кількох відновлюваних джерел енергії, особливо, вітро-сонячних енергетичних установок.

Було систематизовано техніко-економічні показники електростанцій різних типів з урахуванням інтервалу їхньої невизначеності для країн Європи; проведено порівняння відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії за критерієм вартості вироблюваної електроенергії. Показано, що з урахуванням

плати за викиди відновлювані джерела енергії можуть виявитися конкурентоспроможними на енергетичних ринках; за сприятливих умов сонячні та вітрові електростанції у ряді районів можуть виробляти дешеву електроенергію вартістю 3–5 цент/(кВт·год).

Об'єднання функцій приводного двигуна, генератора змінного струму та накопичувача кінетичної енергії в одній конструкції генераторного модуля дозволяє мінімізувати втрати, пов'язані з перетворенням енергії між механічною та електричною формами. Такий підхід не лише підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи та її надійність, але й сприяє покращенню якості електроенергії в мережі споживачів. Зокрема, це забезпечує стабілізацію частоти і амплітуди напруги, а також підвищення коефіцієнта синусоїдальності, що є важливим для забезпечення стабільної роботи електрообладнання.

Інтеграція з цифровими системами управління здійснюється за рахунок використання сучасних програмних рішень та технологій Інтернету, дозволяє здійснювати прогнозування виробництва та споживання, а також автоматизацію процесів управління.

Впровадження гібридних станцій у складі інтегрованих енергетичних систем сприятиме підвищенню їх ефективності, надійності та екологічності, водночас створюючи умови для енергетичного переходу до стійкого майбутнього.

Результати комплексних досліджень при різному поєднанні тих факторів, що збурюють, можуть бути використані при проектуванні та експлуатації автономних систем електропостачання та визначення найкращого (найоптимальнішого) рішення з безлічі допустимих рішень.

Інтеграція розумних мереж із відновлюваними джерелами енергії сприяє зниженню енергетичних втрат, оптимізації роботи мережі та забезпеченню стабільного енергопостачання навіть у пікові періоди. Це не лише підвищує надійність енергетичної інфраструктури, але й відкриває можливості для

інноваційного розвитку економіки, створення нових робочих місць і залучення інвестицій у "зелені" технології.

У сучасному світі, коли кліматичні зміни та енергетична криза стають дедалі гострішими проблемами, синергія між розумними мережами та відновлюваними джерелами енергії є фундаментальним кроком до досягнення низьковуглецевої економіки, енергетичної незалежності та екологічної безпеки. Їхня співпраця закладає основу для довгострокового сталого розвитку, відповідаючи потребам сьогодення без шкоди для майбутніх поколінь.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Unspecified: Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review IEEE, 2024 [IEEE Xplore](<https://ieeexplore.ieee.org/document/9684974>)
2. Juan Carlos León Gómez, Susana Estefany De León Aldaco, Jesus Aguayo Alquicira .A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques MDPI .2023 P. 1446–1467. [MDPI](<https://www.mdpi.com/eng4020084>)
3. Karel Janda, Luiz Moreira Coelho Junior. Hybrid Wind and Solar Photovoltaic Generation with Energy Storage Systems: A Systematic Literature Review and Contributions to Technical and Economic Regulations. MDPI. 2021 [MDPI](<https://doi.org/10.3390/en14206521>)
4. Hybrid Renewable Energy Systems for Grid Integration: Design and Optimization Techniques. Elsevier ,2020 [Elsevier](<https://www.elsevier.com/books>)
5. Edited by Ali Keyhani. Advances in Renewable Energy and Smart Grid Integration. CRC Press.2019: [CRC Press](<https://www.routledge.com>)
6. Construction of an Enclosed Trough EOR System in South Oman / B. Bierman, J. O'Donnell, R. Burke, M. McCormick, W. Lindsay // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 49. – P. 1756–1765.
7. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses / R. Hassanien, E. Hassanien, M. Li, W. Dong Lin // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 54 – P. 989-1001.
8. Beaudin M., et al. Energy storage for mitigating the variability of renewable energy sources: An updated review/ Energy for Sustainable Development, Vol. 14, 2014. pp 302-314.
9. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Photovoltaics. June, 2016. Volume 1: Power Sector Issue 4/5. «IRENA», United Arab Emirates June, 2016.

10. Solar Inverters // SMA Solar Technology AG URL: <https://www.sma.de/en/products/solarinverters.html>
11. Türkay B.E., Telli A.Y. Economic Analysis of Stand Alone and Grid Connected Hybrid Energy Systems. *Renewable Energy*. 2017. V. 36. No. 7. P. 1931–1943. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.007
12. Ajao K.R., Oladosu O.A., Popoola O.T. Cost-benefit analysis of wind-solar power generation by HOMER power optimization software. *Journal of Applied Science and Technology*. 2018. V. 16. No. 1–2. P. 52–57. DOI: 10.4314/jast.v16i1-2.64779.
13. Srivastava R., Giri V.K. Optimization of Hybrid Renewable Resources using HOMER. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. V. 6. No. 1. P. 157–163.
14. Sigarchian S.G, Malmquist A., Fransson T. Modeling and control strategy of a hybrid PV/Wind/Engine/Battery system to provide electricity and drinkable water for remote applications. *Energy Procedia*. 2015. V. 57. No. 1. P. 1401–1410. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.087
15. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R. Simulation and Optimization of Stand-Alone Hybrid Renewable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 13. No. 8. P. 2111–2118. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.010
16. Bhandari B., Poudel, S.R., Lee, K.T., Ahn, S.H. Hybrid renewable energy system: A Review // *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*. 2015. V. 7. No. 5. P. 535–542. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.187
17. Renewables 2019. Global Status Report. Paris: REN21, 2019. 336 p.
18. Studies on Competitiveness of Space and Terrestrial Solar Power Plants Using Global Energy Model / L. S. Belyaev [et al.] // *International Journal of Global Energy Issue*. 2016. Vol. 25, No 1–2. P. 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2006.008386>.
19. Energy Outlook for Asia and the Pacific. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2017. 543 p.

20. Electricity Prices, March 2019 [Электронный ресурс]. Access mode: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices. Date of access: 12.12.2019.
21. E 44 Enercon System Concept. URL: <http://www.enercon.de/en-en/60.htm>.
22. Blade Angle Measurements. URL: <http://www.berlinwind.com/englisch/services/blade-angle-measurements>.
23. Ogunjuyigbe, ASO., Ayodele TR., Akinola OA. (). Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. Applied Energy. 2016. V.171. pp. 153-171