

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання

(повна назва кафедри)

«На правах
рукопису» УДК _____

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
Д.Г. Дерев'янка
«___»_____2022р.

Магістерська дисертація

Зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціалізації Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «Техніко-економічне обґрунтування оптимальної структури
гібридних мікросистем»

Виконав: студент II курсу, групи ОЕ-11мп

Прудіннік Дмитро Геннадійович

(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Попов В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант нормоконтроль

(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Д.Г. Дерев'янка

«_____» _____ 2022р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Прудіннік Дмитро Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема дисертації:** *«Техніко-економічне обґрунтування оптимальної структури гібридних мікросистем»* науковий керівник дисертації: д.т.н., проф. Попов В.А. затверджені наказом по університету від 09 листопада 2022 р. №4127-с. **Термін подання студентом дисертації:** 20 грудня 2022 року
3. **Об'єкт дослідження:** процеси перетворення енергії в локальних гібридних мікросистемах.
4. **Предмет дослідження:** особливості інтеграції та функціонування гібридних мікросистем в системах електропостачання з урахуванням низки техніко-економічних й екологічних чинників.
5. **Перелік завдань, які потрібно розробити:** Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі задачі:

- виконано аналіз окремих джерел генерування та накопичення енергії.
- виконано аналіз техніко-економічні характеристики та моделі мікросистем.
- розглянуто особливості автономної роботи мікросистем.
- опрацьовано питання загальних принципів побудови та керування роботою гібридних мікросистем.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження (алгоритми розрахунків).

7. Орієнтовний перелік публікацій:.

Прудіннік Д.Г. "Гібридні мікросистеми" V Науково-технічна конференція магістрів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів) Київ, 13 грудня 2022 року

Вставити свою презентацію – вона должна была быть загружена на гугл-диск

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль:

Дата видачі завдання: «01» вересня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.22	Виконано
2	Аналіз предметної області та постановка задачі	01.9.22-09.09.22	Виконано
3	Бібліографічний аналіз з напрямку досліджень	10.09.22-13.09.22	Виконано
4	Робота над першим розділом	14.09.22-05.10.22	Виконано
5	Робота над другим розділом	06.10.22-16.10.22	Виконано
6	Робота над третім розділом	17.10.22-25.10.22	Виконано
7	Розробка стартап проекту	15.11.22-06.12.22	Виконано
8	Оформлення дисертації	26.10.22-29.10.22	Виконано
9	Оформлення реферату та презентації	30.10.22-10.12.22	Виконано
10	Попередній захист МД	9.12.22-14.12.22	Виконано
11	Захист МД	20.12.22-22.12.22	Виконано

Студент

(підпис)Прудіннік Д.Г.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)Попов В. А.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська дисертація на тему: «Техніко-економічне обґрунтування оптимальної структури гібридних мікросистем» складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 78 сторінки основного тексту, в тому числі 5 рисунки, 12 таблиць, 20 бібліографічних найменувань за переліком посилань та додатків.

Актуальність теми. Всім відомий тренд на здешевлення технологій, устаткування, що використовується у відновлюваній енергетиці, та пов'язаних з охороною навколишнього середовища. Дзеркально відбувається і здешевлення технологій накопичення енергії (energy storage). Це пришвидшить розвиток, розбудову цих проектів, а також їх поширення.

Тому, хоча Україна і відстає в імплементації законодавчої бази та в інвестиціях у накопичувачі енергії, це не так критично, як можна було б подумати.

Важливо зазначити, що встановлення нових виробничих потужностей (переважно пов'язаних із "зеленою" енергетикою) потребує інвестицій не лише у виробництво як таке, а й у складні технології та інфраструктуру, включаючи системи накопичення енергії. Однак, запровадження законодавчої та нормативно-правової бази для планування, будівництва, експлуатації, виведення з експлуатації систем накопичення енергії не вирішить проблему зношеності мереж. Модернізація мережі - одне з найгостріших питань в українській енергетиці, яке потребує нагального вирішення, адже близько 17% підстанцій та майже 67% ліній електропередач експлуатуються понад 40 років (за даними НЕК "Укренерго", і які враховані в Плані розвитку системи передачі на 2020-2029 роки).

Мета та завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є: опрацювання питань щодо формування та подальшого використання гібридних мікросистем в розподільних мережах.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі задачі:

- виконано аналіз технологічних особливостей окремих джерел генерування та накопичення енергії;
- виконано аналіз техніко-економічних характеристик та моделей мікросистем;
- розглянуто особливості автономної роботи мікросистем;

- вирішено питання загальних принципів побудови та керування роботою гібридних мікросистем.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення енергії в локальних гібридних мікросистемах.

Предмет дослідження: особливості інтеграції та функціонування гібридних мікросистем в системах електропостачання з урахуванням низки техніко-економічних й екологічних чинників.

Методи дослідження. Фізичні залежності процесів генерування та акумулювання енергії, математичні методи оптимізації.

Практичне значення одержаних результатів.

У магістерській дисертації отримано наукові результати, що мають цінність для ринку електричної енергії, споживачів електричної енергії, споживачів – власників систем накопичення енергії.

Стартап-проєкті пропонується розробка програмного забезпечення, яке дасть змогу споживачу отримати імітацію часового графіка задля оптимального використання локальних джерел енергії, які використовуються в енергокомплексі.

Особистий внесок. Наукові положення, які є у магістерській дисертації, отримано магістрантом самостійно.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ВІТРОВА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, БАЛАНС ПОТУЖНОСТІ, БАЗОВА ГЕНЕРАЦІЯ, ВСТАНОВЛЕНА ПОТУЖНІСТЬ,

ABSTRACT

Structure and scope of work: Master's thesis on the topic: "Feasibility study of the optimal structure of hybrid microsystems" consists of an introduction, four chapters, conclusions, list of references. The total volume of the work is 78 pages of the main text, including 5 figures, 12 tables, 20 bibliographic references and appendices.

Relevance of the work. Everyone knows the trend towards cheaper technologies, equipment used in renewable energy and related to environmental protection. Cheaper energy storage technologies are also becoming cheaper. This will accelerate the development, construction of these projects, as well as their distribution.

Therefore, although Ukraine lags behind in the implementation of the legal framework and in investments in energy storage, it is not as critical as one might think.

It is important to note that the installation of new production capacities (mainly related to green energy) requires investments not only in production per se, but also in sophisticated technologies and infrastructure, including energy storage systems. However, the introduction of a legislative and regulatory framework for the planning, construction, operation, and decommissioning of energy storage systems will not solve the problem of grid obsolescence. Modernization of the grid is one of the most pressing issues in the Ukrainian energy sector that needs to be urgently addressed, as about 17% of substations and almost 67% of transmission lines have been in operation for more than 40 years (according to NPC Ukrenergo, and which are taken into account in the Transmission System Development Plan for 2020-2029).

Aim and objectives of the study:

The purpose of the dissertation is: to study the issues of formation and further use of hybrid microsystems in distribution networks.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved:

- analysis of technological features of individual sources of energy generation and storage;
- analysis of technical and economic characteristics and models of microsystems;
- the features of autonomous operation of microsystems are considered;
- the issue of general principles of construction and control of hybrid microsystems.

Object of research: energy conversion processes in local hybrid microsystems.

Subject of research: features of integration and functioning of hybrid microsystems in power supply systems, taking into account a number of technical, economic and environmental factors.

Research methods. Physical dependences of energy generation and accumulation processes, mathematical methods of optimization.

Elements of scientific novelty of the obtained results.

In the master's thesis, scientific results were obtained that are valuable for the electricity market, electricity consumers, consumers - owners of energy storage systems.

The startup project proposes the development of software that will allow the consumer to get an imitation of the time schedule for the optimal use of local energy sources used in the energy complex.

Personal contribution. The scientific positions available in the master's dissertation were obtained by the master's student independently.

Keywords: SOLAR POWER PLANT, WIND POWER PLANT, ENERGY ACCUMULATION SYSTEM POWER BALANCE, BASIC GENERATION, INSTALLED POWER POWERFUL POWE

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. ВИКОРИСТАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	12
1.1 Джерела локальної генерації на органічному паливі	12
1.2 Відновлювані джерела енергії	16
1.3 Засоби накопичення енергії	19
Висновки до розділу 1	22
2. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МІКРОСИСТЕМ	23
2.1 Техніко-економічні характеристики та моделі мікросистем	23
2.2 Особливості інтеграції мікросистем в розподільні мережі	27
2.3 Особливості автономної роботи мікросистем	29
Висновки до розділу 2	34
3. ГІБРИДНІ МІКРОСИСТЕМИ	36
3.1 Загальні принципи побудови та керування роботою гібридних мікросистем	36
3.2 Прогнозування умов функціонування мікросистем	39
3.3 Планування оптимального режиму роботи гібридної мікросистеми	55
Висновки до розділу 3	66
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	67
4.1 Опис ідеї проекту	67
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	68
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	70
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	72
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	73
Висновок до розділу 4	75
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	77

ВСТУП

Сьогодні системи розподілу електричної енергії зазнають радикальних змін, викликаних різними взаємопов'язаними факторами. Наприклад, одночасно спостерігається прагнення до скорочення викидів парникових газів, ефективного управління попитом, запобігання перевантаженням силового обладнання, забезпечення якості електроенергії, зниження її втрат і підвищення надійності електропостачання, забезпечення умов широкої інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), врахування перспектив розвитку розподільних мереж.

При цьому зусилля урядів багатьох країн щодо виконання взятих на себе міжнародних зобов'язань пов'язаних із скороченням викидів змусили енергетичний сектор знизити залежність від традиційного виробництва електроенергії на основі викопного палива на користь відновлюваних джерел енергії, переважно у вигляді вітру та сонця. Незважаючи на те, що виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії є більш екологічно лояльним, висока залежність від них може зробити системи розподілу електроенергії менш надійними [1].

Одночасно з цим у процесі реконструкції та розвитку сучасних систем розподілу електричної енергії, в останні роки активно обговорюється питання формування та подальшого ефективного функціонування мікросистем, включаючи можливість їх роботи як у режимі підключення до централізованої мережі, так і автономно. Розвиток даного напрямку багато в чому обумовлений дедалі ширшим використанням ВДЕ, зростаючої зацікавленістю у практичному застосуванні різноманітних технологій накопичення енергії.

Відповідно до [2] мікросистеми визначаються як єдиний керований об'єкт, що складається з взаємопов'язаних навантажень та різних розподілених енергетичних ресурсів у межах певних електричних кордонів,

який працює як у режимі підключення до мережі, так і в ізольованому режимі, що виникає, як правило, у тому випадку, якщо це необхідно для підтримки якості електропостачання (наприклад, у разі відмови централізованого електропостачання). Як альтернатива мікросистема може бути спроектована для автономної роботи у віддаленому місці з можливістю підключення до центральної мережі, коли відбувається відповідне розширення регіональної системи електропостачання.

1. ВИКОРИСТАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Очікується, що в майбутньому розподілена генерація забезпечить найбільш економічне рішення для проблеми збільшення навантаження. Зростання навантаження або перевантаження, буде усунено шляхом застосування розподіленої генерації у певних місцях мережі. Розподілена генерація, може забезпечити необхідний контроль для подолання проблеми падіння напруги. Теоретично розподілена генерація здатна забезпечити найдешевший варіант вирішення також проблем як зменшення втрат електричної енергії, так і підвищення надійності роботи електроенергетичної системи.

Розглянемо окремі джерела генерування та накопичення енергії, які теоретично можуть бути застосовані при формуванні мікросистем, а подальшому й гібридних мікросистем.

1.1 Джерела локальної генерації на органічному паливі

Найбільш поширеними джерелами енергії на органічному паливі, які в певних випадках використовувалися окремими споживачами традиційно були дизельні генератори та газові мікротурбіни. Розглянемо загальні характеристики та особливості зазначеного обладнання з точки зору можливості його застосування в мікросистемах.

Стабільність, надійність і простота виробництва є одними з переваг дизельного генератора для виробництва електроенергії. З іншого боку, вони мають деякі серйозні недоліки, такі як викиди парникових газів (ПГ) і високе споживання палива. Оксиди азоту (NO_x) і оксид вуглецю (CO) є двома небезпечними та руйнівними газами, які утворюються під час неповного згоряння дизельного палива, серед інших викидів твердих частин. Для ефективної роботи типова дизель-генераторна установка повинна працювати

з мінімальним навантаженням 30% від максимальної потужності. Це абсолютний мінімум і далекий від рекомендованого виробниками генератора навантаження в 60-75%. Однак багато клієнтів використовують генератори з навантаженням менше 25% потужності. Що ще гірше, у більшості випадків дизельні генератори часто без потреби працюють 24/7 для освітлення, обладнання безпеки, громадського харчування тощо. Постійне недовикористання дизельних генераторів призводить до марної витрати палива, збільшення викидів парникових газів, створенню небезпечного середовища, наповненого шкідливими випарами.

Гібридні генератори — це генератори нового типу, які поєднують традиційні генераторні установки з іншим керованим електричним джерелом, щоб створити енергозберігаюче джерело електроенергії з низьким рівнем шуму та екологічністю. Кероване джерело може включати паливний елемент або інший пристрій, який генерує електроенергію з неелектричного джерела енергії, такого як гідроелектрогенератор, генератор вітрової турбіни, сонячне джерело енергії тощо.

Мікротурбіни — зазвичай мають одноступеневий компресор і одноступеневу турбіну з генератором, встановленим на одному валу. І компресор, і турбіна зазвичай мають радіальну, а не осьову конструкцію, як у випадку з їхніми більшими родичами.

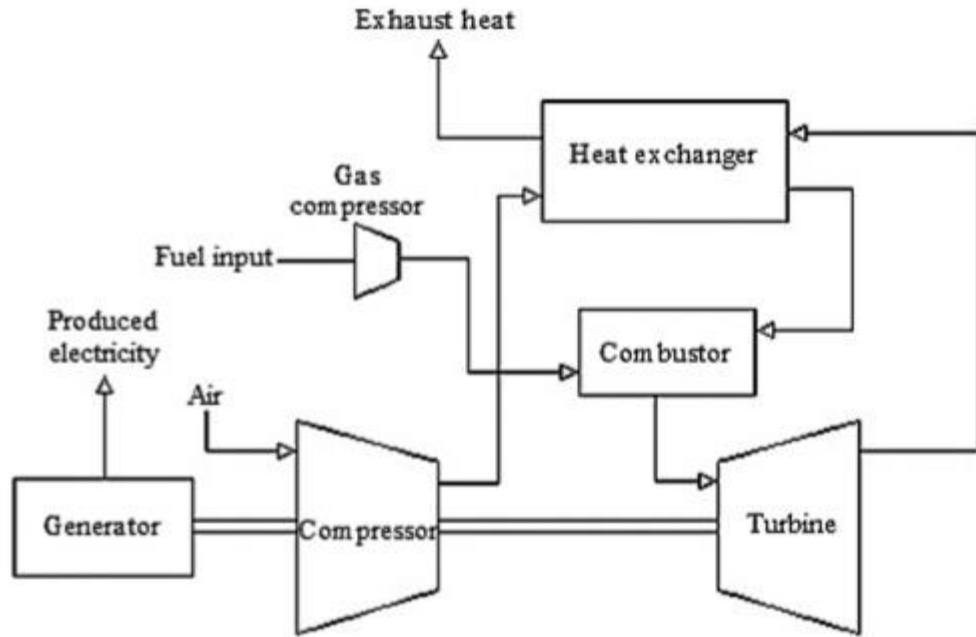


Рисунок 1.1 – Зразок схеми мікротурбіни

Швидкість обертання надзвичайно висока, зазвичай перевищує 40 000 об/хв, і силова електроніка використовується для узгодження вихідної частоти з мережею. Деякі перші турбіни були представлені нерекуперованими конструкціями (з нижчою ефективністю), але також меншими капітальними витратами. Але зараз багато виробників використовують рекуператори для підвищення продуктивності. Інші використовують відпрацьоване тепло для виробництва гарячої води в системі когенерації.

Модель МТ виражена наступним чином у

$$C_{MT} = \frac{C_{GAS}}{LHV} \sum \frac{(sP_{MT}(t)\Delta t)}{(\eta_{MT}(t))}$$

де ефективність МП можна виразити як:

$$\eta_{MT} = x \left(\frac{P_{MT}}{P_R} \right)^3 + y \left(\frac{P_{MT}}{P_R} \right)^2 + z \left(\frac{P_{MT}}{P_R} \right) + c$$

де C_{MT} — вартість палива МТ, P_R — номінальна вихідна потужність МТ, P_{MT} — фактична вихідна потужність МТ, C_{GAS} — вартість природного газу, LHV — нижня теплотворна здатність палива, η_{MT} — ефективність МП за період t , x , y , z , c — коефіцієнти.

Мікротурбіни можуть бути як осьовими, так і відцентрово-радіальними. Початкова вартість, ефективність і викиди будуть трьома найважливішими критеріями при проектуванні цих агрегатів.

Щоб мікротурбіни були успішними для застосування в мікросистемах, вони повинні мати компактні розміри, низьку вартість виробництва, високий ККД, тиху роботу, швидкий запуск і мінімальні викиди. Ці характеристики, якщо їх буде досягнуто, зроблять мікротурбіни чудовими кандидатами для забезпечення основного навантаження та когенераційної енергії для ряду комерційних клієнтів. Потужність мікротурбін на сьогоднішньому ринку коливаються приблизно від 20 до 350 кВт. Сучасні мікротурбіни використовують радіальні турбіни та компресори. Для підвищення загального теплового ККД в конструкції мікротурбіни використовуються регенератори в поєднанні з абсорбційними охолоджувачами або іншими тепловими навантаженнями. На рисунку 1.2 показана типова система когенерації з використанням мікротурбіни.

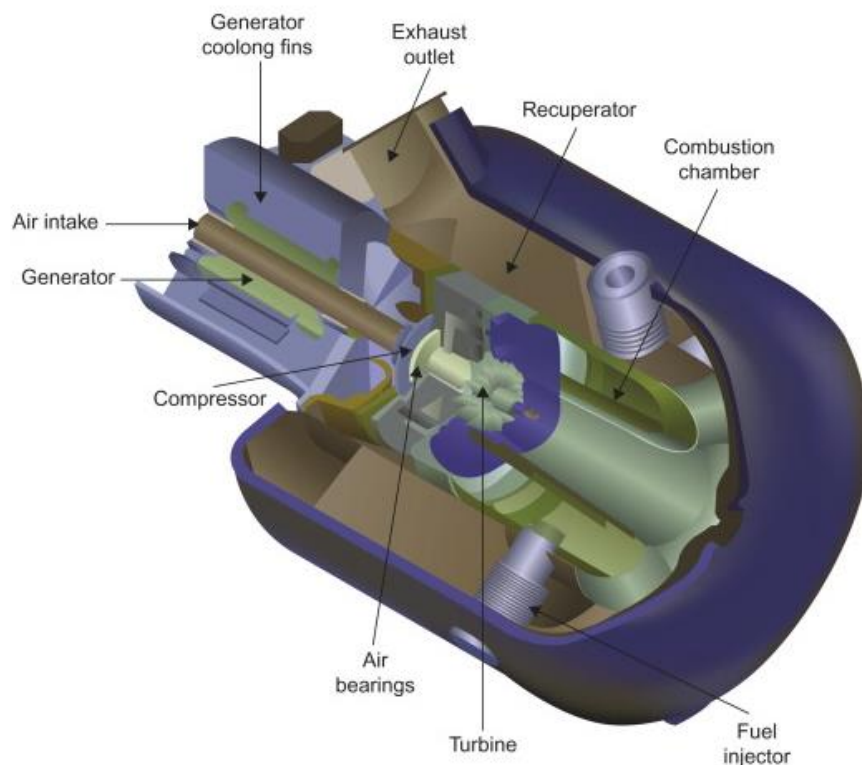


Рисунок 1.2 – Типова система когенерації з використанням мікротурбіни

1.2 Відновлювані джерела енергії

На рівні систем розподілу електричної енергії та її споживачів у якості найбільш поширених відновлюваних джерел генерації варто розглядати вітрові турбіни, сонячні панелі та використання біопалива, що, наприклад, достатньо актуально для сільської місцевості.

Вітрогенератори, що мають фіксовану частоту обертання, використовують асинхронний генератор з короткозамкненим ротором, об'єднаний з енергосистемою через трансформатор. Для подолання відмінностей у швидкості роботи ротора віротурбіни і генератора використовується редуктор, що узгоджує ці швидкості. Ковзання генераторів трохи змінюється в залежності від величини вироблюваної потужності і тому не є абсолютно постійним. Незважаючи на простоту конструкції, асинхронні машини не так широко застосовуються, як синхронні генератори. В основному це пов'язано з віддачею і поглинанням активної та реактивної потужності, які співвідносяться не дуже добре. Тим не менш, асинхронні генератори забезпечують корисне демпфірування крутного моменту і відмінно підходять в якості головної силової установки, що робить їх придатними для застосування в вітрогенераторах з фіксованою швидкістю обертання.

Більшість вітрових турбін, що працюють в польових умовах, підключені до електромережі, і вироблена енергія безпосередньо поступає в мережу.

Поява інтелектуальної мережі поставить перед розробниками вітроенергетики новий виклик, такий як виробництво під час високої швидкості вітру (віротурбіна повинна бути здатна безперервно постачати енергію в мережу), а також корекція коефіцієнта потужності. Для вітроенергетичних застосувань віротурбіни в основному експлуатувалися з асинхронними генераторами (АД). В якості мережевого інтерфейсу широко використовують перетворювачі, які демонструють свою здатність

забезпечувати максимальну потужність в широкому діапазоні вітрових умов, і можуть незалежно контролювати як активну, так і реактивну потужність.

На вихідну потужність вітроенергетичних установок безпосередньо впливає швидкість вітру. Тому, коли великі джерела вітрової енергії інтегровані в розподільчу мережу, це впливає на динаміку і роботу мережі.

Додавання вітроенергетики до енергосистем матиме позитивний вплив за рахунок скорочення викидів при виробництві електроенергії та зменшення експлуатаційних витрат енергосистеми, оскільки менше палива споживається на традиційних електростанціях. Однак необхідно буде оцінити можливі негативні наслідки, щоб переконатися, що вони не компенсують частину переваг, а також для забезпечення безпеки функціонування енергосистеми. Обмежена передбачуваність та високі часові коливання вітрової енергії викликають цілий спектр проблем, починаючи від короткострокових відхилень частоти і закінчуючи довгостроковими проблемами балансування, що тягне за собою низку нових викликів та додаткових обмежень для роботи в електромережі. Розмір енергосистеми, структура генеруючих потужностей та коливання навантаження впливають на те, як непостійне виробництво асимілюється в системі. Якщо частка періодичного виробництва електроенергії невелика і якщо виробництво вітрової енергії добре розподілено на великій території та воно корелює з навантаженням, тоді вітрову енергію легше інтегрувати в систему.

В основному, існує два типи сонячної генерації, що використовуються в інтеграції з енергосистемою - концентрована сонячна енергетика (КСЕ) та фотоелектрична енергетика (ФЕ). Однак, фотоелектричні сонячні панелі відрізняються від сонячних теплових систем тим, що вони не використовують сонячне тепло для виробництва теплової енергії, натомість вони використовують сонячне світло за допомогою "фотоелектричного ефекту" для виробництва постійного електричного струму.

Здатність зберігати теплову енергію призвела до кращого проникнення сонячної теплової технології з використанням концентрованої сонячної

енергетики в електроенергетику, оскільки це рішення допомагає краще подолати проблеми з перебоями в генеруванні, які зазвичай зустрічаються у фотоелектричних системах.

Завдяки цим сценаріям системи КСЕ є більш привабливими для великомасштабного виробництва електроенергії в якості технологій зберігання теплової енергії. Хоча КСЕ має кращі показники для інтеграції в мережу, технологія та висока вартість наразі обмежують її широкомасштабне розширення та розгортання, оскільки вона включає як парові, так і сонячні електростанції, які вимагають високих початкових витрат. Зменшення вартості фотоелектричних установок та навіть умови на енергетичному ринку наразі сприяють розвитку фотоелектричних установок.

Інтеграція сонячних електростанцій з електромережею - це технологія, яка дозволяє великомасштабній сонячній енергії, виробленій за допомогою фотоелектричних або когенераційних систем, проникати у вже існуючу електромережу. Ця технологія вимагає ретельного розгляду та уваги, в тому числі у сферах виробництва, встановлення та експлуатації сонячних компонентів. Рівні проникнення сонячної енергії повинні бути ефективно взаємопов'язані з мережею електропередачі, що вимагає глибокого розуміння їхнього впливу на мережу.

Фотоелектрична станція, яка використовує фотоелектричні модулі, по суті, складається з різних компонентів, але в основному інвертор є найбільш важливим компонентом для інтеграції. Інші компоненти включають фотоелектричний генератор (сонячні модулі), генераторну розподільчу коробку, лічильники, апаратуру підключення до мережі, а також кабелі постійного та змінного струму, як показано на рис. 1.3. Інвертори відіграють вирішальну роль в будь-якій сонячній станції і часто вважаються її "мозком". Основна функція інвертора полягає в "інвертуванні" вихідного постійного струму в змінний струм, який є стандартом, що використовується всіма комерційними приладами. Інвертори необхідні для забезпечення постійної напруги та частоти, незважаючи на мінливі умови навантаження, а також для

постачання або поглинання реактивної потужності у випадку реактивних навантажень [3]. Крім інвертування, інвертори узгоджують системи між собою та подають сонячну енергію в мережу з максимально можливою ефективністю. Таким чином, продуктивність фотоелектричної установки так само сильно залежить від надійності та ефективності інвертора, як і від орієнтації, взаємозв'язку та якості фотомодулів.

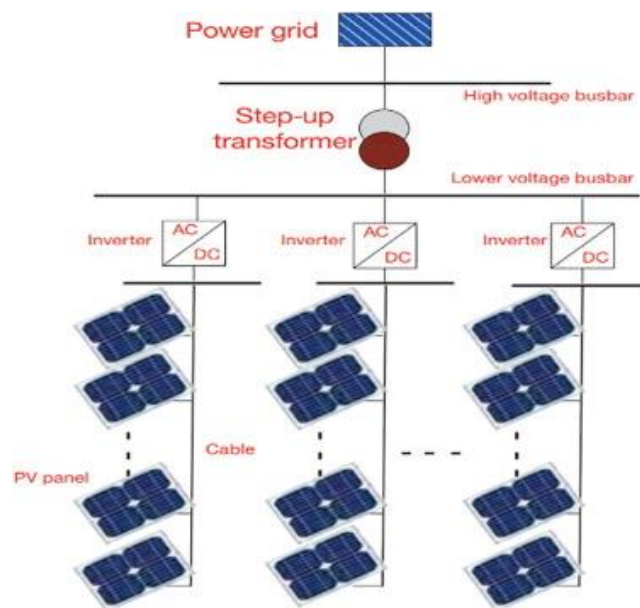


Рисунок 1.3 – Схема фотоелектричної електростанції

1.3 Засоби накопичення енергії

В електроенергетиці можуть використовуватись численні технології накопичення енергії, які, як показано на рис. 1.4, зазвичай поділяються на шість груп: електричні, механічні, електрохімічні, термохімічні, хімічні та теплові. Залежно від форми зберігання енергії та характеристик її видачі в мережу, СНЕ може виконувати безліч функцій на ринку електричної енергії. [4]

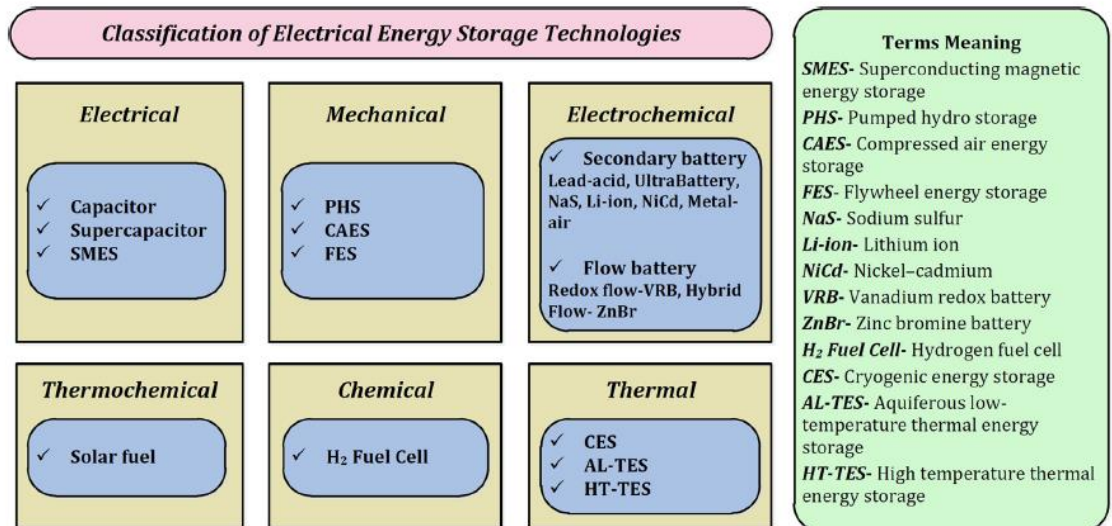


Рисунок 1.4 – Технології СНЕ, для застосування в електроенергетиці

Розглянемо основні характеристики систем накопичення енергії.

Щільність потужності (power density) (Вт/кг або Вт/л) – це номінальна вихідна потужність, поділена на об'єм акумуляуючого пристрою. Щільність енергії (energy density) розраховується як накопичена енергія, поділена на обсяг. Об'єм накопичувача – це обсяг усієї системи накопичення енергії, включаючи сам накопичувальний елемент, аксесуари та відповідні конструкції, а також перетворювальну систему [5]. Ці критерії важливі у ситуаціях, коли простір обмежений та/або якщо важлива вага накопичувача.

Загальна ефективність системи зберігання — це кількість енергії, яка виходить із системи по відношенню до кількості енергії накопиченої в ній. Для накопичувачів, які використовуються дуже часто, надзвичайно важливо мати ККД понад 80 % через втрати енергії у кожному циклі.

Тривалість розряду - це час, протягом якого накопичувач може розряджатися при номінальній вихідній потужності без підзарядки. Тривалість розряду є важливим критерієм, що впливає на технічну життєздатність системи зберігання для її конкретного застосування. Деякі типи систем зберігання можуть розряджатися з відносно високою швидкістю протягом досить коротких періодів часу, але їхня ефективність у цих випадках нижча. Наприклад, накопичувач може працювати при номінальній

потужності 1 МВт протягом 3 годин при ККД 80%; та ж установка може забезпечити 1,5 МВт протягом 10 хвилин при ККД 65% [6].

Життєвий цикл накопичувача. Тією чи іншою мірою більшість накопичувачів енергії деградує у міру використання (тобто під час кожного циклу заряду-розряду). Швидкість деградації залежить від технології зберігання енергії, умов експлуатації та інших змінних. Цей показник є особливо важливим для електрохімічних батарей.

У тій мірі, з якою накопичувач зношується і повинен бути замінений протягом очікуваного терміну служби системи зберігання, вартість такої заміни повинна бути додана до змінних експлуатаційних витрат системи зберігання.

В ідеалі накопичувач має працювати з максимальною ефективністю та номінальним часом відгуку за будь-якого рівня заряду.

Час відгуку (Response Time) - це час, необхідний для переходу від повної відсутності розряду до розряду при номінальній вихідній потужності. Як правило, час відгуку накопичувача маленький, на відміну від деяких типів генерації, яким потрібно від декількох хвилин до декількох годин, перш ніж вийти на повну потужність, наприклад, для турбін внутрішнього згорання.

Важливою характеристикою системи зберігання для деяких додатків є швидкість лінійної зміни розряду (Ramp Rate): швидкість, з якою може змінюватися її вихідна потужність. Як правило, швидкість наростання потужності накопичувача дуже висока, від мілісекунд до декількох секунд для її зміни від нуля до максимального значення, в залежності від технології.

Швидкість зарядки (Charge Rate) – це швидкість, з якою можна заряджати накопичувач. Якщо накопичувач не зможе досить швидко заряджатися, йому не вистачить енергії для надання необхідної послуги. Найчастіше акумулятор заряджається зі швидкістю, аналогічною швидкості його розрядки. Час "саморозряду" ("self discharge" time) - це час, протягом якого накопичувач зберігає свій заряд. Електрохімічні накопичувачі більш схильні до саморозряду. У цьому випадку саморозряд має місце через хімічні

реакції, що відбуваються при накопиченні енергії. Ця характеристика менш важлива у разі частого використання накопичувача. Для накопичувачів, які використовуються нечасто (тобто в режимі очікування протягом значного часу), цей критерій може бути дуже важливим.

Висновки до розділу 1

Продемонстровано, що у якості локальних енергетичних ресурсів можуть використовуватися різноманітні технології генерування (як орієнтовані на органічне паливо, так і відновлювані) та накопичення енергії, кожна з яких має свої техніко-економічні особливості та сфери застосування.

2. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МІКРОСИСТЕМ

2.1 Техніко-економічні характеристики та моделі мікросистем

При вирішенні питань визначення як оптимальної структури (компонування) гібридних мікросистем, так і оптимальних режимів їх роботи, в першу чергу, виникає завдання моделювання окремих технічних пристроїв, що входять до їх складу.

Питанням моделювання відновлюваних джерел, а також інших можливих пристроїв розподіленої генерації та акумулювання енергії у вітчизняній та зарубіжній періодиці присвячені сотні досліджень, що відрізняються як ступенем деталізації об'єкта досліджень, так і функціональним призначенням запропонованих моделей. Тут важливо відзначити, що більш деталізовані (а, відповідно, логічно припустити, що і більш адекватні) моделі вимагають, швидше за все, і більшої номенклатури вихідних даних, достовірні значення яких важко буде отримати, особливо враховуючи ієрархічний рівень, на якому формуються мікросистеми.

У зв'язку з цим нижче представлені загальні підходи до побудови моделей (з включенням до них лише найбільш істотних факторів) низки характерних складових мікросистем, з метою пояснення принципових підходів до оптимізації режимів роботи за різних стратегій їх застосування.

Вихідна потужність фотоелектричних установок може бути оцінена таким чином

$$P_{PVt} = P_{PVo} \times f_{PV} \left(\frac{SR_{Tt}}{SR_{To}} \right) \times [1 + \alpha_p (T_{Ct} - T_{Co})],$$

$$T_{Ct} = T_{at} \times (T_C - T_{an}) \times \left(\frac{SR_{Tt}}{SR_{Tn}} \right) \times \left(1 - \frac{\eta_{pv}}{0,9} \right),$$

де P_{PV0} – номінальна потужність сонячних панелей; f_{PV} – коефіцієнт зниження номінальних характеристик панелі; SR_{tt} – сонячна радіація, що потрапляє на панель; SR_{To} – сонячна радіація за стандартних умов (STC – standard test condition); α_p – температурний коефіцієнт; T_{Ct} – температура панелі; T_{Co} – температура панелі за стандартних умов (STC); E_{at} – температура навколишнього середовища; T_{cn} – номінальна експлуатаційна температура осередку сонячної панелі; SR_{Tn} – сонячна радіація, за якої визначалася номінальна температура осередку фотоелектричної панелі (NOCT – nominal operating cell temperature – 0,8 кВт/м²); T_{an} – температура навколишнього середовища за умов NOCT; η_{PV} – коефіцієнт корисної дії (ефективність) фотоелектричної панелі щодо точки відбору максимальної потужності.

Вихідна потужність вітрової турбіни розраховується виходячи з наступних умов

$$P_{Wt} = \eta_{Wt} \times P_{Wot},$$

$$P_{Wot} = \begin{cases} 0, & \text{если } V_t \langle V^- \\ P_n(V_t), & \text{если } V^- \langle V_t \langle V_r \\ P_r & \text{если } V_r \langle V_t \langle V^+ \\ 0 & \text{если } V_t \rangle V^+ \end{cases},$$

де P_r – номінальна потужність вітрової турбіни,

$$P_n(V_t) = \frac{1}{2} \rho \times A \times V_t^3 \times C_p,$$

ρ – щільність повітря, V – швидкість вітру, $A = \pi \times R^2$, R – довжина лопаті, C_p – постійна Беца, V^- – мінімальна робоча швидкість вітру, V_r – швидкість вітру, що відповідає номінальним вихідним параметрам вітрової турбіни, V^+ – максимальна допустима швидкість вітру.

Як альтернативне рішення, потужність вітрової турбіни може визначатися наступним чином [7]:

$$P_n(V_t) = a \times V_t^4 + b \times V_t^3 + c \times V_t^2 + d \times V_t + e ,$$

наприклад,

Таблиця 2.1 – Параметри вітрової турбіни

P_{wo}	V^-	V_r	V^+	a	b	c	d	e
140	3,0	15,01	17,0	-0,015	0,33	-0,9	-2,1	7,1

Вихідна потужність будь-якого контрольованого джерела енергії у загальному випадку повинна відповідати його граничним технічним умовам

$$P_{DG}^{\min} \leq P_{DGt} \leq P_{DG}^{\max} .$$

Сьогодні з погляду зрілості технологій, вартісних показників, універсальності застосування, як засоби накопичення енергії доцільно розглядати, насамперед, акумуляторні батареї. Це дозволяє запропонувати наступний підхід до їх моделювання, враховуючи, що на їхню потужність впливають такі фактори як конфігурація, тривалість і періодичність роботи, глибина розряду, температура та інші.

Умови заряджання та розряджання батарей можна визначити, виходячи з таких міркувань.

У кожний конкретний момент часу акумуляторна батарея (без урахування потенціалу регулювання навантаження) може не використовуватись, працювати в режимі заряду

$$P_{BES_t} = P_{cht} , \text{ якщо } P_{PVt} + P_{Wt} + P_{DGt} + P_{GRt} - P_{lt} \geq 0$$

або розряду

$$P_{BES_t} = P_{dcht}, \text{ якщо } P_{PVt} + P_{Wt} + P_{DGt} + P_{GRt} - P_{\ell t} < 0,$$

де P_{GRt} - потужність, що одержується з мережі (за наявності такої можливості); $P_{\ell t}$ - сумарне навантаження споживачів енергосистеми.

Енергія, яку акумуляторна батарея заряджає або розряджає, розраховується таким чином:

- режим заряду

$$A_{cht} = \left(\frac{P_{DGt} + P_{Wt} + P_{\ell t}}{\eta_{conv}} + P_{PVt} \right) \times \Delta t_{ch} \times \eta_{ch};$$

- режим розряду

-

$$A_{dcht} = \left(\frac{P_{\ell t} - P_{DGt} - P_{Wt}}{\eta_{conv}} - P_{PVt} \right) \times \Delta t_{dch} \times \eta_{dch},$$

де η_{conv} - к.п.д. (ефективність) конвертора; η_{ch} , η_{dch} - к.п.д. (ефективність) процесів, відповідно, зарядки, розрядки батареї; Δt_{ch} , Δt_{dch} - тривалість циклів, відповідно, зарядки та розрядки батареї.

При плануванні використання акумуляторних батарей, крім зарядної та розрядної потужності, необхідно враховувати ще ряд важливих технічних характеристик. Насамперед це стосується таких показників як стан заряду (SoC – state of charge), який відображає рівень заряду батареї щодо її ємності та показник глибини розряду (DoD – depth of discharge).

У цьому випадку маємо:

$$\text{для режиму заряду } SoC_t = SoC_{t-1}(1 - \sigma) + E_{cht}^*,$$

$$\text{для режиму розряду } DoD_t = DoD_{t-1}(1 - \sigma) - E_{dcht}^*$$

де E_{ch}^* , E_{dch}^* - відносне (по відношенню до номінальної ємності) значення енергії, що отримується батареєю, відповідно, в процесі її зарядки і

розрядки; σ - показник, що характеризує швидкість саморозряду батареї (для більшості батарей цей показник не перевищує 5 - 6% на місяць, але цей факт призводить як до скорочення терміну служби батарей, так і до зниження їх ємності щодо номінального значення і повинно враховуватися для деяких додатків.

2.2 Особливості інтеграції мікросистем в розподільні мережі

Інтеграція в мікросистеми ВДЕ зі змінною вихідною потужністю перетворила традиційну генерацію електроенергії з керованих та диспетчеризованих ресурсів на некеровані та недиспетчеризовані. Крім того, стохастична природа навантажень, що ускладнюється появою в їх структурі зарядних станцій електромобілів, робить процес споживання енергії ще більш непередбачуваним. Таким чином, мікросистеми стикаються із серйозною проблемою балансування попиту та пропозиції, а, відповідно, з забезпеченням стійкості та належної якості електропостачання.

Якість електроенергії в електричній мережі визначається, насамперед, як підтримка частоти та величини напруги в межах допустимого діапазону значень при забезпеченні його синусоїдальної форми.

Остання умова є досить актуальною, оскільки більшість джерел РГ приєднуються до мережі через обладнання силової електроніки. Нелінійна вольт-амперна характеристика таких джерел генерування з інверторним інтерфейсом породжує гармоніки в системі. Крім цього, велика частка РГ у мікросистемах, які в основному являють собою ВДЕ, може значно погіршити якість електроенергії через нестабільний характер генерованої ними потужності. Нарешті, нелінійні та стохастично змінювані навантаження, споживачі зі значним споживанням реактивної потужності та перехід від режиму роботи паралельно з енергосистемою до ізольованої роботи є додатковими факторами, які призводять і до таких проблем з якістю

електроенергії в мікросистемах як коливання потужності, а, відповідно, і напруги, провалів та стрибків напруги, низькому коефіцієнту потужності.

Тому різке зниження/підвищення напруги у споживачів може розглядатися як проблема якості електроенергії. Зокрема, провал напруги виникає, коли потужність недостатня для задоволення попиту. Підвищення напруги відбувається через появу зворотного потоку потужності, коли, наприклад, локальна генерація перевищує споживання. Спільно з коливаннями напруги, що мають місце, дані фактори можуть призвести до відключення або неправильної роботи електромережевого обладнання.

За таких ситуацій, як дефіцит реактивної потужності, динамічна зміна навантаження та генерування електроенергії традиційне використання пристроїв РПН та інших регуляторів напруги може спричинити його нестабільність. Тому необхідний інший механізм підтримки відхилень напруги в припустимому діапазоні задля стабільної роботи мікросистем.

Слід зазначити, що, оскільки в мікросистемі відношення активного опору лінії до її реактивного опору (R/X), на відміну від системи передачі електроенергії, є значним, вплив активної та реактивної потужності на частоту та напругу не пов'язані між собою [8].

Оскільки мікросистема може працювати як у режимі підключення до мереж енергосистеми так і в острівному (ізолюваному) режимі, її стійкість вивчається для кожного із зазначених режимів окремо.

У режимі підключення до мережі мікросистема поглинає енергію з енергосистеми, коли виникає дефіцит потужності з боку її джерел, що генерують, і відправляє її назад в мережу, коли в ній виникає надлишкове вироблення енергії. У цьому випадку енергосистема компенсує невідповідність між генерацією та навантаженням та забезпечує стабільність частоти. Отже, в режимі підключення до мережі основною проблемою є не стабільність частоти, а стабільність напруги. У зв'язку з цим аналіз малих та великих збурень (перехідних процесів) виконується, як правило, лише для режиму напруги.

2.3 Особливості автономної роботи мікросистем

Процеси проектування, керування та експлуатації електричних мереж з інтегрованими ВДЕ і особливо мікросистем пов'язані з труднощами, зокрема, через нестабільність потужності генерованої ВДЕ, невизначеність графіків навантаження, низьку механічну інерцію, що створюється джерелами розподіленої генерації з інверторним інтерфейсом. Особливо це стосується умов, коли мікросистеми переходять до автономного режиму роботи.

Умови забезпечення стійкості роботи мікросистем відрізняються від відповідних походів, які застосовуються до традиційних електричних мереж через відсутність запасу інерції з боку джерел розподіленої генерації з інверторним інтерфейсом [9]. Ця особливість призводить до ускладнення управління роботою мікросистем та забезпечення її стійкості.

Загальновідомо, що кінетична енергія компенсує короточасні невідповідності попиту та пропозиції у часі та, таким чином, підтримує стабільність напруги та частоти мережі. Традиційна енергосистема зберігає значну кількість кінетичної енергії в масі, що обертається, за рахунок безлічі підключених генераторів, що і сприяє стабільності роботи мережі, в той час як безінерційні джерела розподіленої генерації такою властивістю не володіють.

В ізолюваному режимі, оскільки мікросистема електрично незалежна від основної мережі, вона відповідає за підтримку стабільності як напруги, так і частоти.

Вже наявний певний досвід експлуатації мікросистем показав, що основні проблеми, пов'язані з їх керуванням, і які включають, насамперед, питання забезпечення стабільності напруги і частоти, дотримання інших показників якості електроенергії та вимог до надійності електропостачання, можна значною мірою вирішити, включивши в їх структуру системи

накопичення енергії й орієнтуючись на одночасне використання різних поновлюваних джерел розподіленої генерації [10].

Пропозиції щодо застосування систем накопичення енергії як перспективне ефективне вирішення проблем експлуатації мікросистем, включаючи такі аспекти, як якість електроенергії, динамічна стійкість, надійність і керованість за наявності великого обсягу ВДЕ робилися багатьма авторами. Тут СНЕ розглядалися як певний енергетичний буфер, що використовується з метою компенсації уривчастості генерації з боку поновлюваних джерел енергії, зменшення впливу невизначеності навантаження та підвищення стабільності роботи мікросистеми, забезпечуючи віртуальну інерцію.

Таким чином, можна припустити, що накопичення енергії стане відповідним рішенням для мікросистем, що дозволяє усунути невідповідність між важко передбачуваним попитом на електроенергію та такою самою непередбачуваною її генерацією з боку ВДЕ.

У цьому плані системою накопичення енергії як джерелом активної та реактивної потужності можна управляти таким чином, щоб досить швидко (з адекватною динамікою) компенсувати дисбаланс активної та реактивної потужностей, що виникає в мікросистемі.

Система накопичення енергії може діяти як джерело віртуальної інерції у мікросистемах для підвищення стабільності частоти за рахунок компенсації низької інерції ВДЕ [11]. Тобто енергія, що зберігається в них, емулює кінетичну енергію, запасену в роторі синхронного генератора, яка може бути вивільнена у разі збурення або різкого дисбалансу між попитом і пропозицією. Акумуляторні системи накопичення енергії, суперконденсатори, надпровідні магнітні накопичувачі енергії (SMES) та накопичувачі енергії на маховиках (FES) завдяки їхній швидкій динаміці є придатними засобами для демпфування коливань частоти в мікросистемах.

Інерція системи визначається як опір змінам частоти системи за рахунок накопичення/введення кінетичної енергії з/в систему під час

дисбалансу потужності, що надходить від синхронно підключеної машини, що обертається.

Кінетична енергія системи (E_k) розраховується як:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \right),$$

де J і ω_{mi} - момент інерції (кг м²) і кутова швидкість ротора i -ї машини, що обертається відповідно, n - загальна кількість машин.

Загальна характеристика інерції системи є відношенням загальної накопиченої кінетичної енергії в МД при синхронній швидкості до номінального значення МВА базової системи:

$$H_{sys} = \frac{E_k}{S_{base}} = \frac{\omega_{sm}^2}{2S_{base}} \sum_{i=1}^n J_i,$$

де S_{base} - базова характеристика (МВА) системи, а ω_{sm} - синхронна швидкість системи (рад/с).

Видно, що загальна інерція системи залежить від кількості машин, що обертаються, об'єднаних у системі, а також кінетичної енергії, що накопичена в їх обертовій масі. Для порівняння, миттєвий фізичний запас силового перетворювача (незалежно від того, що підключено на стороні джерела) є енергією, яка накопичена в його конденсаторі на стороні постійного струму, і є незначною у порівнянні з інерцією обертання синхронних машин.

Початкове значення, так званого, показника ROCOF (Rate-Of-Change-Of-Frequency), що визначається величиною дисбалансу потужностей та інерцією системи, може бути виражене як:

$$ROCOF = \frac{f_0}{2H_{sys}} \times \frac{\Delta P}{S_{base}} = \frac{f_0 \times \Delta P}{2E_k},$$

де ΔP – розмір збурення, а f_0 – номінальна частота системи.

Очевидно, що початкове значення показника ROCOF більше, якщо більше збурення потужності або менше енергія, що накопичена в системі. Оскільки найбільш традиційні генератори замінюються джерелами з інтерфейсом перетворювача, величина H_{sys} і E_k знижується. Більш того, зростаюче енергоспоживання та стохастичний характер відновлюваної генерації викликають частіші та сильні порушення балансу потужності. Комбінація цих двох факторів може призвести до збільшення значення ROCOF і, отже, до погіршення стабільності мережі.

Традиційно відхилення частоти, викликане зміною потужності і позаштатними ситуаціями, компенсується первинним частотним регулюванням в основному за рахунок генераторів, що обертаються. Однак властива їм зона нечутливості та повільна реакція зазвичай призводять до видачі необхідної потужності приблизно через 10-20 с, що надто повільно для системи з низькою інерцією. За допомогою швидкодіючого джерела енергії, такого як СНЕ з інтерфейсом перетворювача, можна видавати потужність для ефективного пом'якшення коливань частоти та покращення показника ROCOF. Ряд технологій зберігання енергії, які є потенційними кандидатами для надання подібних послуг завдяки таким їх параметрам, як потужність/енергія, що запасуються, і час відгуку, наведені в Таблиці 2.2 [12].

Таблиця 2.2 – Варіанти застосування СНЕ для швидкого регулювання частоти

Технологія	Діапазон потужності	Діапазон ємності	Час відгуку	Час розрядження
Маховики	0,1 - 400	до 5	до 4 мсек	до 15 хвилин
Літій-іонні батареї	до 100	до 20	до 40 мсек	від хвилин до годин
Ванадієві редокс	до 3	до 60	до 40 мсек	від секунд до

проточні батареї				годин
Удосконалені свинцево кислотні батареї	до 40	до 40	до 40 мсек	від секунд до годин
Суперконденсатори	до 50	до 0,28	10 – 20 мсек	від мілісекунд до 1 години

Послуги з балансування режиму енергосистеми традиційно реалізуються на трьох рівнях відповідно до часових шкал і включають: первинне, вторинне та третинне частотне регулювання. Останнім часом у низці країн через прагнення зменшити інерцію було розроблено низку нових послуг з регулювання частоти, які характеризуються вимогою швидкого реагування, саме швидким відгуком на зміну частоти (FFR - fast frequency response).

Типовий принцип частотного регулювання відповідає природній реакції звичайного синхронного генератора. Зона нечутливості, коефіцієнт спаду, швидкість відгуку та тривалість є тут основними параметрами при вирішенні питань регулювання частоти. Зона нечутливості - це робоча область, зосереджена навколо номінальної частоти, в якій контролер установки не регулюватиме свою потужність у відповідь на відхилення частоти. Вона є природною властивістю звичайних генераторів через їх механічні характеристики.

В даний час підвищення точності управління та використання силових перетворювачів (особливо для асинхронних генераторів) може значно зменшити зону нечутливості, в той час як заздалегідь задана зона нечутливості, як і раніше, широко використовується для зменшення зносу обладнання.

З точки зору мережі, більш вузька зона нечутливості та менший коефіцієнт посилення регулювання можуть збільшити внесок установок що генерують та покращити стабільність частоти електромережі. Однак, з

іншого боку, вони можуть викликати надмірне зношування машин, що обертаються, і прискорену деградацію електрохімічних систем акумулювання.

Коефіцієнт статизму, що визначається згідно за виразом

$$S[\%] = \frac{\Delta f_{y\partial}}{\Delta P_{y\partial}} \times 100.$$

відображає характер зміни потужності генератора відповідно до відхилень частоти.

Діапазон зміни коефіцієнта статизму зазвичай визначається оператором систем передачі. Постійна зміна потужності на всіх генераторах гарантує, що вони роблять свій внесок у первинне регулювання частоти відповідно до своїх параметрів. У ринкових умовах коефіцієнт статизму може регулюватися (в межах певного діапазону) власником/оператором генератора залежно від бажання надати більший чи менший резерв потужності.

Швидкість відгуку частотної характеристики в основному визначається часовою затримкою (T_{delay}) та швидкістю наростання (K_p) потужності. Часова затримка включає час вимірювання, передачі та активації пристрою.

Висока швидкість наростання має велике значення для корисності послуги регулювання частоти, отже, системи накопичення енергії, пов'язані з перетворювачем потужності, є дуже придатними засобом реалізації послуги швидкого відгуку на зміну частоти (FFR).

Висновки до розділу 2

Досліджено загальні підходи до побудови моделей низки характерних складових мікросистем, з метою пояснення принципових підходів до оптимізації режимів роботи за різних стратегій їх застосування.

Обґрунтовано доцільність створення гібридних мікросистем з одночасним залученням низки різноманітних технічних засобів генерування та накопичення енергії, що дозволяє найбільш ефективно вирішувати проблеми пов'язані з інтеграцією відновлюваних енергетичних ресурсів в розподільні мережі та здійснювати керування їхніми режимами.

3. ГІБРИДНІ МІКРОСИСТЕМИ

3.1 Загальні принципи побудови та керування роботою гібридних мікросистем

Багато фахівців сходяться на думці, що з метою компенсації можливого негативного впливу ВДЕ, найбільш перспективною формою використання локальної генерації є формування гібридних мікросистем, коли вони включають до своєї структури як традиційні джерела розподіленої генерації змінного струму, так і альтернативні джерела постійного струму.

У зазначених умовах роль системи управління роботою мікросистеми полягає у підтриманні необхідних потоків потужності при оптимізації цільових функцій, наприклад, таких як витрата палива, ефективність й загальні експлуатаційні витрати. Однак гібридна архітектура (змінний/постійний струм) та мультирежимність суттєво ускладнюють вирішення цього завдання [13]. По-перше, гібридні мікросистеми вимагають належної координації роботи генераторів змінного та постійного струму. По-друге, балансування попиту та пропозиції при переході від підключення до мережі до ізолюваного режиму роботи має бути таким, щоб зробити цей перехід плавним. Нарешті, включення до мікросистем ВДЕ з непостійною вихідною потужністю, таких як сонячні панелі та вітрогенератори, а також зростання стохастично-невизначених навантажень, зокрема, таких як електромобілі, створює проблеми для управління енергоспоживанням, перетворюючи, в загальному випадку, цю процедуру у складне багатокритеріальне завдання оптимізації.

Однак і така форма використання розподіленої генерації не є всеосяжним рішенням усіх зазначених вище проблем.

Численні дослідження, а також вже накопичений певний досвід багатьох країн свідчать, що впровадження систем накопичення енергії (СНЕ)

може бути важливим напрямом для підвищення загальної ефективності роботи розподільної мережі, використання її пропускнуєї спроможності, оптимізації сукупності режимних показників (які характеризують втрати потужності, надійність, якість електричної енергії, зокрема, такі як відхилення й коливання напруги та частоти), вирівнювання графіків навантаження і згладжування його піків, полегшення інтеграції відновлюваних джерел енергії, зниження витрат на розвиток мереж та їх обслуговування, скорочення викидів парникових газів.

При цьому необхідно ретельно враховувати всі складові безпосередньо або опосередковано пов'язані з потенційними перевагами, що є особливо важливим при плануванні використання СНЕ саме в розподільних мережах. Більш того, вибір СНЕ для визначення оптимальних параметрів та порівняння його з альтернативними варіантами з погляду вартості та продуктивності може допомогти визначити і оптимальне місце їх розміщення.

Наведені міркування ще раз свідчать щодо доцільності використання гібридних мікросистем, де передбачається об'єднання та скоординоване використання, у загальному випадку, різнорідних поновлюваних (недиспетчеризованих) та диспетчеризованих джерел енергії, систем накопичення енергії та керованих навантажень. У режимі підключення до енергосистеми мікросистема забезпечує баланс попиту та пропозиції на електроенергію, купуючи потужність з енергосистеми або продаючи надлишкову потужність, щоб максимізувати свої експлуатаційні переваги. Для пом'якшення коливань потужності недиспетчеризованих блоків розподіленої генерації у мікросистемах використовуються можливості регульованих джерел, зарядка та розрядка СНЕ, потенціал управління навантаженням [14].

Для ефективного використання гібридної мікросистеми необхідно створення стратегії управління, що забезпечує гармонійну взаємодію між

усіма її контрольованими компонентами для досягнення стабільної та економічної роботи.

З цією метою нижче запропоновано дворівневий підхід до прийняття рішень при реалізації управління роботою мікросистеми, що включає рівень планування і рівень диспетчеризації (оперативного управління).

На рівні планування визначається економічно обґрунтована та технічно припустима схема (алгоритм) роботи мікросистеми, що, по суті, полягає у знаходженні стану та параметрів всіх елементів керованого блоку мікросистеми на основі прогнозування на добу вперед значень навантажень та вихідних потужностей відновлюваних джерел енергії шляхом використання відповідних оптимізаційних методів.

При цьому, враховуючи неминучість наявності похибки, що виникає у процесі реалізації процедури прогнозування, на цьому етапі, власне, формується лише орієнтовний сценарій роботи керованих елементів мікросистеми на добу вперед.

На рівні диспетчеризації реалізується управління роботою мікросистеми, пов'язане з коригуванням керуючих впливів на окремі її компоненти у зв'язку з різницями між прогнозними і фактичними (одержуваними в реальному часі) значеннями параметрів режиму.

Як бачимо питання прогнозування на етапі планування займають особливе місце у реалізації цього підходу до управління роботою гібридної мікросистеми. У загальному випадку йдеться про прогнозування кількох груп параметрів: навантажень споживачів, вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, ринкову вартість електроенергії та надання інших допоміжних послуг. Крім того, що для прогнозування кожної групи параметрів найбільш ефективними є різні методи, всі вони мають певну похибку, яка до того ж не є постійною протягом доби.

3.2 Прогнозування умов функціонування мікросистем

На сьогодні немає єдиного стандарту для класифікації методів прогнозів навантажень. Однак, перш за все, можна диференціювати зазначені методи з точки зору тривалості прогнозу на три категорії: короткострокові прогнози, середньострокові прогнози і довгострокові прогнози. Ряд фахівців поділяють методи прогнозування навантаження на чотири групи [15], додаючи до наведеного переліку ще й категорію дуже короткострокового прогнозування. При цьому:

- довгострокове прогнозування навантаження (*LTLF* - Long-term load forecasting) орієнтоване на період від одного року до десятків років. Цей тип прогнозу є принциповим для стратегічного планування, введення нових потужностей і розвитку систем передачі і розподілу електроенергії (генеруючі блоки, лінії передачі і розподілу електроенергії, а, відповідно, і її акумулювання, трансформатори підстанцій і т.ін.).

- середньострокове прогнозування навантаження (*MTLF* - Medium-term load forecasting) зазвичай розглядає період часу від тижня до року.

- короткострокове прогнозування навантаження (*STLF* - Short-term load forecasting) включає інтервали часу від однієї години до тижня.

- ультра / дуже короткострокове прогнозування навантаження (*VSTLF* - Ultra / very short-term load forecasting) при якому період упередження коливається від декількох секунд до години і результати використовуються в основному для управління в реальному часі.

Хоча для прогнозування навантаження були розроблені численні методи і моделі, пошук найбільш підходящої моделі прогнозування для конкретного об'єкта - непросте завдання, і жоден з існуючих методів не може бути узагальнений для всіх типів навантажень. Моделі прогнозування електричного навантаження можна розділити на два типи:

- багатofакторні методи прогнозування,
- методи прогнозування часових рядів.

Методи багатофакторного прогнозування орієнтовані на пошук причинно-наслідкових зв'язків між різними факторами, які впливають на певний процес, і значеннями прогнозу. З іншого боку, методи прогнозування часових рядів більше залежить від ретроспективних даних. Відповідно, багато дослідників орієнтуються на використання методів прогнозування часових рядів для прогнозування електричного навантаження, щоб уникнути складних обчислень і обліку часто необ'єктивних факторів, які можуть вплинути на створення точної моделі прогнозування з використанням методу багатофакторного прогнозування. Таким чином, методи прогнозування часових рядів за структурою набагато простіше і працюють швидше. Моделі прогнозування часових рядів, які найбільш часто і широко застосовуються на практиці, можна розділити на три категорії:

- статистичні моделі,
- моделі машинного навчання,
- гібридні моделі.

Ранні моделі прогнозування електричного навантаження майже повністю обмежувалися традиційними статистичними методами, але з розвитком науки, технології прогнозування навантаження отримали значний розвиток. Останнім часом все більш популярними в прогнозуванні електричних навантажень стають моделі прогнозування, засновані на теорії машинного навчання.

Статистична модель - це математична модель, яка втілює набір статистичних припущень, що стосуються генерації вибірових даних. Вона являє собою процес генерації даних в значно ідеалізованої формі. Статистична модель зазвичай визначається як математична зв'язок між однією або кількома випадковими величинами та іншими не випадковими величинами. Було розроблено безліч статистичних моделей для прогнозування згідно з певними критеріями оптимальної відповідності:

- базові моделі Бокса-Дженкінса - моделі авторегресії (AR, MA, ARMA, ARIMA, ARMAX і ARIMAX);

- алгоритми фільтрації Калмана в просторі станів;
- моделі експоненціального згладжування.

Основна ідея моделей авторегресії полягає в тому, що поточне значення ряду виражається як лінійна комбінація попередніх / минулих навантажень, а потім модель авторегресії (AR) може використовуватися для прогнозування майбутніх значень навантаження. Модель авторегресії p -го порядку, $AR(p)$, визначається як:

$$y_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} = \varepsilon_t,$$

де $\varphi_1, \dots, \varphi_p$ - невідомі коефіцієнти AR, а ε_t - випадковий білий шум.

Порядок моделі говорить про те, скільки значень з запізненням пов'язано з минулим. Таким чином, модель AR може передбачати майбутню поведінку на основі минулої поведінки. Вона використовується для прогнозування, коли є певна кореляція між поточними значеннями в часовому ряду y_t і його минулими значеннями, де y_t також порушується випадковим шумом ε_t . Моделі авторегресії включають:

Модель ковзного середнього (MA - Moving Average)

Модель ковзного середнього, яка імітує поведінку процесу зміни ковзного середнього, являє собою модель лінійної регресії, яка регресує поточні значення в порівнянні з білим шумом одного або декількох минулих значень. Тобто модель ковзного середнього також можна розглядати як модель, в якій часовий ряд представляється ковзними середніми (нерівномірно зваженими) випадкового ряду змін ε_t . Таким чином, модель ковзного середнього порядку q «MA(q)» задається наступним чином:

$$y_t = \varepsilon_t \sum_{i=1}^q \varphi_i \varepsilon_{t-i}.$$

Модель авторегресійного ковзного середнього (ARMA - Autoregressive Moving Average)

Авторегресійна ковзна середня була запропонована в 1970 році Боксом і Дженкінсом. Моделі $ARMA(p, q)$ являють собою комбінацію моделей авторегресії $AR(p)$ і моделей ковзного середнього $MA(q)$. У моделях $ARMA$ поточне значення y_t виражається лінійно через його минулі значення і через поточні, а так само попередні значення шуму.

Математично модель $ARMA(p, q)$ записується як

$$y_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \varphi_i \varepsilon_{t-i}.$$

Моделі $ARMA$ стали популярними і широко застосовувалися в дослідженнях прогнозування навантаження через їхню відносну простоту та ефективність.

Модель авторегресійного інтегрованого ковзного середнього (ARIMA - Autoregressive Integrated Moving Average)

Моделі AR , MA або $ARMA$, розглянуті вище, можуть використовуватися тільки для даних стаціонарних часових рядів. Хоча на практиці у багатьох випадках часові ряди, мають нестаціонарний характер. При цьому модель $ARMA$ неадекватна для належного опису нестаціонарних часових рядів. Тому Боксом і Дженкінсом в 1976 році були запропоновані моделі $ARIMA$ з метою можливості обліку нестаціонарності. Моделі $ARIMA$ Бокса - Дженкінса мають три типи параметрів: параметри авторегресії ($\varphi_1, \dots, \varphi_p$), параметри ковзного середнього ($\theta_1, \dots, \theta_q$) і кількість різниць d , приведених до $(1 - B)$, де B являє собою оператор запізнювання. Математичне формулювання моделі $ARIMA(p, d, q)$ з використанням поліномів запізнювання наведена нижче:

$$\left[1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i B^i \right] [1 - B]^d y_t = \left[1 + \sum_{j=1}^q \theta_j B^j \right] \varepsilon_t,$$

де p являє порядок авторегресії, q - члени ковзного середнього, а d - кількість різниць, щоб зробити вихідний часовий ряд стаціонарним. Як зазначено в численних джерелах, моделі *ARIMA* і їх варіанти широко і успішно застосовувалися при прогнозуванні електричних навантажень.

Алгоритм фільтрації Калмана в просторі станів (KF - Kalman Filtering Algorithm)

Прогнозування, особливо довгострокове, характеризується високим рівнем невизначеності через його високу залежність від соціально-економічних чинників, що передбачає досить високий рівень похибки (до 10%). У цьому дусі застосування алгоритму фільтрації Калмана може мінімізувати середнє значення квадратичної помилки моделі. Фільтр Калмана - це набір математичних рівнянь в просторі станів, які можуть забезпечити ефективні обчислювальні засоби для оцінки стану процесу, який досліджується. Даний метод дуже ефективний в декількох аспектах: він підтримує оцінки минулого, сьогодення і майбутнього станів, а також може робити це, навіть коли невідома точна природа системи, що моделюється.

Експоненціальне згладжування (ES - Exponential Smoothing). Експоненціальне згладжування - це підхід, при якому прогноз може бути виконаний на основі експоненціально зваженого середнього значення минулих спостережень. Найвища вага надається поточному спостереженню, менша вага - попереднього виміру, ще менша вага - вимірювання перед цим і так далі (тобто ми маємо справу з експоненціальним спадом впливу минулих історичних даних). Моделі *ES* є одними з найбільш поширених методів статистичного прогнозування через їх точність, простоту, надійність і невеликі трудовитрати. У відповідних дослідженнях підкреслюється, що точність моделі багато в чому залежить від значень коефіцієнтів згладжування. При цьому продемонстровані підходи пошуку найкращих значень цих коефіцієнтів.

Загалом, існує три різних методи експоненціального згладжування: просте одинарне експоненціальне згладжування (*SES* - single exponential

smoothing) (метод Брауна), подвійне експоненціальне згладжування (*DES* - double exponential smoothing) (метод Холта) і потрійне експоненціальне згладжування (*TES* - triple exponential smoothing) (метод Холта-Вінтерса).

Модель *SES* вимагає невеликого обсягу розрахунків і використовується, коли шаблон даних не має ні циклічних або сезонних коливань, ні певної тенденції в ретроспективних даних. З іншого боку, моделі *DES*, які особливо широко використовуються в економіці, дозволяють прогнозувати значення з урахуванням тренда. Нарешті, моделі *TES* мають два можливих режиму обчислень: адитивний і мультиплікативний. Адитивна модель використовується, якщо вихідні дані показують стабільні сезонні коливання. І навпаки, мультиплікативні моделі використовуються, коли вихідні дані відображають значні варіації сезонних коливань.

Традиційні статистичні моделі обмежені в своїх можливостях і іноді можуть призводити до незадовільних рішень. Причина в необхідності великих обчислювальних ресурсів, що призводить до великих витрат часу для рішення задачі і складності обробки деяких нелінійних шаблонів даних. В цьому випадку машинне навчання і методи, засновані на штучному інтелекті, можуть явити собою багатообіцяючу і привабливу альтернативу. Серед них найбільш поширеними є наступні.

Штучні нейронні мережі (*ANN* - Artificial Neural Network). По суті, нейронна мережа являє собою структуру, яка здатна виконувати апроксимацію нелінійної кривої. У цьому процесі *ANN* намагаються розпізнати закономірності в зміні вхідних даних, вчать на власному досвіді, а потім надають узагальнені результати на основі своїх отриманих раніше знань. *ANN* складається з декількох взаємопов'язаних елементів, які називаються нейронами і змінюють свій динамічний стан у відповідь на зовнішні вхідні сигнали.

ANN може бути математично описана в наступній формі [16]:

$$y(t) = f_{NARX} [u_1(t), u_1(t-1), \dots, u_1(t-n_{u1}), u_2(t), u_2(t-1), \dots, u_2(t-n_{u2}), y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y)]$$

Метод опорних векторів (SVM - Support Vector Machines). За останні два десятиліття SVM привертає дедалі більшу увагу не тільки для розпізнавання образів і регресійного аналізу, але також для цілей прогнозування і рішення задач аналізу часових рядів. Основна мета SVM - вивести конкретне правило прийняття рішення з задовільною здатністю до узагальнення, шляхом вибору деякої конкретної підмножини навчальних даних, які називають опорними векторами.

При побудові SVM-моделі здійснюється процес навчання, який можна порівняти з рішенням завдання квадратичного програмування з лінійними обмеженнями. Отже, на відміну від навчання інших мереж, рішення SVM завжди виявляються оптимальними і унікальними в глобальному масштабі. З іншого боку, основна слабкість SVM полягає в тому, що він вимагає величезної кількості обчислень, і, отже, час реалізації завдання радикально збільшується.

Нечітка логіка (FL - Fuzzy Logic). Нечітка логіка знайшла дуже широке застосування у багатьох технічних додатках, про що свідчить велика кількість публікацій. Використання нечіткої логіки дозволяє виводити залежності на основі зашумлених або нечітких входів без необхідності вказувати точне відображення входів в виходи.

Моделі нечіткої логіки застосовувалися як для короткострокового [17], так і довгострокового прогнозування навантаження [18].

На даний момент в електроенергетиці прогнозування виробництва електроенергії відновлюваними джерелами енергії не може спиратися на одну до кінця обґрунтовану і перевірену методику, що пов'язане найчастіше з великими похибками, що подекуди перевищують 60% по відношенню до фактичних даних. При цьому цікаво відзначити, що прогноз на більш тривалий період, як правило, дає більш точний результат. Аналогічно прогноз для конкретної точки прив'язки має велику похибку в порівнянні з прогнозами, виконаними для деякої області.

У загальному випадку, математичні моделі, які використовуються для цих цілей, можна розділити на кілька категорій, зокрема, фізичні, статистичні, адаптивні і гібридні.

Фізичні (або чисельні) моделі (методи) трансформують метеорологічні дані (наприклад, температуру, тиск, швидкість і напрям вітру з урахуванням рельєфу поверхні і існуючих перешкод) в числові дані для прогнозу специфічних місцевих погодних умов, які потім можуть бути перетворені в прогнози по виробництву енергії.

Статистичні моделі описують взаємозв'язок між метеорологічними чинниками (отриманим з використанням чисельного прогнозу погоди) і генерацією електроенергії шляхом статистичного аналізу часових рядів ретроспективних даних без безпосереднього врахування фізичних факторів.

Адаптивні моделі використовують системи штучного інтелекту з метою визначення зв'язків між прогнозованими погодними умовами і вихідною потужністю станцій.

Нижче представлений стислий огляд і аналіз найбільш поширених методів, які використовуються для прогнозування вихідної потужності вітро - та сонячних станцій.

Крім технічних особливостей самих вітротурбін, основним параметром, який впливає на вироблення електроенергії на вітростанціях, є середньорічна швидкість вітру в регіоні. Швидкість вітру та її циклічність залежать від безлічі факторів.

Для швидкості вітру в одній і тій же місцевості характерні сезонні і добові варіації, причому мають місце як короткострокові, так і довгострокові тенденції. Оскільки в вітроенергетичних розрахунках енергія вітру пропорційна його швидкості в кубі, її визначення і аналіз метеорологічних розрахунків при підготовці проектів є вкрай важливими.

Річна повторюваність вітру досить часто, особливо в зарубіжній практиці, апроксимується розподілом Вейбулла або його модифікованим варіантом - розподілом Вейбулла - Гудріча:

$$F(v) = k_{\phi} \frac{v^{\kappa-1}}{A_{\kappa}} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^{\kappa}},$$

де k_{ϕ} - параметр форми (залежить від району місцевості і в загальному випадку $k_{\phi} = 2$); A - параметр масштабу (залежить від середньої швидкості вітру, $A \approx 1,13 v$).

У вітроенергетиці, на відміну, скажімо, від гідроенергетики, дуже великий вплив мають місцеві особливості формування вітрового режиму, тому спроби створити універсальні моделі розподілу можуть не забезпечити необхідну точність, хоча і мають досить широку практику застосування, найчастіше через брак фактичних даних спостережень.

Розподіл швидкості вітру по висоті при високих швидкостях і досить однорідною поверхнею може бути апроксимована ступеневою функцією виду:

$$U(H) = U_{\phi} \left(\frac{H}{h} \right)^m,$$

де $U(H)$, U_{ϕ} - швидкості вітру на висоті H і висоті флюгера h ; показник ступеня $m = f(U)$ в загальному випадку залежить від швидкості вітру, рельєфу місцевості і шорсткості поверхні. При вітроенергетичних розрахунках показник ступеня m приймають за наступною залежністю від швидкості вітру (табл. 1).

Таблиця 3.1 – Значення показника m в залежності від швидкості вітру

Швидкість вітру на висоті флюгера U_{ϕ} м/сек	Показник ступеня m
0 – 3,0	0,35

3,5 – 4,0	0,25
4,0 – 4,5	0,2
5,5 – 6,0	0,18
6,0 – 11,5	0,14
12,0 – 12,5	0,13
13,0 – 15,0	0,125
> 15,0	0,12

Вироблення електроенергії на сонячних електростанціях залежить від кількості надходження сонячної радіації на приймачі установки. Вихідними даними для будь-яких оцінок розподілу сонячної радіації є дані спостережень про сумарну, розсіяною і пряму радіації на актинометричних станціях, що вимірюють величину випромінювання.

Весь потік сонячного випромінювання досягає поверхні у вигляді прямої, відбитої і розсіяної сонячної радіації.

Одним з найбільш поширених універсальних методів розрахунку щільності потоку сумарної сонячної радіації є статистична модель, яка пов'язує середню щільність потоку сонячної радіації в ясний день, частку можливого числа годин сонячного сяйва і має вигляд:

$$H_{cp} = H_0 \left(a + b \frac{n_{cp}}{N} \right),$$

де H_{cp} - середнє значення щільності потоку радіації на горизонтальній поверхні, H_0 - щільність потоку радіації на горизонтальній поверхні в ясні дні; n_{cp} - середньодобове число годин сонячного сяйва, N - максимальне число годин сонячного сяйва; коефіцієнт a - частка сумарної радіації, пропущеної хмарами; коефіцієнт b - частка затриманої хмарами сумарної радіації (коефіцієнти знаходяться за допомогою відповідного рівняння регресії).

Параметри H_0 і b змінюються в залежності від координат місцевості.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left\{ \left[1 + 0,0033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi\omega_s}{365} \sin \varphi \sin \delta \right] \right\},$$

де I_{sc} - сонячна постійна (solar constant), в годину; φ - широта місцевості; n - порядковий номер дня року; δ - схилення; ω_s - годинний кут сходу сонця (solar).

Схилення сонця можна обчислити таким чином:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right).$$

Часовий кут обчислюється так:

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta.$$

Для розрахунку добових сум прямий і розсіяної сонячної радіації на горизонтальну поверхню для безхмарного неба може бути застосована формула:

$$Q_{\text{вoзм}}^{\text{доб}} = \int_{t_{\text{con}}^6}^{t_{\text{con}}^3} [S_{\text{вoзм}}(t_{\text{con}}) + D_{\text{вoзм}}(t_{\text{con}})] dt_{\text{con}},$$

де t_{con}^3 і t_{con}^6 - справжній сонячний час сходу і заходу сонця, ч; $S_{\text{вoзм}}$ - пряма сонячна радіація для безхмарного неба, Вт / м • м; $D_{\text{вoзм}}$ - розсіяна сонячна радіація для безхмарного неба, Вт / м • м; t_{con} - сонячний час, ч.

Коли поверхня приймача розташована під кутом до горизонту, сонячне випромінювання, що надходить, складається з прямої радіації, розсіяної сонячної радіації і сонячного випромінювання, відбитого від поверхні Землі, яке бачить нахилена поверхня приймача.

При достатній кількості вихідної інформації величину добової сумарної сонячної радіації на похилу поверхню розраховують по узагальненій моделі:

$$Q_{\text{накл}}^{\text{доб}} = S_{\text{накл}}^{\text{доб}} + D'_{\text{накл}}^{\text{доб}} + D''_{\text{накл}}^{\text{доб}},$$

де $S_{\text{накл}}^{\text{доб}}$ - добова сума прямої сонячної радіації на похилу поверхню, Дж; $D'_{\text{накл}}^{\text{доб}}$ - добова сума розсіяної сонячної радіації на похилу поверхню, відбита небокраєм, Дж; $D''_{\text{накл}}^{\text{доб}}$ - добова сума розсіяної сонячної радіації на похилу поверхню від Землі, Дж.

Потік сумарної радіації від трьох джерел, що падає на похилу поверхню в будь-який момент часу, може обчислюватися за формулою:

$$H_T = H_{dr} R_{dr} + H_{dr} \frac{1 + \cos s}{2} + (H_{dr} H_{df}) \frac{(1 - \cos s) \rho}{2},$$

де H_{dr} , H_{df} - пряма і розсіяна (diffuse) складові сонячної радіації на горизонтальній поверхні, R_{dr} - поправочний коефіцієнт; s - кут нахилу між розглянутої площиною і горизонтальною поверхнею; ρ - відбиваюча здатність Землі (0,2 при відсутності снігу і 0,7 - при наявності снігового покриву).

Поправочний коефіцієнт можна знайти, використовуючи вираз:

$$R_b = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(\varphi - s) \cos \delta \cos \omega_s + \sin(\varphi - s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \varphi \sin \delta},$$

де s - кут нахилу між розглянутої площиною і горизонтальною поверхнею; ω_s - годинний кут.

Вже зазначалося, що моделювання сонячного випромінювання, яке поступає на земну поверхню доцільно розбити на дві частини:

- детермінована частина (розрахунок денних сум сонячної радіації для безхмарного неба);
- стохастична частина (визначення коефіцієнта ослаблення сонячної радіації хмарністю або модель хмарності).

Найчастіше єдиними джерелами, на яких може ґрунтуватися прогноз, є багаторічні статистичні картографічні дані місячних сум сумарної

середньодобової сонячної радіації і виміряні дані про погоду на місці розташування вимірювального пристрою.

Такий прогноз може бути реалізований наступним чином. На підставі теоретичного графіка надходження сонячної енергії для безхмарного неба $S_{\text{бн}}(t)$ і картографічних даних середньодобової інсоляції $S_{\text{стат}}$ для даного географічного місця за кожен місяць можна побудувати усереднений графік через введення відповідного коефіцієнта, який визначається наступним чином:

$$K = \frac{\overline{S_{\text{стат}}}}{\int_{t_{\text{в}}}^{t_{\text{з}}} S_{\text{бн}}(t) dt} = \frac{\overline{S_{\text{стат}}}}{Q_{\text{возм}}^{\text{доб}}},$$

де $Q_{\text{возм}}^{\text{доб}}$ - величина денної сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню для безхмарного неба; $t_{\text{в}}$, $t_{\text{з}}$ - час сходу і заходу сонця.

Тоді усереднений графік розраховується таким чином:

$$S_{\text{ср}}(t) = k \cdot S_{\text{бн}}(t).$$

При такому підході передбачається, що загальний вид функціональної залежності надходження інсоляції для безхмарного неба і загальний вигляд функціональної залежності надходження інсоляції для хмарного неба однакові. Так як коефіцієнт k протягом доби - величина непостійна, може бути схожим чином передбачено коригування коефіцієнта k на підставі оперативних даних надходження енергії $S_{\text{оп}}(t)$. При $|S_{\text{оп}}(t) - S_{\text{ср}}(t)| > \delta_{\text{откл}}$, де $\delta_{\text{откл}}$ - допустиме відхилення, обчислюється нове значення k :

$$k = \frac{S_{\text{оп}}(t)}{S_{\text{бн}}(t)}.$$

Часові інтервали t , через які здійснюється коригування графіка сонячної радіації, визначають виходячи з необхідної точності і довгостроковості прогнозу, ступеня стійкості надходження сонячної енергії.

При цьому, якщо для оцінки режимів роботи ВЕС можуть бути застосовані методи прогнозування, що дають досить точні результати з відносно невеликою похибкою, особливо для короткострокового прогнозування, то для СЕС провести якісне прогнозування значно складніше, оскільки обсяг їх генерації значно більше залежить від детальної інформації про ступінь, структуру, рівень і рух існуючих хмар в безпосередній близькості від енергогенеруючого об'єкта. Погодні умови безпосередньо в місці розміщення джерел генерації впливають як на рівень сонячної радіації, так і на вихідну потужність СЕС і кількість виробленої електроенергії протягом дня.

Прогноз обсягів вироблення електроенергії сонячною електростанцією – це, в першу чергу, прогнозування кількості сонячної радіації, яку отримають сонячні панелі. Вона залежить від безлічі факторів, основними з яких є кліматичні і метеорологічні умови - положення сонця на небі, тривалість світлового дня, хмарність, опади, сила вітру, температура навколишнього середовища і т.д.

Вибір методу прогнозу також залежить від того, які саме дані необхідно отримати в результаті. Наприклад, прогноз сумарного вироблення електроенергії за певний час (за годину, кілька годин або добу) або зміна обсягів генерації протягом певного відрізка часу вимагають використання різних математичних моделей і підходів.

В якості вихідних даних для статистичних моделей прогнозування використовують числову інформацію прогнозу погоди, зокрема дані про сонячне випромінювання і ретроспективні дані генерації електричної енергії СЕС. Зазначені моделі найчастіше застосовують для середньо- і довгострокового прогнозування.

У загальному випадку тут одним з найбільш популярних підходів до прогнозування генерації електроенергії СЕС є використання регресійних моделей, які дозволяють оцінити причинно-наслідкові зв'язки на основі наявних даних, розглядаючи при цьому досить велику кількість чинників, що впливають на прогноз, зокрема, метеорологічних факторів [29]. Методи засновані на теорії часових рядів набули широкого поширення при побудові короткострокових прогнозів генерації електричної енергії, оскільки СЕС мають досить великі обсяги ретроспективних даних, а методи даної групи націлені саме на обробку великих масивів інформації і дозволяють знаходити в них закономірності, а також використовувати ці закономірності при побудові моделей прогнозу. У багатьох роботах використовувався, зокрема, двоетапний метод прогнозування, де на першому етапі розрахунок здійснювався на основі, так званої, моделі «чистого неба», а на другому етапі застосовувалася авторегресійна модель в який і використовувалися показники чисельного прогнозу погоди.

Особливістю адаптивних моделей є можливість їх навчання на основі ретроспективних даних. Дані моделі на відміну від статистичних можуть неявно описувати складні нелінійні взаємозв'язки між погодними умовами і виробленням енергії СЕС. Основним фактором, що впливає на точність прогнозу, служать характер вибірки і структура вихідних даних, які використовуються для побудови моделі.

Наприклад, методи з використанням штучних нейронних мереж, знайшли поширення для вирішення як завдань короткострокового, так і середньо- і довгострокового прогнозування потужності СЕС. При цьому існує дуже велика кількість методів навчання мережі. Так, є приклади розв'язання задач прогнозування вихідних параметрів відновлюваних джерел енергії, де нейронна мережа була поєднана зі процедурою нечіткого логічного висновку. Особливістю інших робіт була попередня класифікація типів погоди (сонячно, хмарно, дощитиме) із застосуванням для кожного класу індивідуальних нейронних мереж різної структури. Перевагою

нейронних мереж є наявність алгоритмів швидкого навчання і можливість роботи за умов зашумлених вхідних даних.

Дійсно нейронні мережі - це дуже потужний інструмент для прогнозування параметрів в електроенергетичних системах, включаючи завдання прогнозування потужності СЕС. Це пов'язано з тим, що нейронна мережа є хорошим інструментом, коли існує складний і нелінійна зв'язок між даними без будь-яких попередніх припущень.

Метод опорних векторів є однією з популярних методологій навчання по прецедентах. Його основною перевагою є здатність отримання правильного рішення при наявності неповних й недостатньо коректних даних і можливість врахування великої кількості додаткових чинників, що впливають на якість прогнозу.

Гібридні моделі об'єднують різні методи з інших груп. При цьому дослідниками постійно пропонуються нові поєднання різних методів з метою підвищення точності прогнозування. Так для короткострокового прогнозування генерації СЕС використовувалася модель, де коефіцієнти прозорості та дифузії обчислювалися з використанням статистичних моделей, а інші параметри визначалися на основі фізичних моделей.

Таким чином, можна зробити наступні висновки. Застосування фізичних моделей не завжди виправдано через складність точного обліку багатьох чинників. Статистичні підходи мають більш високу точність при розрахунку сонячного випромінювання за тривалі періоди часу (день, місяць, рік), в той час як для більш коротких проміжків часу (секунди, хвилини, години), коли, наприклад, такі фізичні показники як хмарність не можуть бути усереднені для даних інтервалів часу, зазначені підходи демонструють значно меншу точність. У зв'язку з цим формується гібридна модель, де статистична модель адаптується до постійно змінних умов, які описуються фізичними моделями. Гібридні моделі мають перспективу, оскільки дозволяють врахувати специфіку фізичних процесів і одночасно використовувати можливості адаптивних методів.

Крім цього, як показує міжнародний досвід, в останні роки для прогнозування генерації СЕС з'явилася можливість використання супутникових систем для відстеження напрямку і швидкості переміщення хмар, що дає можливість прогнозування сонячної радіації в режимі реального часу.

В Україні на даний момент немає системи оперативного автоматичного моніторингу локальних метеоданих в режимі он-лайн, придатної для погодинного і добового прогнозування генерації СЕС.

Як показує практичний досвід, в подібних умовах кращий метод прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями - це об'єднання / усереднення прогнозів, отриманих на основі використання різних моделей чисельного прогнозування погоди.

Аналіз різних підходів до прогнозування вихідної потужності СЕС, виконаний в [20] показав, що застосування гібридних статистично-адаптивних моделей дає найкращі результати прогнозування і є найбільш перспективним напрямком в області побудови прогнозних моделей як для СЕС, так і для інших поновлюваних джерел енергії.

3.3 Планування оптимального режиму роботи гібридної мікросистеми

Важливим етапом запропонованого методу управління роботою будь яких мікросистем, зокрема гібридних, є формування цільової функції (або низки цільових функцій), а також відповідної системи обмежень. Складність реалізації даного етапу полягає в тому, що, як уже вказувалося і було продемонстровано вище, оптимальне використання мікросистеми передбачає необхідність досягнення кількох часто не сумісних цілей, зокрема, пов'язаних з економічними результатами, бажанням максимально використовувати потенціал ВДЕ, забезпечити нормовані значення широкого спектру показників якості електричної енергії та ряд інших.

При цьому логічно припустити, що цілі, що формуються, і тим більше, присутні в оптимізаційній задачі обмеження будуть значною мірою залежати від того передбачається робота мікросистеми в умовах її підключення до централізованої системи електропостачання, в автономному режимі або автономний режим є вимушеним і має місце тільки за умов аварійного відключення від енергосистеми з метою підвищення надійності електропостачання споживачів.

В умовах паралельної роботи з енергосистемою для задоволення попиту на електроенергію, що змінюється, формально може бути використаний весь спектр обладнання керованого блоку мікросистеми (диспетчеризовані джерела РГ, потенціал управління навантаженням, СНЕ, електроенергія, що отримується з енергосистеми або поставляється в енергосистему). При цьому найбільший інтерес представляє завдання максимізації за заданий період часу доходів мікросистеми відповідно до можливості вироблення електроенергії недиспетчеризованими джерелами РГ, регулюванням перетоків потужності з централізованою системою електропостачання, потенціалу регульованих навантажень, ресурсів СНЕ, а також з урахуванням ринкової ціни на електроенергію та бажанням максимально використати потужності відновлюваних джерел енергії.

Одночасно з цим враховуються вимоги до режиму напруги, оптимізації потокорозподілу з метою мінімізації втрат енергії (загалом як у самій мікросистемі, так і в пов'язаних з нею електричних мережах), забезпечення якості електричної енергії.

Таким чином, розв'язання задачі передбачає формування кількох цільових функцій або окремих складових (при відповідному їх формуванні та прийнятті низки припущень) деякої глобальної цільової функції.

Теоретично в процесі побудови гібридних мікросистем може бути задіяний досить широкий спектр джерел, що недиспетчеризуються. Однак, виходячи з практичних міркувань, тут найчастіше розглядаються фотоелектричні станції та вітрогенератори, які сьогодні знайшли найбільш

широке застосування. Аналогічна ситуація складається і з джерелами енергії, що диспетчеризуються. У цьому випадку поряд з такими широко поширеними джерелами, як дизельні генератори або мікротурбіни, у ряді випадків як потенційне обладнання розглядаються і більш сучасні технології, наприклад, паливні комірки.

Питання вибору та обґрунтування технічних засобів акумулювання енергії потребує окремого розгляду. Справа в тому, що, по-перше, спектр зазначених засобів сьогодні досить широкий і всі вони мають суттєво різні техніко-економічні характеристики. По-друге, що ще важливіше, зазначені пристрої можна досить однозначно диференціювати в залежності від їхнього цільового призначення: згладжування графіків навантаження; регулювання частоти та режиму напруг; демпфування коливань потужності мережі, викликаних нерівномірністю генерації з боку відновлюваних джерел енергії; підвищення надійності електропостачання (особливо при ізолюваній роботі мікросистеми) тощо.

Вочевидь, що важливим моментом є визначення загальних принципів застосування мікросистеми що проєктується щодо можливості двостороннього обміну потужністю з централізованої енергосистемою (системою електропостачання). Саме з цим пов'язані і питання управління навантаженням. Даний аспект не є таким актуальним, якщо мікросистема пов'язана з централізованою енергосистемою та має можливість отримання за необхідності відповідної підтримки з її боку. Інакше, тобто. при ізолюваній роботі мікросистеми, завдання управління навантаженням набуває принципового значення. Це пов'язано з тим, що без наявності такої можливості в багатьох випадках дуже складно забезпечити надійну і стійку роботу ізолюваної мікросистеми в плані дотримання балансу між генерацією і споживанням навіть за наявності в структурі ряду джерел, що диспетчеризуються, або/і систем накопичення енергії.

У загальному випадку завдання оптимального управління роботою гібридної мікросистеми має кілька цілей.

1. Якщо мікросистема та споживачі не мають спільних економічних інтересів, то як одну з цілей можна розглядати максимізацію прибутку мікросистеми від реалізації електричної енергії

$$f_1(A_L) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_L} C_{Lt} \times P_{Lit} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де C_{Lt} - тариф на електричну енергію, P_{Lit} - навантаження i - го споживача на момент часу t .

2. Мінімізація імпорту електричної енергії з енергосистеми

$$f_2(A_{GR}) = \sum_{t=1}^T P_{GRt}. \quad (2)$$

Як альтернатива може розглядатися мінімізація витрат на електроенергію, що отримується з енергосистеми

$$f_2(A_{GR}) = \sum_{t=1}^T C_{et} \times P_{GRt},$$

де C_{et} - вартість електричної енергії, що одержується з енергосистеми.

Разом з тим, з огляду на те, що мікросистема може здійснювати двосторонній обмін енергією з енергосистемою, то в даному випадку правильніше було б говорити про максимізацію доходу, що отримується від купівлі та продажу електроенергії в енергосистему. У цьому випадку отримуємо

$$f_2(A_{GR}) = \sum_{t=1}^T (C_{GRt}^+ \times P_{GRt}^+ - C_{GRt}^- \times P_{GRt}^-), \quad (3)$$

де C_{GRt}^+ , C_{GRt}^- - тарифи, відповідно, на продаж та купівлю електричної енергії; P_{GRt}^+ , P_{GRt}^- - відповідно, потужність, що надходить в енергосистему і одержується мікросистемою з енергосистеми в момент часу t .

3. Мінімізація енергії, що виробляється традиційними джерелами генерації, орієнтованими на використання органічного палива, які виступають у ролі диспетчеризованих джерел розподіленої генерації

$$f_3(A_{DG}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_{DG}} P_{DGjt}, \quad (4)$$

де P_{DGjt} - потужність i - го диспетчеризованого джерела генерації в момент часу t .

В якості альтернативи тут як мета може розглядатися мінімізація витрат на генерацію електричної енергії, що виробляється диспетчеризованими джерелами розподіленої генерації, що працюють на органічному паливі

$$f_3(A_{DG}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_{DG}} C_j \times P_{DGjt}, \quad (5)$$

де C_j – питома (грн./кВт) вартість палива для j – го генеруючого джерела.

Тут слід зазначити, що, строго кажучи, питома витрати на паливо не є постійною величиною, що диференціюється лише відповідно до окремих видів генеруючого обладнання. У багатьох випадках цей показник залежить від потужності, що генерується в конкретний момент часу i , більше того, ця залежність є нелінійною, зокрема, представляється у вигляді [18]

$$C_{jt} = a_0 + a_1 \times P_{jt} + a_2 \times P_{jt}^2.$$

Однак, у багатьох дослідженнях автори з метою можливості застосування оптимізаційних методів на основі лінійного програмування обґрунтовують та використовують лінеаризацію цієї залежності (наприклад, в [19]).

Крім цього, для ряду установок, що генерують (зокрема, дизельних генераторів) у багатьох роботах пропонується враховувати додаткові витрати, пов'язані з їх пуском (start-up cost).

4. Мінімізація викидів у довкілля із боку джерел генерації, які працюють на органічному паливі. В даному випадку до подібних джерел відноситься розподілена диспетчеризована генерація. Тут можна розглядати як окремі складові викидів, наприклад SO_2 , CO_2 , NO_x , так і обсяг сукупних викидів

$$f_4(G) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{DG}} \sum_{j=1}^{n_g} g_{ij} \times P_{it}, \quad (6)$$

де g_{ij} – питомі викиди j – го типу із боку i – го джерела.

5. Мінімізація обсягу регульованого навантаження або стимулюючої плати споживачам за їх участь у програмі регулювання навантаження

$$f_5(P_{LR}) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{LRkt}$$

або $f_5(P_{LR}) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{LRkt} \times C_{kt}, \quad (7)$

де K – кількість споживачів, що приймають участь у програмі регулювання навантаження,

C_{kt} - стимулююча плата k – му споживачу за участь у програмі регулювання навантаження.

6. Мінімізація втрат електричної енергії у всіх елементах мікросистеми або мінімізація вартості вказаних втрат

$$f_6(\Delta A) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \Delta P_{jt}, \quad (8)$$

$$\text{або } f_6(\Delta A) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \Delta P_{jt} \times C_{et}, \quad (9)$$

де - ΔP_{jt} втрати потужності в j - ому елементі мікросистеми в t - ий момент часу, M - кількість елементів мікросистеми, що визначається її структурою.

Техніко-економічна оцінка СНЕ, насамперед акумуляторних батарей, має певні особливості. Справа в тому, що в порівнянні з усіма технічними засобами, які можуть бути присутніми в структурі гібридної мікросистеми, саме акумуляуючі пристрої мають найменший життєвий цикл. Так, якщо для більшості генеруючого обладнання, орієнтованого як на органічне паливо, так і на відновлювану енергію вітру або сонця, життєвий цикл становить близько 20 років, то для більшості типів акумуляторних батарей на сьогоднішній день він не перевищує 5-6 років. Більше того, цей термін істотно залежить від режиму роботи акумуляторів, зокрема кількості та глибини циклів заряд/розряд.

У зв'язку з цим, у деяких випадках зазначені обставини ускладнюють формування цільової функції, що оптимізує використання СНЕ. Тут може йтися про мінімізацію витрат, пов'язаних з використанням системи накопичення, що впливає із необхідності задоволення низки обмежень. Дані обмеження, своєю чергою, залежить від набору конкретних завдань (додатків), які будуть поставлені перед СНЕ. Очевидно, що якщо йдеться лише про балансування навантаження, то СНЕ можуть розглядатися як певна альтернатива процедурі регулювання навантаження споживачів та/або обміну електроенергією з енергосистемою (за наявності такої можливості).

У тому випадку, якщо СНЕ розглядається як засіб демпфування коливань потужності, що пов'язане з використанням відновлюваних джерел енергії, то дана система, власне, є безальтернативним рішенням, за умови, що мікросистема працює у автономному режимі.

Аналіз існуючих досліджень у цьому напрямі дозволяє зробити наступний висновок. У разі, коли мікросистема працює разом із енергосистемою, на останню доцільно покласти функцію, передусім,

демпфування коливань потужності, викликаних специфікою генерації з боку відновлюваних джерел енергії. На СНЕ у цьому разі покладаються функції участі у балансуванні режимів, вирівнюванні графіків навантаження з метою недопущення перевантаження окремих елементів мікросистеми, зниження втрат потужності, забезпечення допустимих значень відхилень напруги та інших показників якості електричної енергії.

Відносно незалежним залишається питання участі СНЕ у підвищенні надійності електропостачання, оскільки це вимагає врахування додаткових факторів для визначення її оптимальних параметрів.

Суттєво складніше вирішується це питання, коли йдеться про повністю автономну роботу мікросистеми або можливість продовження її роботи при від'єднанні від системи централізованого електропостачання. Грунтуючись на існуючому аналізі функціональних можливостей та ефективності різних засобів накопичення енергії, можна зробити висновок, що в такому разі, принаймні теоретично, було б доцільним орієнтуватися на гібридні СНЕ, де кожна з технологічних одиниць, що входять до їх складу, орієнтована на виконання певних функцій. Наприклад, пристрої накопичення кінетичної енергії доцільні для демпфування коливань потужності мікросистеми, а, відповідно, коливань частоти і напруги з метою підтримки стійкості роботи мікросистеми. Проточні редокс - ванадієві акумулятори підходять для керування режимом електроспоживання в добовому розрізі. При орієнтації на літій – іонні акумулятори необхідно враховувати, що для них економічно обґрунтованим є використання не більше 3 – 4 циклів заряду/розряду протягом доби.

При вирішенні питання оптимального управління роботою гібридної мікросистеми можливо застосування двох стратегій. В першому випадку зазначене завдання розглядається як проблема багатокритеріальної оптимізації, де у якості окремих цільових функцій виступають вирази (1), (2), (4), (6), (8). У другому випадку формується єдина адитивна цільова функція, де окремі її компоненти визначаються згідно виразів (3), (5), (7), (9).

Зрозуміло, що кожна з зазначених стратегій має свої певні переваги та недоліки.

Добре відомі проблеми, пов'язані з вирішенням багатокритеріальних оптимізаційних задач, визначенням єдиного умовно оптимально рішення, що залежить від попередньо прийнятих суб'єктивних гіпотез та припущень.

У той же час адекватність єдиної загальної цільової функції буде суттєво залежати від обґрунтованості та точності визначення низки прогнозних вартісних характеристик: питома вартість енергії, що продається та купується з енергосистеми, питома вартість палива, яке використовується джерелами генерації що диспетчеризуються (визначення якої, як зазначалося вище, потребує прийняття суттєвих спрощень та припущень) та ряду інших.

У будь-якому випадку, при постановці та реалізації завдань, пов'язаних із оптимізацією структури та режимів роботи мікросистем, важливим етапом є формування функціональних обмежень. Основними під час аналізу зазначених завдань є такі обмеження.

1. Дотримання умов балансу між генерацією та навантаженням з урахуванням втрат потужності в елементах мікросистеми

$$P_{GRt}^+ + \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DGit} + P_{dcht} + \sum_{i=1}^{n_{PV}} P_{PVit} + \sum_{i=1}^{n_W} P_{Wit} = \sum_{j=1}^{n_L} P_{Ljt} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{jt} + P_{GRt}^- + P_{cht} - \sum_{k=1}^K P_{Lrk}, \quad (10)$$

де P_{GRt}^+ , P_{GRt}^- - потужність, відповідно, одержувана з енергосистеми і та, що віддається в енергосистему, P_{cht} , P_{dcht} - потужність, відповідно, одержувана системою накопичення енергії і та, що віддається нею в мікросистему, P_{DGit} - потужність, що генерується i - им диспетчеризованим джерелом розподіленої генерації, P_{Wit} - потужність, генерована i - им вітрогенератором, P_{PVit} - потужність, що генерується i - ою фотовольтаїчною станцією, P_{Ljt} - навантаження j - го споживача, ΔP_{jt} - втрати потужності в j - му елементі мікросистеми, P_{Lrk} - величина регульованого навантаження k - им

споживачем, n_{PV} , n_W, n_L , m , K - кількість, відповідно, фотовольтаїчних установок, вітрогенераторів, споживачів, елементів мікросистеми, споживачів-регуляторів.

2. Максимальна, а в ряді випадків і мінімальна, допустима вихідна потужність джерел розподіленої генерації, що диспетчеризуються.

$$P_{DGi}^{\min} \leq P_{DGi} \leq P_{DGi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, n_{DG}.$$

3. Обсяг регульованого навантаження

$$0 \leq P_{Lrk} \leq P_{Lrk}^{\max}, \quad k = 1, \dots, K.$$

У принципі, всі навантаження можуть бути розділені на ряд категорій, зокрема, критичні, ті, що переносяться на інші періоди часу, та ті, що відключаються. Відповідно, і наведені обмеження в загальному випадку можуть задаватися незалежно для кожної з перерахованих категорій.

4. Обмеження для системи накопичення енергії включають [20] – за потужністю заряду та розряду

$$P_{cht} < P_{Er}, \quad P_{dcht} < P_{Er},$$

де P_{Er} – номінальна потужність батареї;

- за допустимою ємністю

$$A_{Et} = A_{E(t-1)} - \left[\frac{P_{dcht}}{\eta_{dch}} \times \Delta t_{dch} - P_{cht} \times \eta_{ch} \right];$$

- за допустимою потужністю заряду/розряду

$$P_{E \min t} \leq P_{Et} \leq P_{E \max t},$$

де $P_{E \min t}$, $P_{E \max t}$ – максимальне та мінімальне значення обмінної потужності в момент часу

Результатом роботи запропонованого алгоритму є формування погодинних графіків розподілу навантаження між окремими джерелами енергії, які знаходять до складу мікросистеми. У якості прикладу на рис. 3.1 наведено відповідну діаграму для 15 години робочого дня за умов роботи мікросистеми паралельно з енергосистемою.

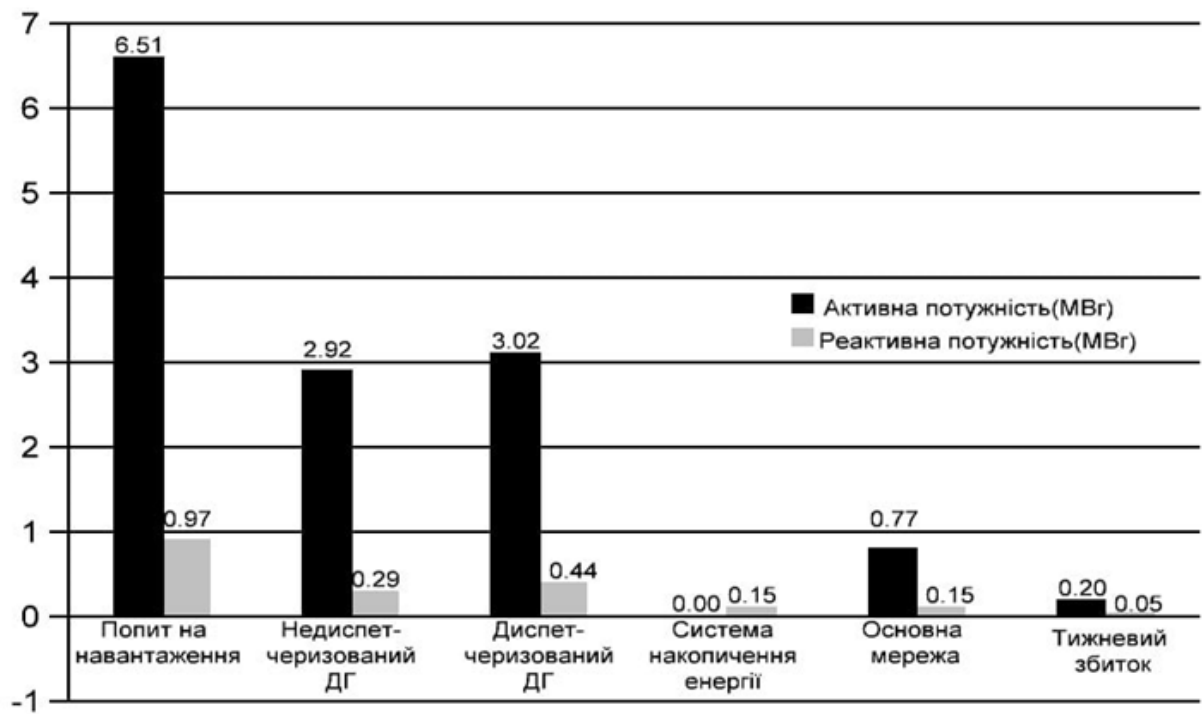


Рисунок 3.1 – Схема оптимального розподілу навантаження за умов паралельної роботи мікросистеми з електричними мережами.

Таким чином, суть пропонованого у даному підрозділі підходу до управління гібридною мікросистемою полягає в тому, щоб об'єднати переваги схем, заснованих як на плануванні управління на певному горизонті, так і прийнятті рішень в реальному часі. У цьому випадку переслідується наступна мета. Уникнути появи більших чи менших похибок у процесі прогнозування (навіть короткострокового в межах доби) вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, навантажень споживачів, ринкової вартості електроенергії тощо практично неможливо. Відповідно з похибками будуть визначатися керуючі дії, які формуються на їх основі. Радикальним рішенням у такому разі може бути лише реалізація управління

у реальному часі. Але при цьому виникає проблема як оперативного відпрацювання можливих досить великих збурень, так і оперативного вирішення досить складної оптимізаційної задачі, що достатньо проблематично реалізувати. Етап планування дозволяє підготувати заздалегідь систему до можливих умов її функціонування, що на другому етапі диспетчеризації дозволить спростити відпрацювання дисбалансу, що виник, використовуючи при цьому більш прості алгоритми для прийняття відповідних рішень.

Висновки до розділу 3

Запропоновано дворівневий підхід до прийняття рішень при реалізації управління роботою мікросистеми, що включає рівень планування на підставі прогнозованої інформації щодо електричних навантажень та вихідної потужності відновлюваних джерел енергії і рівень диспетчеризації (оперативного управління).

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає у впровадженні та економічному обґрунтуванні підвищення надійності розподільних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії на основі гібридних методів оптимізації. Використання даного типу генерації електричної енергії вирішить не тільки такі проблеми, як забезпечення надійності електропостачання, але й для досягнення найбільш економічної собівартості. Використання даного підходу передбачає підвищення показників продуктивності.

Опис ідеї стартап-проекту, що розкриє цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів, вказаний у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Пропонується ідея зі створення алгоритму для підвищення ефективності роботи розподільчих мереж	1. Надійності електропостачання	Зниження втрат електроенергії та покращення її якості.
	2. Найбільш економічна собівартість	Можливість подальшої інтеграції ВДЕ в мережу.

	3. Зменшення виробництво електроенергії з викопних видів палива	Припинення забруднення навколишнього повітря, води та підвищення температури
--	---	--

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного методу є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (порядок дій для реалізації комплексного підходу).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, що зображені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Визначення оптимального рішення розподіленої генерації.	Matlab Simulink	наявна	доступна

2.	Визначення доцільності використання гібридного оптимізатора рівноваги генетичних алгоритмів (GAEO).	Гібридна методика оптимізації на основі алгоритму ГА та ЕО	наявна	доступна
----	---	--	--------	----------

Matlab Simulink - програма Simulink є доповненням до пакету MATLAB. Моделювання за допомогою Simulink реалізує принцип візуального програмування, згідно з яким користувач створює на екрані модель пристрою з бібліотеки стандартних блоків і виконує розрахунки. На відміну від класичних засобів моделювання, користувачеві не потрібно поглиблено вивчати мову програмування та чисельні методи математики, достатньо загальних знань, необхідних при роботі на комп'ютері, а також знання предметної області, в якій він працює. Додаткові пакети розширення Simulink дозволяють вирішувати всі завдання від розробки концепції моделі до тестування, верифікації, генерації коду і апаратної реалізації. Simulink інтегрований в середовище MATLAB і дозволяє використовувати інтегровані математичні алгоритми, потужні засоби обробки даних та наукової графіки.

GAEO (аббр. від англ. Genetic Algorithm Equilibrium optimizer) - він використовується для оптимального розташування та розміру джерел відновлюваної енергії (вітрові, фотоелектричні, паливні елементи) в розподільчих системах. Розміщення та потужність джерел ДГ мають значний вплив на покращення показників роботи розподільчих мереж за рахунок зменшення втрат потужності всієї системи, покращення профілю напруги, зменшення витрат на паливо та викидів забруднюючих речовин в навколишнє середовище.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкового середовища: складання таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають, ці фактори перераховані у таблицях 4.3 і 4.4 відповідно. Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.3 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Створення аналогічного комплексного підходу з дешевшою ціною	Зниження ціни
2.	Нестача ресурсів як людських так і економічних	Більші часові витрати на аналіз та розрахунок необхідних даних	Втрата прибутку

Таблиця 4.4 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Підвищення надійності	Створення і оновлення функцій, перспективи скорішого росту	Реклама продукту

	розподільних мереж	кількості клієнтів	
2.	Зниження потреби в традиційних джерелах енергії	Децентралізація системи та перехід на ВДЕ	Зменшення викидів CO ₂ , SO ₂ , NO _x

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу - матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), SWOT-аналіз продемонстрований у таблиці 4.5.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Підсумовуючи сильні та слабкі сторони даного проекту слід обрати альтернативу ринкового впровадження.

Таблиця 4.5 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - наразі проект має лише декілька конкурентних аналогів; - велика кількість потенційних	Слабкі сторони: - економічна ситуація країни; - необізнаність покупців; - залежність від актуальної
---	--

клієнтів - зменшення часу очікування споживача;	ситуації, щодо прокладених електромереж;
Можливості: - підвищення надійності розподільної системи; - надійне та якісне електропостачання; - зменшення економічної складової	Загрози: - складне економічне становище в країні; - конкуренція.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Так, як обрано зосередитися на одному сегменті, то стратегія проекту буде концентрованою. У ролі стратегії розвитку, обрано стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару, бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів. Вибір цільових груп потенційних споживачів проведений у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю	Готовність	Орієнтовний	Інтенсивність	Простота
---	--------------	------------	-------------	---------------	----------

п/п	цільової групи потенційних клієнтів	сприйняття споживачем товару	попит в межах цільової групи (сегменту)	конкуренції в сегменті	входу у сегмент
1.	Електропередавальні компанії	Повна готовність	Високий	Помірна	Просто
2.	Інвестори	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
3.	Державні органи влади	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
	Які цільові групи обрано: електропередавальні компанії				

Оскільки компанія фокусується на одному сегменті, вона обирає стратегію концентрованого маркетингу. При цьому компанія займається як реалізацією заходів з формування попиту (навчання споживачів використанню продукту, формування регулярного попиту, збільшення разового споживання), так і просуванням нових сфер застосування існуючих продуктів та залученням нових груп споживачів. Така стратегія можлива лише на ранніх стадіях життєвого циклу продукту, коли попит ще зростає, а взаємний тиск з боку конкурентів ще низький. В іншому випадку керівник компанії повинен дотримуватися оборонної або наступальної стратегії.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Трирівнева маркетингова модель товару може бути представлена наступним чином.

Товар із підкріпленням передбачає послуги по встановленню, монтажу, сервісні послуги та послуги обслуговування.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару показано у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі, або такі, що потрібно створити)
1.	Надійність та захищеність	Індивідуальний доступ для кожного клієнта	Індивідуальний доступ
2.	Повнота даних	Аналіз даних по кожному об'єкту	Повнота даних по розподільним мережам
3.	Підтримка та оновлення	Створення і оновлення функцій, розширення можливостей	Врахування індивідуальних побажань клієнтів, перед кожним

Концепція, за допомогою якої компанія ретельно зважає та координує свої численні комунікаційні канали, називається концепцією маркетингових комунікацій і представлена в таблиці 4.8. Вона має на меті інформувати, переконувати та нагадувати споживачам та ринку в цілому про продукт та діяльність.

Таблиця 4.8 - Концепція маркетингової комунікації

№ п/п	Цільові групи	Канали комунікації , якими користують ся цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Електропередавальні компанії	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
2.	Інвестори	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
3.	Державні органи влади	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність

Висновок до розділу 4

Розроблено стартап-проект, ідея якого полягає у підвищенні надійності розподільних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії на основі гібридних методів оптимізації. Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту показав, що даному продукту загрожують такі загрози, як низька купівельна спроможність громадян та посилення конкуренції, але цим

загрозам можна запобігти шляхом зниження ціни на продукт. Дослідження показало, що найбільший попит серед усіх цільових груп буде з боку електропередавальних компаній, та групи інвесторів для подальшого розвитку.

Загальні висновки по дисертації

Проведено аналіз різноманітних технологій генерування (орієнтованих як на органічне паливо, так і відновлювані ресурси) та накопичення енергії, з точки зору можливості та доцільності їхнього застосування у розподільних мережах.

Обґрунтовано доцільність створення гібридних мікросистем з одночасним залученням низки різноманітних технічних засобів генерування та накопичення енергії, що дозволяє найбільш ефективно вирішувати проблеми пов'язані з інтеграцією відновлюваних енергетичних ресурсів в розподільні мережі та здійснювати керування їхніми режимами.

Запропоновано дворівневий підхід до прийняття рішень при реалізації управління роботою мікросистеми як в режимі підключення до електричних мереж, так і в автономному режимі, що включає рівень планування її і рівень диспетчеризації (оперативного управління).

Розроблено алгоритм однокритеріального та багатокритеріального планування оптимального режиму роботи мікросистеми на підставі прогнозованої інформації щодо електричних навантажень та вихідної потужності відновлюваних джерел енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Muruganantham B., Gnanadass R., Padhy N. Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;73:125–134.
2. Dan T. Ton and Merrill A. Smith, The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 2012. 25(8): pp. 84-94
3. Wenham, Green, C. *Green Applied Photovoltaics* Science Publisher, UK and USA (2012)
4. Schoenung S.M., Eyer J.M., Iannucci J.J., Horgan S.A. Energy storage for a competitive power market. *Annu Rev Energy Environ* 1996;21(1):347–370
5. Chen, H., Cong, T., Yang, W., Tan, C., Li, Y., AND Ding, Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Progress in Natural Science* 19 (2008), p. 291–312.
6. Eyer J., and Corey G. Energy storage for the electricity grid: benefits and market potential assessment guide. Tech. Rep. SAND2010-0815, Sandia National Laboratories, February 2010
7. T. Logenthiran, D. Srinivasan, A.M. Khambadkone, Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system, *Electr. Power Syst. Res.* 81. 2011, Pp. 138–148.
8. H Nazaripouya, Y Wang, P Chu, HR Pota, and R Gadh. Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation. in *Power & Energy Society General Meeting*, 2015 IEEE. 2015. IEEE.
9. Zhikang Shuai, et al., Microgrid stability: Classification and a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 58: pp. 167-179
10. Mariya Soshinskaya, Wina HJ Crijns-Graus, Josep M Guerrero, and Juan C Vasquez, Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 40: pp. 659-672
11. Sumiti Lamichhane, H Nazaripouya, and S Mehraeen. Micro grid stability improvements by employing storage. in *Green Technologies Conference*, 2013 IEEE. 2013. IEEE.
12. X. Luo et al., Review of Voltage and Frequency Grid Code Specifications for Electrical Energy Storage Applications, *Energies*, vol. 11, no. 5, Apr. 2018, pp. 1070

13. Farzam Nejabatkhah and Yun Wei Li, Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015. 30(12): pp. 7072-7089.
14. J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, May 2006, Pp. 916–924.
15. M. A. Momani, W. H. Alroushan, and A. T. Alqudah, "Short-Term Load Forecasting Based on NARX and Radial Basis Neural Networks Approaches for the Jordanian Power Grid " *Jordan Journal of Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1, 2016, pp. 81-93.
16. A. T. Ali, E. B. Tayeb, and Z. M. Shamseldin, "Short term electrical load forecasting using fuzzy logic," *International Journal Of Advancement In Engineering Technology, Management and Applied Science (IJAETMAS)*, vol. 3, 2016
17. D. Ali, M. Yohanna, M. I. Puwu, and B. M. Garkida, "Long-term load forecast modelling using a fuzzy logic approach," *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, vol. 18, no. 2, 2016, pp. 123-127.
18. V. V. S. N. Murty, Ashwani Kumar Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5:2, 2020, <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0147-z>
19. W. Alharbi, K. Raahemifar Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties *Electric Power Systems Research* 128, 2015, Pp. 1–10.
20. S. Chen, H.B. Gooi, M. Wang, Sizing of energy storage for microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid* 3, 2012, Pp. 142–151.