

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

---

Інтелектуальні системи енергопостачання

---

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи  
магістра

на тему: «Розробка енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення  
електричною енергією»  
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на  
транспорті  
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи ЕЕ2321:



/ Ігор ЯРЕМОВИЧ /

Керівник:



/ доцент Андрій АНТОНОВ /

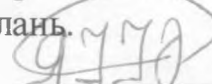
Нормоконтролер:



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

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

Студент



(підпис)

Дніпро – 2025 рік

**Explanatory Note**  
to Master's Thesis

on the topic: «Development of an energy-based concept of the electrical energy supply system»

according to educational curriculum **Energy and electromechanical systems in transport**

in the Speciality: **141** Power engineering, electrical engineering and electromechanics

Done by the student of the group EE2321: \_\_\_\_\_ / Ihor Yaremovych /

Scientific Supervisor: \_\_\_\_\_ / Ass. Prof. Andrii Antonov /

Normative controller: \_\_\_\_\_ / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами

Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ \_\_\_\_\_

Дмитро БОСИЙ \_\_\_\_\_

Дата 01.04.2024

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістр з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

студенту ЯРЕМОВИЧУ Ігорю Юрійовичу

1. Тема роботи: Розробка енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення електричною енергією

Керівник роботи: Антонов Андрій Владиславович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від "01" квітня 2024 р. № 247ст

2. Строк подання студентом 17.01.2025 р.  
роботи:

3. Вихідні дані до роботи:

Параметри розглядуваного об'єкту

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз сучасних концепцій енергозабезпечення, зокрема відновлюваних джерел енергії

4.2 Розробка алгоритму оптимізації роботи системи накопичення енергії

4.3 Апробація запропонованої концепції через моделювання роботи енергосистеми

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1.Графік споживання електричної енергії об'єктом. 2. Принципова однолінійна схема системи енергозабезпечення. 3. Аналіз результатів моделювання енергосистеми

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та по.ада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасні концепції та тренди в енергозабезпеченні	20.09.2024	
2	Аналіз енергозабезпечення реального об'єкта та моделювання роботи системи електропостачання	10.10.2024	
3	Алгоритм вибору системи енергозабезпечення	07.11.2024	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	17.01.2024	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	21.01.204	

Студент

Ігор ЯРЕМОВИЧ



Керівник роботи

Андрій АНТОНОВ



## ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

другого (магістерського) рівня вищої освіти Яремовича І.Ю. на тему:  
«Розробка енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення  
електричною енергією»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	62 стор.
Графічна частина (за наявності)	-	-
Демонстраційний матеріал	1	12 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник:



/ Андрій АНТОНОВ /

Нормоконтролер:



/ Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:



/ Дмитро БОСИЙ /

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 62 сторінки, 3 частини, 18 рисунків, 3 таблиці, 25 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – система енергозабезпечення із використанням відновлюваних джерел енергії, систем накопичення енергії та розумних мереж.

Мета роботи - розробка енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення електричною енергією, яка забезпечить ефективне використання електроенергії за рахунок інтеграції сучасних технологій.

Методи дослідження – математичне моделювання роботи енергосистем, аналіз споживання електроенергії та генерації з відновлюваних джерел, розробка та оптимізація алгоритмів роботи систем накопичення енергії.

Одержані результати – визначено енергетичні параметри об'єкта, проведено аналіз сучасних концепцій енергозабезпечення, розроблено принципову схему системи, що включає сонячну електростанцію, систему накопичення енергії та Smart Grid. Виконано оптимізаційне моделювання для алгоритмів заряджання та розряджання системи накопичення енергії, що дозволило досягти економії витрат та підвищити енергоефективність. Отримано схеми потоків енергії та розраховано основні показники ефективності системи.

Ключові слова: ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА, РОЗУМНІ МЕРЕЖІ, СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ .....	9
ВСТУП.....	10
1 СУЧАСНІ КОНЦЕПЦІЇ ТА ТРЕНДИ В ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННІ .....	11
1.1 Еволюція енергозабезпечення: від централізації до інноваційних рішень	11
1.2 Альтернативні системи накопичення енергії: від традиційних до експериментальних .....	13
1.3 Еволюція технологій накопичення енергії.....	15
1.4 BESS.....	17
1.5 Розподілені енергетичні ресурси (DER).....	18
1.6 Інтелектуальні енергомережі (Smart Grid) .....	19
1.7 Системи управління розподільчими мережами (DMS, Distribution Management Systems) .....	20
1.8 Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).....	21
1.9 Використання батарей як віртуальних джерел .....	22
1.10 Енергетичні хаби (Energy Hubs) .....	23
1.11 Інтернет речей (IoT) у енергетиці.....	24
1.12 Гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS, Flexible AC Transmission Systems).....	25
1.13 Мережі з нульовими викидами (Zero Emission Grids) .....	26
1.14 Розумні будівлі (Smart Buildings) .....	27

					02.15. EE2321.KPM.2025 – ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Яремович				Розробка основ розподіленого живлення об'єктів бюджетної сфери	Літ.	Арк.	Аркушів
Консульт.							7	61
Керівник	Антонов					МОНУ, УДУНТ, ІСЕ група EE2321.		
Н. Контр.	Потапчук							
Зав.каф.	Босий							

1.15	Енергонезалежні будівлі .....	28
2	АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	31
3	АЛГОРИТМ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	41
3.1	Загальні умови .....	41
3.2	Енергетичний арбітраж та оптимізація BESS .....	43
3.3	Математичне представлення BESS в електричних мережах .....	45
3.4	Моделювання на Python .....	49
3.4.1	Підготовка вхідних даних .....	49
3.4.2	Оголошення розв'язувача змішаного цілочисельного програмування .....	50
3.4.3	визначення змінних .....	51
3.4.4	Побудова обмежень .....	52
3.4.5	Визначення цільової функції .....	52
3.4.6	Розв'язання оптимізаційної задачі .....	53
3.4.7	Роздрукування та збереження результатів .....	53
3.5	Аналіз результатів .....	54
3.6	Висновки .....	56
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	57
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	58

					02.15. EE2321.KPM.2025 – ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Яремович			Розробка основ розподіленого живлення об'єктів бюджетної сфери	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Консульт.</i>							8	61
<i>Керівник</i>		Антонов				МОНУ, УДУНТ, ІСЕ група EE2321.		
<i>Н. Контр.</i>		Потапчук						
<i>Зав.каф.</i>		Босий						

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

BESS – система накопичення енергії на основі батарей (Battery Energy Storage System)

Smart Grid – розумна енергомережа.

DER – розподілені енергетичні ресурси (Distributed Energy Resources)

СЕС – сонячна електростанція

SOC – рівень заряду акумуляторної системи (State of Charge)

LFP – літій-залізо-фосфатна батарея (Lithium Iron Phosphate)

FACTS – гнучкі системи передачі змінного струму (Flexible AC Transmission Systems)

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Енергетичний сектор сучасного світу стикається з численними викликами, серед яких зростання попиту на електроенергію, необхідність інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпечення енергоефективності. Для України, яка перебуває в умовах складної геополітичної ситуації, питання створення ефективних енергетичних систем є особливо важливим. Актуальність теми обумовлена потребою у нових підходах до управління системами енергозабезпечення, які б забезпечували економічну доцільність, екологічну безпеку та високу енергоефективність.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення електричною енергією, яка спрямована на максимальне підвищення ефективності споживання електроенергії з урахуванням економічної доцільності та сучасних тенденцій розвитку відновлюваних джерел енергії, а також її практична демонстрація на прикладі конкретного об'єкта.

**Завданням дослідження** є проведення аналізу сучасних концепцій енергозабезпечення з урахуванням особливостей використання відновлюваних джерел енергії та систем накопичення енергії, розробка алгоритму оптимізації роботи системи накопичення енергії (BESS) на основі визначених обмежень, а також моделювання запропонованої концепції та оцінка її ефективності у реальних умовах.

**Наукова новизна** роботи полягає у створенні наукових основ для побудови автоматизованого алгоритмічного засобу управління системами накопичення енергії (BESS) на основі сукупності визначених обмежень. Розроблений алгоритм дозволяє оптимізувати процеси заряджання та розряджання BESS, забезпечуючи максимальну економічну ефективність та інтеграцію з сучасними розумними мережами.

**Публікації.** The 5<sup>th</sup> International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (December 26-28, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2024. 511 p. ISBN 978-4-9783419-4-5

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 СУЧАСНІ КОНЦЕПЦІЇ ТА ТРЕНДИ В ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННІ

## 1.1 Еволюція енергозабезпечення: від централізації до інноваційних рішень

Сучасні принципи енергозабезпечення пройшли довгий шлях, зазнаючи змін залежно від обставин та умов. Їхній розвиток супроводжувався технологічними проривами, науковими відкриттями та соціально-економічними викликами.

Першим важливим етапом стала поява змінного струму. Змінний струм мав кілька ключових переваг, серед яких ефективна передача електроенергії на великі відстані з мінімальними втратами, можливість використання трансформаторів для зміни напруги та гнучкість у розподілі енергії між споживачами. У 1831 році Майкл Фарадей відкрив закон електромагнітної індукції, який став основою для створення генераторів і трансформаторів [1]. У 1832 році Гіпполіт Піксі сконструював перший генератор змінного струму, що відкрив нові можливості для генерації електроенергії [2].

Далі, у 1885 році, Вільям Стенлі розробив перший ефективний трансформатор, що забезпечив можливість змінювати напругу електричного струму, що значно полегшило його передачу. У 1888 році Нікола Тесла продемонстрував практичну систему змінного струму, яка включала генератор, трансформатор та асинхронний двигун. Ці винаходи зробили можливим ефективну передачу електроенергії на великі відстані з мінімальними втратами [3].

Важливу роль у впровадженні змінного струму відіграв Джордж Вестінгауз, який у 1890-х роках розвинув системи генерації, передачі та розподілу електроенергії. Його зусилля сприяли широкому застосуванню змінного струму в промисловості та побуті, що заклало основи сучасних енергосистем [4].

Централізоване виробництво електроенергії стало результатом необхідності забезпечити ефективне та стабільне постачання енергії для швидко зростаючих міст і промислових центрів. Ця модель почала формуватися завдяки розумінню переваг централізації, таких як зменшення витрат на одиницю енергії через ефект

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

масштабу та можливість централізованого контролю і управління. Її розвиток також був зумовлений технічними досягненнями: поява трансформаторів і магістральних ліній високої напруги дозволила передавати енергію на великі відстані, що сприяло будівництву великих електростанцій: теплових, гідроелектричних та атомних [5].

Відсутність розвинутих технологій зберігання електроенергії та локальних джерел енергії зробила централізацію єдиним можливим рішенням. Однак, згодом почали з'являтися проекти об'єднання енергомереж різних країн для оптимального використання ресурсів. Наприклад, у 1951 році було утворено першу міжнародну енергетичну мережу між Канадою та США. У 1964 році створено NORDEL для країн Скандинавії, а в 1984 році побудовано підводний кабель NorNed між Норвегією та Нідерландами. Ці системи дозволяли передавати електроенергію між регіонами, де спостерігались нічні зниження попиту, до регіонів із підвищеним денним попитом [6].

Згодом недоліки централізованої системи, такі як значні втрати енергії під час передачі, залежність від викопного палива, складність інтеграції нових технологій, а також зростання геополітичних конфліктів, які ускладнювали об'єднання енергомереж різних країн, стали все більш актуальними. Це змусило замислитись над необхідністю змін у підходах до енергозабезпечення, що привело до переосмислення традиційної моделі.

Важливими додатковими умовами для переходу до децентралізації стали:

Підвищення енергетичної безпеки, що зменшує залежність від централізованих джерел та забезпечує автономність регіонів.

Розвиток відновлюваних джерел енергії, які природно сприяють децентралізації завдяки своїй локальності.

Економічні вигоди від зниження втрат при передачі енергії та розвитку локальної генерації.

Розробка технологій, таких як Smart Grid, що забезпечують ефективне балансування попиту і пропозиції, інтеграцію мікромереж і прогнозування завдяки нейромережам.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Зростання конфліктів між країнами, яке підштовхує до зменшення залежності від міждержавних енергетичних об'єднань.

Відчуття необхідності змін спонукало до пошуку нових рішень, здатних забезпечити ефективність і стійкість енергосистем. Поява відновлюваних джерел енергії, розвиток технологій зберігання енергії та прагнення до децентралізації стали ключовими векторами розвитку.

Сучасні підходи в енергозабезпеченні базуються на інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції [7]. Впровадження розумних мереж (Smart Grid) забезпечує балансування попиту і пропозиції за допомогою автоматизованих систем управління [8]. Використання нейронних мереж дозволяє ефективно прогнозувати споживання та оптимізувати функціонування енергосистем [9]. Розробка нових матеріалів, таких як високотемпературні надпровідники, сприяє підвищенню ефективності та стійкості енергетичних систем [10]. Крім того, новітні енергозберігаючі технології допомагають зменшити втрати енергії та підвищити загальну ефективність споживання [11].

## **1.2 Альтернативні системи накопичення енергії: від традиційних до експериментальних**

Майбутні енергомережі, зокрема розподілені системи, у своїй концепції мають важливий аспект — накопичення електроенергії. Це завдання є технічно складним, особливо для змінного струму, що широко використовується в промисловості. Проте сучасні технології пропонують різні підходи до вирішення цієї проблеми. Зараз існують такі системи накопичення енергії, як гідроакumuлювальні електростанції (ГАЕС), системи стисненого повітря, теплові акумулятори, механічні маховики, системи зберігання енергії у вигляді водню, суперконденсатори та інші.

Системи накопичення енергії займають важливе місце в сучасній енергетиці, забезпечуючи гнучкість і стабільність енергопостачання. Гідроакumuлювальні електростанції (ГАЕС) використовують різницю висот між двома резервуарами,

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

щоб накопичувати енергію у вигляді потенційної енергії води. Під час низького попиту на електроенергію вода перекачується у верхній резервуар, а під час пікового попиту вона спускається вниз через турбіни, генеруючи електроенергію. Ця технологія характеризується високою ефективністю і здатністю забезпечувати значні обсяги енергії, однак потребує специфічних географічних умов і значних початкових витрат.

Системи накопичення енергії стисненого повітря (CAES) працюють за принципом стиснення повітря у великих підземних резервуарах, таких як соляні каверни. Це повітря може використовуватися для вироблення електроенергії, коли попит на неї зростає. Хоча ці системи мають значну ємність для зберігання енергії і довгий термін служби, їх ефективність є порівняно низькою через втрати тепла під час процесу.

Теплові системи накопичення енергії (TES) використовують здатність матеріалів зберігати тепло або холод. Наприклад, розплавлені солі або вода можуть акумулювати тепло, яке згодом використовується для генерації електроенергії чи опалення. Ці системи часто застосовуються разом із сонячними електростанціями для підвищення їх ефективності. Проте вони обмежені часом зберігання тепла через втрати енергії і залежать від якості ізоляційних матеріалів.

Механічні маховики (Flywheels) накопичують енергію у вигляді кінетичної енергії обертового маховика. Вони швидко реагують на зміну навантаження і мають тривалий термін служби, що робить їх ідеальними для короткотривалого використання. Однак маховики мають обмежену ємність для зберігання енергії, що обмежує їх застосування для великих обсягів.

Системи зберігання енергії у вигляді водню є перспективним напрямком, особливо для довготривалого зберігання. Електроліз використовується для розщеплення води на водень, який потім зберігається і може бути використаний для генерації електроенергії або в паливних елементах. Ця технологія дозволяє накопичувати значні обсяги енергії, але її ефективність є порівняно низькою, а вартість обладнання залишається високою.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Суперконденсатори забезпечують накопичення енергії у вигляді електростатичного заряду. Вони відзначаються надзвичайно швидким зарядженням і розрядженням, а також тривалим терміном служби. Проте їх ємність значно менша у порівнянні з батареями, що обмежує їх застосування для довготривалих завдань.

Накопичення енергії у пружинах є ще одним механічним методом, який базується на збереженні механічної енергії за рахунок стиснення або розтягнення пружин. Такі системи прості у конструкції, однак їхня енергетична ємність є дуже обмеженою.

До експериментальних і низькоефективних методів накопичення можна віднести системи накопичення енергії у формі підйому вантажів. У таких системах енергія використовується для підняття важких мас на певну висоту, а потім ця енергія повертається через механізм, що спускає вантаж. Ефективність таких систем є дуже низькою, проте вони можуть знайти застосування в певних нішевих галузях. Ще однією перспективною, але малоефективною технологією є накопичення енергії у магнітному полі за допомогою високотемпературних надпровідників. Ці системи знаходяться на ранніх етапах розвитку і потребують значних досліджень для підвищення їх ефективності та економічності.

### **1.3 Еволюція технологій накопичення енергії**

Серед традиційних технологій накопичення енергії слід виділити свинцево-кислотні акумулятори та нікель-кадмієві (NiCd) і нікель-метал-гідридні (NiMH) батареї. Ці типи акумуляторів довгий час використовувалися у стаціонарних системах зберігання енергії, проте поступово відходять на другий план через їхні обмеження, такі як низька енергетична щільність, короткий термін служби та екологічні проблеми. На заміну їм активно впроваджуються літєві технології, зокрема літій-іонні та літій-залізо-фосфатні батареї.

Сучасні накопичувачі електроенергії відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи енергосистем, підвищенні їхньої ефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). З огляду на швидкий розвиток технологій,

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

накопичувачі стають дедалі більш універсальними та доступними, забезпечуючи оптимальні умови для накопичення та зберігання електроенергії. У системах накопичення енергії (BESS) широко використовуються батареї літій-іонного та літій-залізо-фосфатного (LFP, Lithium Iron Phosphate, LiFePO<sub>4</sub>) типу.

Літій-іонні батареї є найпоширенішими завдяки високій енергетичній щільності, тривалому терміну служби та відносно короткому часу зарядки. Вони широко використовуються як у побутових, так і в промислових системах зберігання енергії. Розвиток цієї технології сприяє зменшенню витрат на її виробництво та підвищенню безпеки експлуатації. Крім того, перспективними є твердотільні батареї, які забезпечують ще більшу енергетичну щільність, високу безпеку та довговічність. Твердотільні батареї використовують твердий електроліт замість рідкого, що зменшує ризик витоків і підвищує безпеку роботи. Вони здатні працювати при вищих температурах і забезпечують кращу стабільність протягом тривалого терміну служби, що робить їх перспективним вибором для високоефективних енергетичних систем. Паралельно із цим активно розвиваються натрій-іонні акумулятори, що є дешевшою альтернативою літій-іонним батареям, завдяки доступності сировини та зниженим витратам на виробництво.

Літій-залізо-фосфатні (LFP) батареї є важливою альтернативою літій-іонним, оскільки вони забезпечують підвищену безпеку, стабільність роботи та довговічність. Вони мають нижчу енергетичну щільність у порівнянні з літій-іонними батареями, проте характеризуються вищою стійкістю до термічних впливів і механічних пошкоджень. Завдяки використанню матеріалів з нижчою вартістю, LFP батареї також є економічно вигіднішими, що робить їх привабливим вибором для систем стаціонарного зберігання енергії. Їхній тривалий термін служби та знижена схильність до деградації при багаторазових циклах заряджання-розряджання роблять такі батареї ідеальними для масштабного використання, особливо в поєднанні з відновлюваними джерелами енергії. Порівняно з літій-іонними, літій-залізо-фосфатні накопичувачі краще

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

підходять для довготривалого використання в умовах високих навантажень завдяки більшій стабільності та екологічності.

LFP (літій-залізо-фосфатні) батареї також мають відмінності в хімічному складі порівняно з іншими літійовими технологіями. Вони використовують фосфат заліза для катода, що забезпечує високу термічну стабільність і знижує ризик перегріву. Хоча їх енергетична щільність дещо нижча, ніж у літій-іонних батарей, вони забезпечують більшу безпеку, що робить їх ідеальним вибором для стаціонарних систем зберігання енергії, зокрема в умовах інтенсивного використання.

#### 1.4 BESS

BESS (Battery Energy Storage System) — це системи акумуляторного зберігання енергії, що призначені для накопичення, зберігання та видачі електричної енергії в мережу. Вони забезпечують стабільність електропостачання, інтегруючи відновлювальні джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія. Основними компонентами цих систем є літій-іонні та залізо-фосфатні батареї, системи управління акумуляторами (BMS), системи перетворення електроенергії (PCS) та системи управління енергією (EMS).

Принцип роботи BESS полягає в накопиченні надлишкової енергії, яка виробляється під час пікових виробництв, і її використанні в періоди високого споживання. Це дозволяє зберігати надлишок енергії з відновлювальних джерел або під час низького споживання, а також видавати накопичену енергію під час пікових навантажень, що допомагає знизити навантаження на електромережу. Системи також забезпечують резервне живлення, підтримуючи електропостачання під час аварій або перебоїв у постачанні.

Серед ключових переваг BESS можна відзначити інтеграцію відновлювальної енергії, що сприяє більш ефективному використанню відновлювальних джерел та забезпечує баланс між виробництвом і споживанням. Ці системи допомагають стабілізувати електромережу, зменшуючи ймовірність відключень при високому навантаженні. Крім того,

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

зберігання енергії дозволяє споживачам використовувати власну накопичену енергію замість купівлі дорогої електрики під час пікових годин. Зменшення залежності від резервних електростанцій сприяє зниженню викидів CO<sub>2</sub>.

Сучасні системи BESS мають різноманітні технічні параметри, серед яких типи батарей (літій-іонні та залізо-фосфатні), ємність (від десятків до сотень кіловат-годин для комерційних і промислових потреб, а великі системи можуть досягати сотень мегават-годин для електричних мереж). Вони обладнані системами управління температурою для підтримки оптимального режиму роботи батарей, а також системами захисту, включаючи протипожежний захист та IP-рейтинг.

Незважаючи на значні переваги, BESS стикаються з певними викликами. Високі початкові витрати на встановлення таких систем можуть вимагати значних фінансових вкладень. Крім того, ефективна робота BESS потребує спеціалізованого обслуговування та управління. Обмежений термін служби батарей, зумовлений циклами зарядки/розрядки, також може впливати на їхню довговічність.

Технологічні інновації та зниження витрат на компоненти сприяють розвитку систем BESS, роблячи їх важливими елементами сучасної енергетичної інфраструктури, що орієнтована на інтеграцію відновлювальних джерел енергії.

### **1.5 Розподілені енергетичні ресурси (DER)**

Розподілені енергетичні ресурси (DER) відіграють ключову роль у сучасних енергосистемах, забезпечуючи гнучкість, енергоефективність, стійкість та екологічність [12]. Завдяки розвитку технологій, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, DER стали більш доступними та інтегруються в розумні мережі (Smart Grid), що покращує їх ефективність та керованість. На початку XXI століття поштовхом до розвитку DER стала потреба у зменшенні викидів парникових газів та впровадження політик енергоефективності. Зростання ролі інформаційних технологій дозволило інтегрувати DER у розумні мережі, значно покращивши їх ефективність та керованість.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## 1.6 Інтелектуальні енергомережі (Smart Grid)

Історія концепції Smart Grid бере свій початок у другій половині ХХ століття, коли з'явилися перші ідеї про автоматизацію управління енергосистемами. У 1970-х роках, через зростання попиту на електроенергію та необхідність підвищення надійності мереж, були створені перші автоматизовані системи управління. З появою цифрових технологій у 1990-х роках ідея Smart Grid отримала новий поштовх до розвитку. Інтеграція інформаційних технологій дозволила розробляти інтелектуальні лічильники, системи моніторингу та прогнозування, які стали основою сучасних Smart Grid [13]. Smart Grid — це сучасна концепція енергомереж, яка поєднує традиційні енергосистеми з новітніми цифровими технологіями. Основною метою Smart Grid є підвищення ефективності управління енергоспоживанням, інтеграція відновлюваних джерел енергії та забезпечення стабільності роботи енергосистеми. Вона базується на використанні інтелектуальних лічильників, датчиків, систем управління та аналізу даних у реальному часі.

### **Переваги Smart Grid:**

- Гнучкість: Дозволяє інтегрувати різноманітні джерела енергії, включаючи DER, у єдину систему.
- Енергоефективність: Забезпечує зменшення втрат енергії під час її передачі та розподілу.
- Прогнозування та моніторинг: Завдяки аналізу великих даних (Big Data) і застосуванню штучного інтелекту забезпечується точне прогнозування споживання та оптимізація виробництва енергії.
- Покращення надійності: Smart Grid дозволяє швидко реагувати на аварії та мінімізувати час відновлення енергопостачання.

### **Основними компонентами Smart Grid є:**

- Інтелектуальні лічильники: Забезпечують точний облік споживання енергії та передають дані в реальному часі.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- Автоматизовані системи управління: Оптимізують роботу мереж, знижуючи ризик перевантажень.
- Центри аналізу даних: Обробляють інформацію з усієї мережі, забезпечуючи ефективне управління.
- Системи кібербезпеки: Захищають мережу від зовнішніх загроз.

Інтелектуальні енергомережі є важливим етапом у переході до більш стійких та екологічних енергосистем, оскільки вони сприяють інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищенню енергоефективності.

### **1.7 Системи управління розподільчими мережами (DMS, Distribution Management Systems)**

Історія систем управління розподільчими мережами (Distribution Management Systems, DMS) розпочалася у 1980-х роках із впровадження перших автоматизованих систем для моніторингу та управління розподільчими мережами. Протягом 1990-х та 2000-х років розвиток технологій призвів до створення інтегрованих систем, що забезпечують ефективне управління розподілом енергії, зокрема через інтеграцію з розподіленими енергетичними ресурсами (DER) та інтелектуальними мережами (Smart Grid) [14]. DMS — це комплекс програмних та апаратних рішень, які використовуються для моніторингу, аналізу та оптимізації роботи розподільчих мереж у реальному часі. Вони забезпечують баланс між попитом і пропозицією, зменшують втрати енергії та підвищують стабільність роботи енергосистеми.

#### **Переваги DMS:**

- **Оперативний моніторинг:** Забезпечує точний контроль за станом мережі та виявлення потенційних проблем.
- **Автоматизація процесів:** Зменшує необхідність ручного втручання та підвищує точність роботи системи.
- **Інтеграція з DER та Smart Grid:** Підвищує ефективність енергосистеми через об'єднання різних компонентів в єдину інфраструктуру.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Економія ресурсів:** Дозволяє оптимізувати використання енергетичних ресурсів і знижувати експлуатаційні витрати.

#### **Основні функції DMS:**

- **Моніторинг та аналіз:** Збір даних про роботу мережі та їхній аналіз для виявлення потенційних проблем.
- **Управління навантаженням:** Оптимізація розподілу енергії в мережі залежно від поточного попиту.
- **Аварійне відновлення:** Автоматизація процесів відновлення енергопостачання після аварій.
- **Прогнозування:** Аналіз тенденцій споживання та генерації для оптимального планування роботи мережі.

Системи DMS є невід'ємною частиною сучасних енергетичних інфраструктур, сприяючи підвищенню надійності, ефективності та стійкості енергосистем. DER забезпечують локальне виробництво енергії за допомогою відновлюваних джерел та накопичувачів енергії, що сприяє зменшенню втрат під час транспортування та підвищують надійність мережі. Smart Grid є єдиною цифровою платформою, що інтегрує DER, забезпечує моніторинг та автоматизацію управління енергосистемою за рахунок аналізу даних у реальному часі. DMS фокусуються на оптимізації та аварійному відновленні розподільчих мереж; їх головна ціль — забезпечити баланс попиту та пропозиції, знижуючи ризики перевантаження та підвищуючи стійкість системи.

### **1.8 Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)**

Історія тренду інтеграції ВДЕ бере початок у другій половині ХХ століття, коли глобальна залежність від викопного палива та екологічні кризи змусили світ шукати альтернативні джерела енергії. Перші комерційні сонячні електростанції почали з'являтися в 1970-х роках, а вітрові ферми отримали розвиток у 1980-х. Завдяки технологічним проривам, таким як зменшення вартості сонячних панелей і вітрових турбін, у ХХІ столітті ці джерела стали доступнішими для широкого використання [15].

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Суть інтеграції ВДЕ полягає у залученні відновлюваних джерел енергії до енергетичних систем як основних або додаткових джерел генерації. Цей тренд спрямований на зниження залежності від викопного палива, зменшення викидів парникових газів і підвищення стійкості енергосистем. Інтеграція ВДЕ включає використання сонячних панелей, вітрових турбін, гідроелектростанцій та інших джерел, які поєднуються з традиційними системами генерації. Завдяки розвитку технологій накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї, інтеграція ВДЕ стала ще ефективнішою.

ВДЕ мають низку переваг: забезпечують екологічність, знижують енергетичні витрати в довгостроковій перспективі та сприяють енергетичній незалежності регіонів. Водночас вони вимагають вдосконалення систем управління, таких як Smart Grid та DMS, для оптимального балансу попиту і пропозиції, а також стабільності енергопостачання.

### **1.9 Використання батарей як віртуальних джерел**

Використання батарей як віртуальних джерел, також відоме як акумуляторні віртуальні електростанції (ABES) або віртуальні електростанції на базі накопичувачів енергії (BESHE), є перспективною концепцією сучасної енергетики. Основна ідея полягає у створенні інтегрованої мережі, яка об'єднує розподілені накопичувачі енергії, такі як акумулятори, для забезпечення стабільної роботи енергосистеми. Ці системи здатні надавати різноманітні послуги, включаючи балансування навантаження, підтримку напруги та забезпечення резервного живлення [16].

ABES зосереджуються на використанні акумуляторів як основних елементів для генерації віртуальної потужності. Цей підхід дозволяє ефективно управляти енергетичними потоками в реальному часі, особливо у випадках пікового споживання. BESHE, у свою чергу, охоплюють ширший спектр технологій накопичення, таких як гідроакумуляуючі електростанції, теплові накопичувачі та водневі системи. Вони спрямовані на максимальне використання доступних ресурсів для створення стійкої та надійної енергосистеми.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключова відмінність між АВЕС та ВЕСНЕ полягає в їхньому функціональному фокусі. АВЕС орієнтовані на використання фізичних накопичувачів, тоді як ВЕСНЕ концентруються на інтеграції різноманітних технологій зберігання енергії для забезпечення гнучкості енергетичних мереж. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до змінних умов генерації та споживання, зокрема при інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Застосування акумуляторних систем як віртуальних електростанцій стає важливим компонентом децентралізованої енергетики. Завдяки їхній здатності до масштабування, швидкого реагування та інтеграції з розумними мережами (Smart Grid), ці технології відіграють ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки та стабільності в умовах зростання попиту на електроенергію.

### **1.10 Енергетичні хаби (Energy Hubs)**

Енергетичні хаби (Energy Hubs) є багатофункціональними системами, що координують виробництво, зберігання, розподіл і споживання енергії з різних джерел, таких як електроенергія, тепло, газ тощо. Їхня історія починається з другої половини ХХ століття, коли з'явилася потреба інтеграції різних видів енергії для підвищення ефективності використання ресурсів. Завдяки розвитку цифрових технологій і концепції Smart Grid у 2000-х роках, енергетичні хаби стали реальністю.

Прикладом енергетичного хабу є інтегрована система, що використовує сонячні панелі для генерації електроенергії, теплові насоси для забезпечення опалення і системи зберігання енергії для балансування попиту та пропозиції. Така система може працювати автономно або бути підключеною до загальної енергомережі, забезпечуючи ефективне управління енергією в масштабах одного об'єкта або регіону.

Енергетичні хаби (Energy Hubs) значно ширші за своїм функціоналом у порівнянні з АВЕС (акумуляторними віртуальними електростанціями) або ВЕСНЕ (віртуальними електростанціями на базі накопичувачів енергії).

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Енергетичні хаби значно ширші за своїм функціоналом порівняно з акумуляторними віртуальними електростанціями (АВЕС) або віртуальними електростанціями на базі накопичувачів енергії (ВЕСНЕ). [17] Вони поєднують декілька видів енергії (електроенергію, тепло, газ) та інтегрують різні технології для оптимізації споживання та розподілу ресурсів. АВЕС/ВЕСНЕ зосереджуються виключно на електроенергії, використовуючи накопичувачі для балансування попиту та пропозиції в мережі. Основна різниця полягає у масштабі та сфері охоплення: енергетичні хаби спрямовані на багатофункціональне управління енергією, тоді як АВЕС/ВЕСНЕ орієнтовані лише на електричну енергію та її накопичення.

### 1.11 Інтернет речей (ІоТ) у енергетиці

Інтернет речей (ІоТ) у енергетиці є одним із ключових трендів сучасності, що забезпечує інтеграцію фізичних пристроїв у єдину інформаційну мережу. Історія використання ІоТ у цій сфері почалася в 2000-х роках, коли розвиток бездротових технологій і датчиків дозволив впроваджувати системи моніторингу та управління в реальному часі. Згодом зростання обчислювальних потужностей і зниження вартості обладнання зробили ці технології доступними для широкого використання.

ІоТ у енергетиці дозволяє підвищити ефективність роботи енергосистем шляхом збору та аналізу даних від різноманітних пристроїв, таких як розумні лічильники, датчики, накопичувачі енергії та генератори [18]. Ці дані використовуються для прогнозування попиту, оптимізації роботи енергосистеми та забезпечення її стабільності.

Основні переваги ІоТ у енергетиці:

**Реальний час:** Можливість отримувати дані про стан енергосистеми та споживання в реальному часі.

**Оптимізація:** Зменшення втрат енергії через оптимальне управління розподілом та споживанням.

					02.15. ЕЕ2226.КРМ.2023 – ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Інтеграція:** Легке поєднання з відновлюваними джерелами енергії, DER та Smart Grid.

**Покращення обслуговування:** Виявлення потенційних несправностей та їх швидке усунення завдяки автоматизованим системам.

ІоТ також відкриває нові можливості для інтеграції енергосистем із розумними будинками, транспортом та іншими галузями, створюючи єдину екосистему, яка підвищує енергоефективність та забезпечує сталий розвиток.

Прикладом використання ІоТ у енергетиці є інтеграція розумних лічильників, які дозволяють операторам енергосистем отримувати дані про споживання енергії в реальному часі. Це дає змогу оптимізувати розподіл енергії та уникати перевантажень у мережі. Інший приклад — використання датчиків на відновлюваних джерелах енергії, таких як вітрові турбіни та сонячні панелі, для прогнозування їхньої генерації та забезпечення стабільності енергосистеми.

### **1.12 Гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS, Flexible AC Transmission Systems)**

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) — це набір технологій, спрямованих на підвищення стабільності, ефективності та пропускної здатності систем передачі змінного струму. Їхня історія бере початок у 1980-х роках, коли з'явилися перші рішення для активного управління параметрами енергетичних мереж [19]. Завдяки розвитку силової електроніки, FACTS поступово стали ключовим компонентом сучасних енергосистем.

Основна мета FACTS полягає в забезпеченні гнучкості та надійності електромереж шляхом активного регулювання напруги, потоку потужності та частоти. Ці технології дозволяють оптимально використовувати існуючу інфраструктуру, зменшуючи необхідність у будівництві нових ліній передачі та підвищуючи енергоефективність системи.

FACTS охоплює широкий спектр технологій, зокрема:

**Статичні компенсатори реактивної потужності (SVC):**  
Використовуються для регулювання напруги та компенсації реактивної

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

потужності в реальному часі, що забезпечує стабільність мережі навіть при різких змінах навантаження.

**Управління потоком потужності (UPFC):** Ця технологія дозволяє ефективно розподіляти потоки енергії у мережі, зменшуючи перевантаження та забезпечуючи оптимальний розподіл потужності між різними лініями передачі.

**Гнучкі лінійні компенсатори (TCSC):** Дозволяють адаптувати параметри мережі до змінних умов роботи, покращуючи її стабільність і гнучкість.

FACTS також сприяють інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, у високовольтні мережі, зменшуючи вплив нестабільності генерації відновлюваної енергії на загальну роботу системи.

Відмінності між FACTS та іншими технологіями, такими як Smart Grid чи DMS, полягають у їхньому фокусі на магістральних високовольтних мережах. FACTS орієнтовані на управління параметрами цих мереж, тоді як Smart Grid охоплюють ширший спектр функцій, включаючи розподільчі мережі та інтеграцію розподілених джерел енергії. Водночас FACTS є важливим доповненням до Smart Grid, забезпечуючи стабільність і надійність роботи магістральних ліній передачі.

Таким чином, FACTS є ключовими технологіями для підвищення ефективності та надійності сучасних енергосистем, особливо в умовах зростаючої частки відновлюваних джерел енергії.

### **1.13 Мережі з нульовими викидами (Zero Emission Grids)**

Мережі з нульовими викидами є ключовим напрямком сучасної енергетики, спрямованим на зменшення впливу енергосистем на довкілля. Ідея таких мереж виникла в контексті боротьби зі змінами клімату, особливо після укладення Паризької угоди у 2015 році, яка закликала країни зменшити викиди парникових газів до нуля до середини XXI століття.

Основна концепція цих мереж полягає у забезпеченні стабільного енергопостачання без використання викопного палива та без викидів CO<sub>2</sub>. Основними компонентами є відновлювані джерела енергії (ВДЕ), такі як сонячні,

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

вітрові та гідроелектростанції, а також передові технології накопичення енергії, зокрема акумуляторні батареї або водневі накопичувачі [20]. Системи накопичення енергії дозволяють зберігати надлишкову енергію, створену від ВДЕ, для її подальшого використання. Інтелектуальні мережі (Smart Grid) забезпечують моніторинг та управління потоками енергії, підтримуючи баланс між генерацією та споживанням у реальному часі. Технології декарбонізації, зокрема електрифікація транспорту та впровадження енергоефективних процесів, сприяють сталому розвитку.

Прикладом реалізації є Ісландія, де майже 100% електроенергії генерується з відновлюваних джерел, таких як гідро- та геотермальні електростанції. У Данії значна частина енергії виробляється вітровими електростанціями, включаючи офшорні вітропарки. У Німеччині реалізується проект "Energiewende", спрямований на перехід до повністю вуглецево-нейтральної енергетичної системи до 2050 року.

Незважаючи на переваги, створення таких мереж стикається з викликами, серед яких висока вартість інфраструктури, необхідність розвитку технологій накопичення енергії та інтеграції ВДЕ у масштабні енергомережі. Проте поступовий прогрес у цих напрямках робить досягнення цілей нульових викидів реалістичним.

### 1.14 Розумні будівлі (Smart Buildings)

Розумні будівлі є важливим компонентом сучасної енергетичної екосистеми, інтегруючи передові технології для автоматизації, моніторингу та управління енергоспоживанням. Їх розвиток став можливим завдяки поширенню Інтернету речей (IoT) та інтелектуальних систем керування, що набули популярності у 2000-х роках.

Головною особливістю таких будівель є здатність адаптуватися до змінних умов і потреб [21]. Використовуючи датчики та IoT-пристрої, вони збирають дані про температуру, рівень вологості, освітлення й енергоспоживання, які обробляються інтелектуальними системами. Це дозволяє автоматично

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювати параметри для забезпечення комфорту та енергоефективності. Наприклад, системи управління освітленням можуть вимикати світло у порожніх приміщеннях або регулювати його яскравість залежно від природного освітлення.

Крім того, розумні будівлі активно інтегрують відновлювані джерела енергії, такі як сонячні панелі, для зменшення залежності від викопних ресурсів. Системи накопичення енергії, як-от акумулятори, дозволяють зберігати надлишкову енергію для подальшого використання. Інтеграція зі Smart Grid створює можливість обміну енергією з іншими об'єктами чи мережею, покращуючи загальну енергоефективність.

Розумні будівлі сприяють значному зменшенню енергоспоживання завдяки автоматизації процесів, інтеграції відновлюваних джерел енергії та використанню інтелектуальних рішень. Вони також підтримують глобальні цілі сталого розвитку, скорочуючи викиди парникових газів і використання викопних ресурсів. Незважаючи на високу вартість впровадження, розвиток технологій робить такі будівлі більш доступними, що відкриває шлях до їх масового застосування в майбутньому.

### **1.15 Енергонезалежні будівлі**

Останнім часом усе більшої популярності набувають концепції «нульового споживання енергії» (Net Zero Energy Building) та «позитивної енергії» (Positive Energy Building), спрямовані на створення будівель, що не лише мінімізують енергоспоживання, але й самостійно виробляють енергію [22].

#### **Пасивні будівлі (Passive Houses)**

Метою таких споруд є мінімізація теплових втрат при збереженні комфортного мікроклімату. Цього досягають завдяки високій теплоізоляції, герметичності конструкцій, відсутності «містків холоду» та використанню рекуперації тепла через вентиляцію. Пасивні будівлі значно скорочують витрати на опалення та кондиціонування, забезпечуючи при цьому екологічну ефективність.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

### **Будівлі з нульовим споживанням енергії (Net Zero Energy Buildings)**

Такі будівлі мають на меті виробляти стільки ж енергії з відновлюваних джерел, скільки споживають. Це можливо завдяки поєднанню пасивних технологій (теплоізоляція, герметичність) із активними (сонячні панелі, теплові насоси) та інтелектуальними системами управління енергоспоживанням. Будівлі з нульовим енергоспоживанням мінімізують вплив на довкілля, забезпечуючи енергетичну незалежність та економію.

### **Будівлі з позитивним енергобалансом (Positive Energy Buildings)**

Ці будівлі виробляють більше енергії, ніж споживають, передаючи надлишок у загальну мережу або накопичуючи його для подальшого використання. Для цього застосовуються потужні сонячні фотоелектричні системи, вітрогенератори, геотермальні насоси та системи накопичення енергії. Будівлі з позитивним енергобалансом не лише забезпечують автономність, але й можуть приносити додатковий дохід. Сучасні тенденції в енергетиці засвідчують перехід до більш гнучких, ефективних і екологічно сталих систем. Гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS) та інноваційні мережі, такі як Smart Grid, сприяють інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищенню стабільності роботи енергосистем. Вони забезпечують оптимізацію потоків енергії, регулювання напруги і зниження перевантажень без значних витрат на модернізацію інфраструктури.

Одночасно, розвиток мереж із нульовими викидами, розумних та енергонезалежних будівель підкреслює прагнення до мінімізації впливу енергетики на довкілля. Ці технології дозволяють зменшити енергоспоживання, інтегрувати відновлювані джерела та створювати більш автономні і стійкі системи.

Таким чином, сучасна енергетика орієнтується на баланс між технологічним прогресом, екологічною стійкістю та економічною ефективністю, формуючи основу для переходу до зеленої енергетичної екосистеми. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, використання розумних мереж (Smart Grid) та

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем накопичення енергії відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності енергосистем.

Застосування розподілених енергетичних ресурсів (DER), гнучких систем передачі змінного струму (FACTS) та інтернету речей (IoT) сприяє створенню автономних і енергоефективних рішень, що відповідають сучасним викликам.

Для перевірки цих підходів необхідно оцінити їх ефективність у реальних умовах через аналіз енергозабезпечення конкретного об'єкта та моделювання роботи енергосистеми із застосуванням сучасних технологій. Наступний розділ присвячено дослідженню практичного використання зазначених концепцій для оцінки їх доцільності та ефективності.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У попередньому розділі детально проаналізовано сучасні концепції та тренди в енергозабезпеченні, які включають інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, застосування інтелектуальних мереж (Smart Grid), технологій накопичення енергії, а також гнучких систем передачі змінного струму (FACTS). Ці інноваційні підходи дозволяють створювати більш стійкі, автономні та енергоефективні енергетичні системи, які відповідають сучасним вимогам екологічності та економічної доцільності.

Для перевірки доцільності впровадження вищезазначених підходів у реальних умовах, а також для оцінки їх ефективності, у даному розділі здійснено аналіз роботи системи електропостачання реального об'єкта. Це дозволяє виявити, наскільки ефективними є сучасні концепції у вирішенні практичних завдань енергозабезпечення, особливо в умовах змінних навантажень та потреби забезпечення високої надійності енергопостачання.

Особливу увагу в аналізі приділено оптимізації роботи систем накопичення енергії, які є ключовими компонентами для інтеграції відновлюваних джерел, а також моделюванню енергетичних потоків із застосуванням сучасних програмних інструментів. Такі інструменти дозволяють не лише оцінити поточну ефективність системи, але й спрогнозувати її роботу за різних сценаріїв навантаження та генерації.

Дане дослідження спрямоване на демонстрацію можливостей практичного використання сучасних технологій для забезпечення стабільного електропостачання, підвищення енергоефективності та зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Водночас розглядається питання економічної доцільності таких рішень, що є важливим фактором при впровадженні новітніх технологій в енергетичну інфраструктуру.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зважаючи на чутливість інформації в умовах воєнного часу, детальні дані щодо місцезнаходження об'єкта, його назви та деяких технічних характеристик не розголошуються.

Досліджуваний об'єкт енергозабезпечення функціонує із застосуванням двох вводів та двох автономних генераторів, які активуються залежно від рівня навантаження та стану мережі. Додатково на об'єкті експлуатується сонячна електростанція (СЕС), що дозволяє знижувати споживання електроенергії з мережі та генераторів, забезпечуючи економію витрат на паливо й зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

Принципова однолінійна схема енергопостачання об'єкта, яка відображає інтеграцію всіх джерел та навантажень, наведена на рисунку 2.1 нижче. Аналіз роботи цієї системи дає змогу зрозуміти, як поєднання традиційних і відновлюваних джерел енергії може забезпечити надійність та економічну ефективність енергозабезпечення в сучасних умовах.

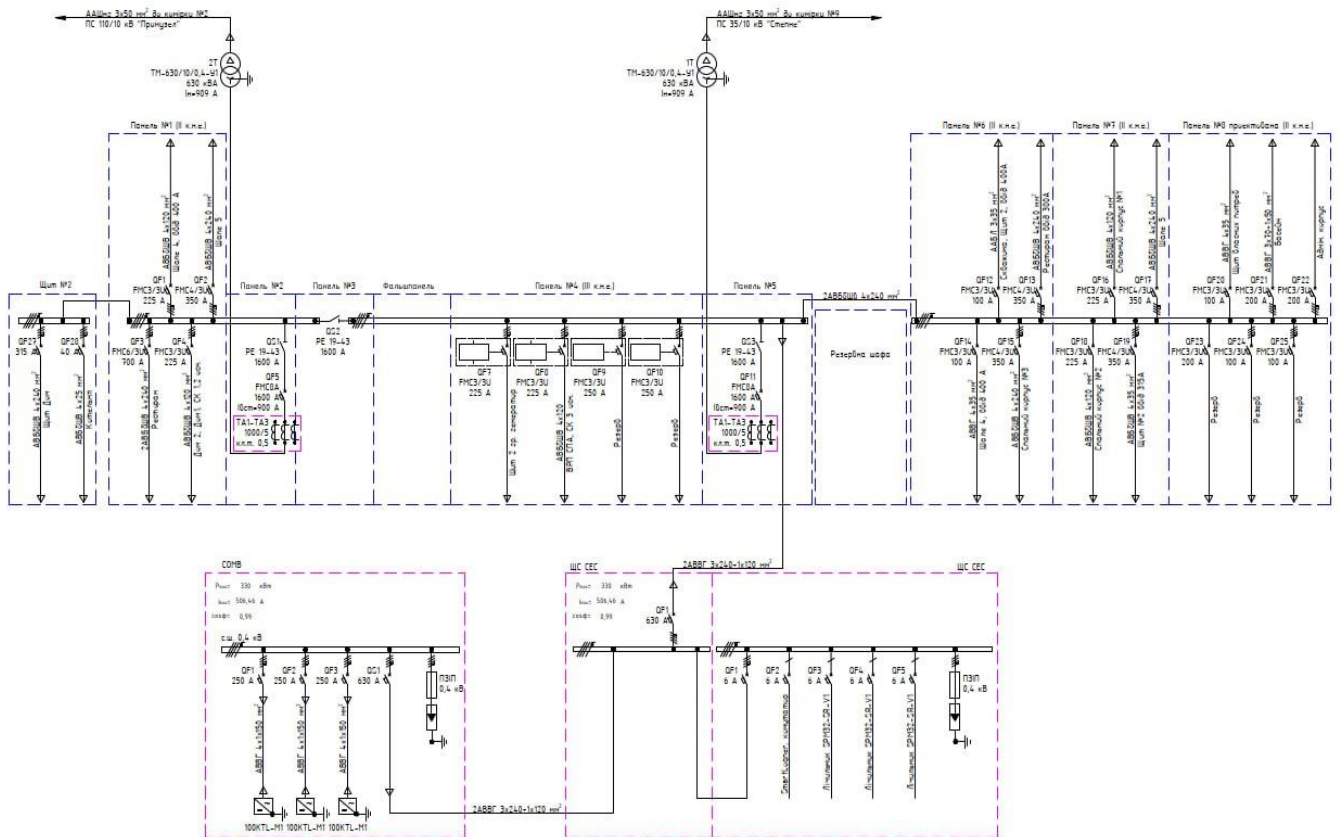


Рисунок 2.1 - Принципова схема живлення об'єкта

Розглянемо графік споживання електроенергії об'єкта, приведеного на  
 рисунку 2.2.

Помісячне споживання,  
 кВт·год

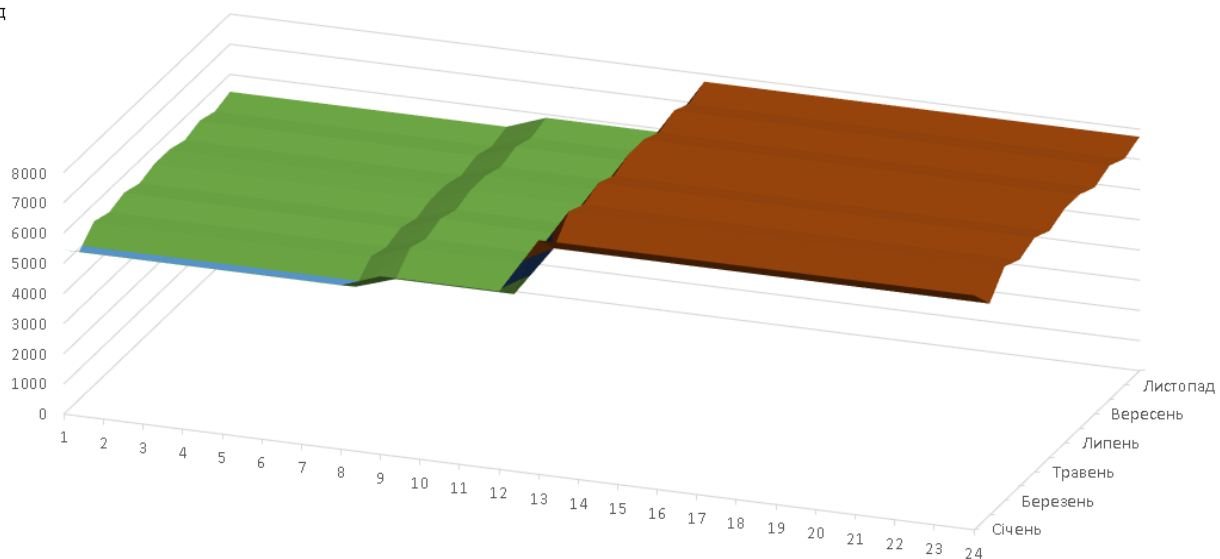


Рисунок 2.2 – Графіки навантаження об'єкта

Нижче приведена таблиця значень річного споживання мінус генерація.

Таблиця 2.1 - Річне споживання мінус генерація

	0Н	1Н	2Н	3Н	4Н	5Н	6Н	7Н	8Н
Січень	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5594
Лютий	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4738	4518
Березень	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5156	4164	3420
Квітень	5250	5250	5250	5250	5250	4876	3652	2211	1492
Травень	5425	5425	5425	5425	5142	3942	2358	637	-180
Червень	5250	5250	5250	5250	4608	3385	1900	354	-408
Липень	5425	5425	5425	5425	5092	3849	2135	490	-365
Серпень	5425	5425	5425	5425	5425	4710	3331	1894	988
Вересень	5250	5250	5250	5250	5250	5216	4442	3194	1765
Жовтень	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5250	4536	4003
Листопад	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5097	5027
Грудень	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5425	5642

Продовження таблиці 2.1

	9Н	10Н	11Н	12Н	13Н	14Н	15Н	16Н
Січень	4976	4275	3924	5857	5975	6769	7526	7750
Лютий	3640	2837	2383	4190	4625	5335	6151	6868
Березень	2354	1600	1381	3022	3433	4523	5768	6978
Квітень	488	196	22	2191	2773	3715	4814	6028
Травень	-1106	-1513	-1115	1026	1972	3070	4313	5605
Червень	-1103	-1275	-852	1099	1319	2289	3425	4834
Липень	-1367	-1949	-1409	1327	1628	2579	3734	5187
Серпень	-358	-942	-849	1522	2124	3230	4438	5775
Вересень	688	598	888	2770	3131	4281	5564	6735
Жовтень	3172	2728	2606	4390	4694	5613	6824	7639
Листопад	4305	3957	3903	5845	6037	6737	7401	7500
Грудень	5142	4629	4413	6331	6509	7182	7735	7750
	17Н	18Н	19Н	20Н	21Н	22Н	23Н	
Січень	7750	7750	7750	7750	7750	7750	7750	
Лютий	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	
Березень	7671	7750	7750	7750	7750	7750	7750	
Квітень	7053	7486	7500	7500	7500	7500	7500	
Травень	6879	7535	7750	7750	7750	7750	7750	
Червень	6154	7126	7462	7500	7500	7500	7500	
Липень	6464	7339	7722	7750	7750	7750	7750	
Серпень	7032	7604	7750	7750	7750	7750	7750	
Вересень	7409	7500	7500	7500	7500	7500	7500	
Жовтень	7750	7750	7750	7750	7750	7750	7750	
Листопад	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	
Грудень	7750	7750	7750	7750	7750	7750	7750	

З аналізу табличних даних можна зробити висновок щодо оптимальної потужності сонячної електростанції (СЕС). Проте, в ранкові та передобідні години спостерігається зрізання виробленої електроенергії через надлишок генерації. У зв'язку з цим доцільно розглянути впровадження системи накопичення електроенергії, яка акумулюватиме надлишкову енергію, вироблену СЕС, і забезпечуватиме її використання в години пікового навантаження або високої вартості електроенергії.

Також планується розробити алгоритм заряду-розряду накопичувача з урахуванням багатокритеріальної задачі оптимізації. Такий алгоритм буде базуватися на фінансових показниках і спрямований на визначення найефективнішого джерела живлення в конкретний момент часу. До джерел

живлення розглядатимуться: введення 1, введення 2, генератор 1, генератор 2, СЕС, накопичувач, а також їх комбіноване використання.

Змоделюємо в програмі PVsyst V7.3.1.

На рисунку 2.3 представлено скріншот із програмного забезпечення, який демонструє географічні параметри об'єкта (координати, висота, альbedo), характеристики системи (погодні умови, орієнтація панелей, конфігурація) та результати моделювання. Система генерує 261.2 МВт·год на рік зі співвідношенням потужностей DC/AC 1.22.

Project summary					
<b>Geographical Site</b>		<b>Situation</b>		<b>Project settings</b>	
Sosnivka		Latitude	49.60 °N	Albedo	0.20
Ukraine		Longitude	34.66 °E		
		Altitude	89 m		
		Time zone	UTC+2		
<b>Meteo data</b>					
Sosnivka					
Meteonorm 8.1 (1996-2015), Sat=100% - Synthetic					
System summary					
<b>Grid-Connected System</b>		<b>Tables on a building</b>		<b>User's needs</b>	
<b>PV Field Orientation</b>		<b>Near Shadings</b>		Unlimited load (grid)	
Fixed planes 3 orientations		Linear shadings			
Tilts/azimuths 7 / 101 °					
7 / -79 °					
6 / 26.7 °					
<b>System information</b>					
<b>PV Array</b>					
Nb. of modules	573 units	<b>Inverters</b>		2 units	
Pnom total	244 kWp	Nb. of units		200 kWac	
		Pnom total		1.218	
		Pnom ratio			
Results summary					
Produced Energy	261.2 MWh/year	Specific production	1073 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	87.33 %
Table of contents					
Project and results summary					2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses					3
Near shading definition - Iso-shadings diagram					6
Main results					8
Loss diagram					9
Predef. graphs					10
P50 - P90 evaluation					16

Рисунок 2.3 – Географічні параметри системи, погодні умови

Далі на рисунку 2.4 наведені дані, які стосуються втрат у системі. Представлено оцінку втрат масиву через забруднення (3%), температурні впливи, деградацію панелей (LID – 2%), а також через неузгодженість модулів і проводки. Вказано

параметри втрат у проводах для постійного (DC) та змінного (AC) струму, а також ефективність роботи інверторів. Ці дані деталізують джерела зниження ефективності системи та допомагають в оцінці її продуктивності.

PV Array Characteristics			
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	244 kWp	Total power	200 kWac
Total	573 modules	Number of inverters	2 units
Module area	1145 m <sup>2</sup>	Pnom ratio	1.22
Cell area	1051 m <sup>2</sup>	No Power sharing	

Array losses									
<b>Array Soiling Losses</b>		<b>Thermal Loss factor</b>		<b>LID - Light Induced Degradation</b>					
Loss Fraction	3.0 %	Module temperature according to irradiance		Loss Fraction	2.0 %				
		Uc (const)	29.0 W/m <sup>2</sup> K						
		Uv (wind)	0.0 W/m <sup>2</sup> K/m/s						
<b>Module Quality Loss</b>		<b>Module mismatch losses</b>		<b>Strings Mismatch loss</b>					
Loss Fraction	-0.8 %	Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %				
<b>IAM loss factor</b>									
Incidence effect (IAM): User defined profile									
	0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
	1.000	1.000	0.998	0.993	0.967	0.924	0.822	0.580	0.000

DC wiring losses			
Global wiring resistance	10 mΩ		
Loss Fraction	1.5 % at STC		
<b>Array #1 - Sub-array #5</b>		<b>Array #2 - Sub-array #2</b>	
Global array res.	152 mΩ	Global array res.	1000 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC	Loss Fraction	1.5 % at STC
<b>Array #3 - Sub-array #3</b>		<b>Array #4 - Sub-array #4</b>	
Global array res.	161 mΩ	Global array res.	161 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC	Loss Fraction	1.5 % at STC
<b>Array #5 - Sub-array #5</b>		<b>Array #6 - Sub-array #6</b>	
Global array res.	177 mΩ	Global array res.	1125 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC	Loss Fraction	1.5 % at STC
<b>Array #7 - Sub-array #7</b>		<b>Array #8 - Sub-array #8</b>	
Global array res.	531 mΩ	Global array res.	500 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC	Loss Fraction	1.5 % at STC

AC wiring losses			
<b>Inv. output line up to injection point</b>			
Inverter voltage	400 Vac tri		
Loss Fraction	2.41 % at STC		
<b>Inverter: SUN2000-100KTL-M2-400V</b>			
Wire section (2 Inv.)	Alu 2 x 3 x 400 mm <sup>2</sup>		
Average wires length	400 m		

Рисунок 2.4 - Втрати енергії у системі

На рисунку 2.5 нижче наведено скрін із параметрами затінення, які описують вплив тіней на продуктивність системи.

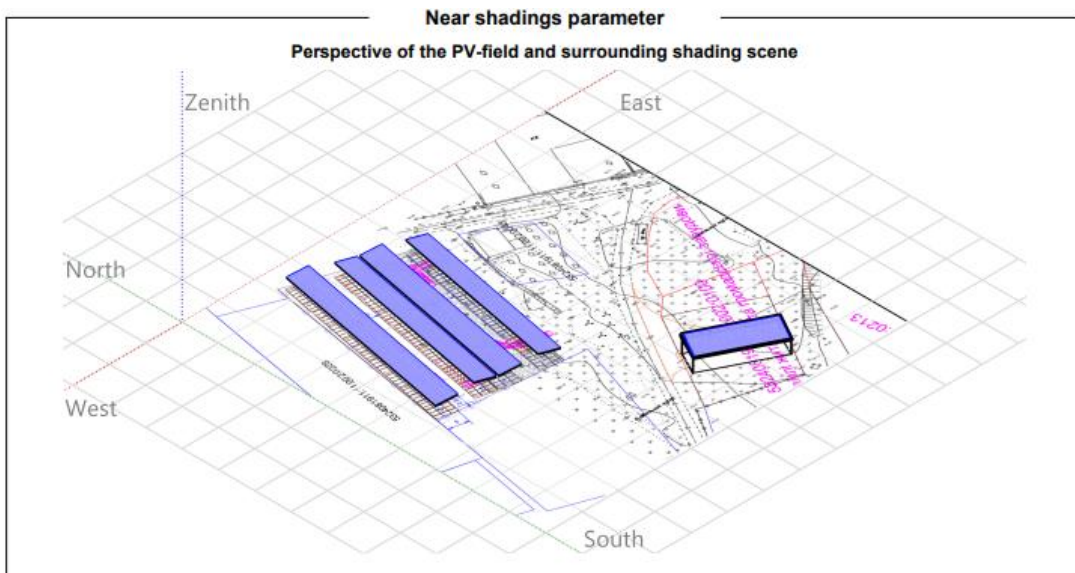


Рисунок 2.5 - Параметри затінення

На рисунку 2.6 наведено скрін із даними про основні результати системи, включаючи річне виробництво електроенергії, специфічне вироблення, показник ефективності (PR) та баланс енергії за місяцями.

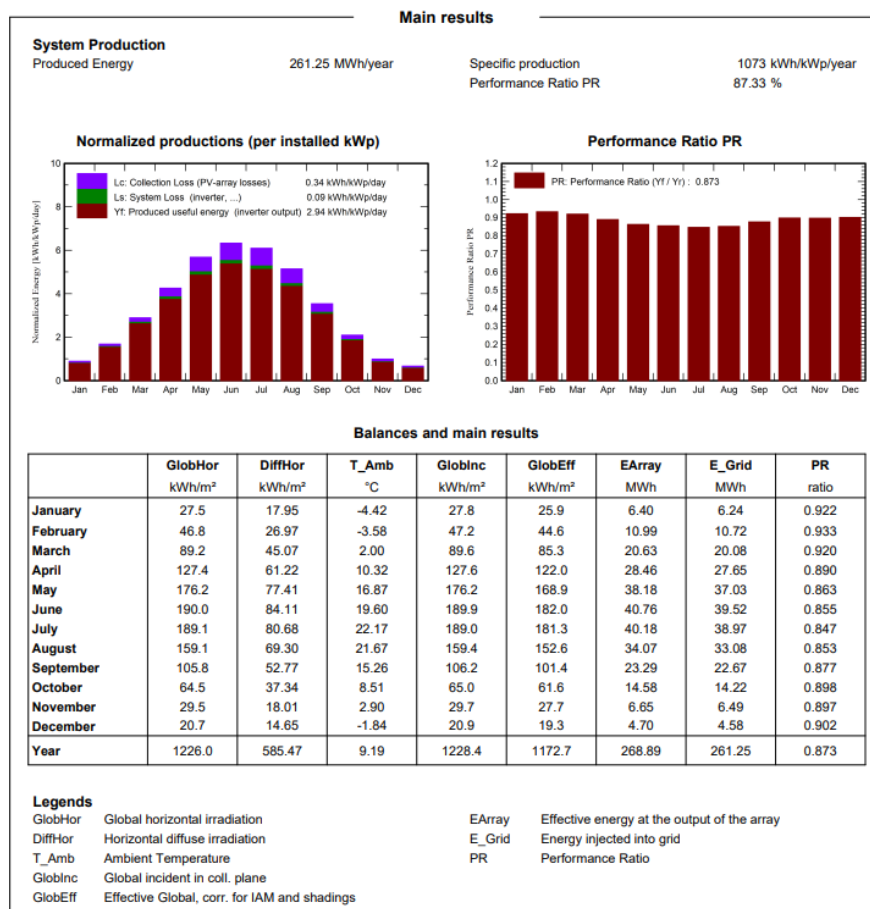


Рисунок 2.6 - Основні результати системи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

На рисунку 2.7 наведено скрін із діаграмою втрат у системі, яка демонструє розподіл втрат на різних етапах — від сонячної радіації до передачі енергії в мережу.

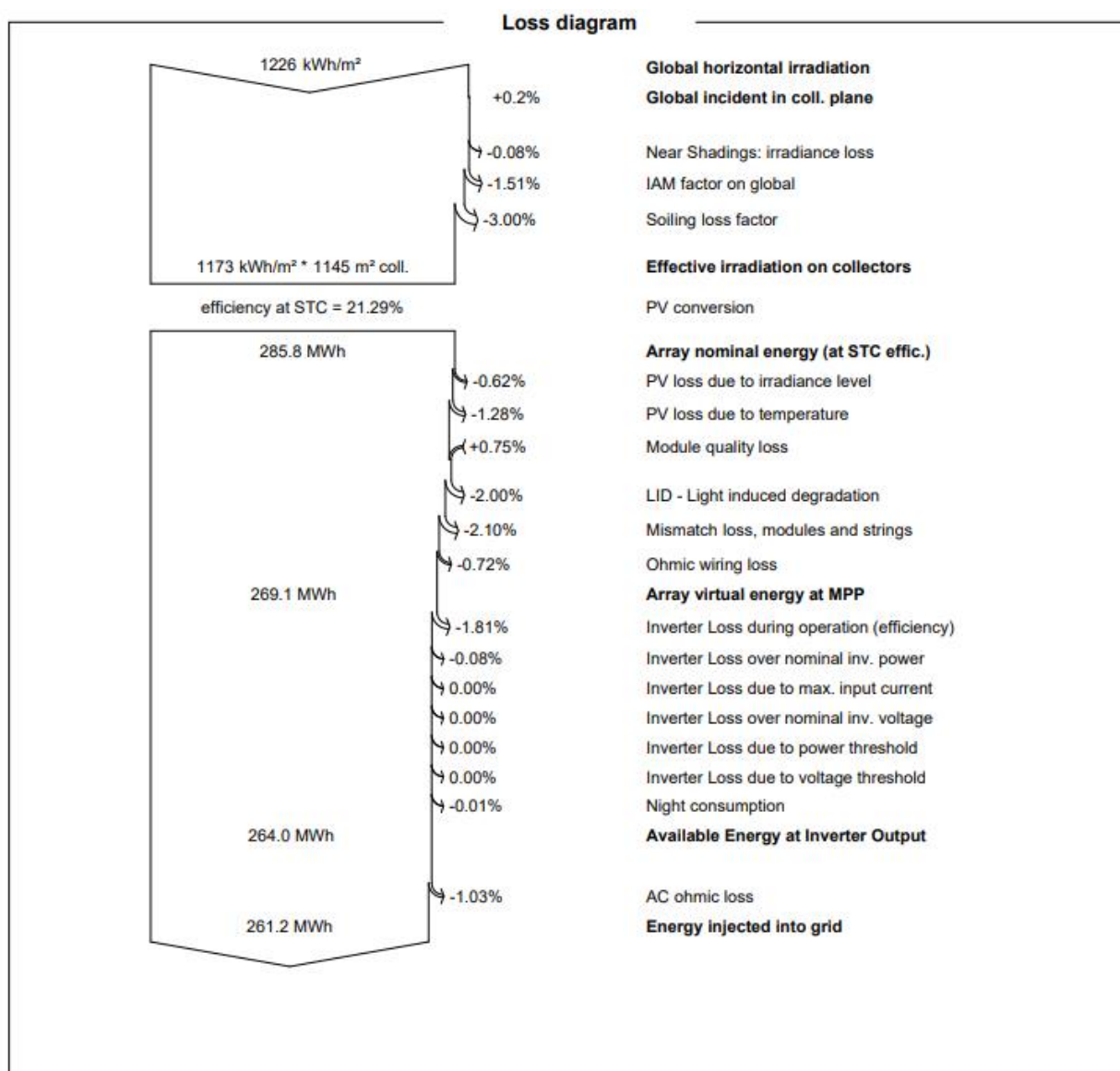


Рисунок 2.7 - Діаграма втрат системи

Нижче наведені табличні погодинні значення накопичення електроенергії для кожного місяця року.

Таблиця 2.2 - Накопичення електричної енергії

	0Н	1Н	2Н	3Н	4Н	5Н	6Н	7Н	8Н	9Н	10Н	11Н	12Н
Січень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лютий	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Березень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	141	108	0
Квітень	0	0	0	0	0	0	0	0	4	203	333	341	0
Травень	0	0	0	0	0	0	0	90	285	622	795	680	0
Червень	0	0	0	0	0	0	0	98	266	580	763	580	0
Липень	0	0	0	0	0	0	0	60	287	631	848	682	0
Серпень	0	0	0	0	0	0	0	0	67	347	562	541	0
Вересень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	162	157	0
Жовтень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	17	0
Листопад	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Грудень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13Н	14Н	15Н	16Н	17Н	18Н	19Н	20Н	21Н	22Н	23Н		
Січень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лютий	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Березень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Квітень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Травень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Червень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Липень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Серпень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вересень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Жовтень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Листопад	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Грудень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В таблиці 2.3 приведені значення видачі накопиченої електроенергії в мережу.

Таблиця 2.3 - Видачі накопиченої електроенергії

	0Н	1Н	2Н	3Н	4Н	5Н	6Н	7Н	8Н	9Н	10Н	11Н	12Н
Січень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лютий	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Березень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	224
Квітень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	12	456
Травень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	188	807
Червень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	12	201	844
Липень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	25	335	814
Серпень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	89	713
Вересень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	22	346
Жовтень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27
Листопад	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Грудень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Закінчення таблиці 2.3

	13Н	14Н	15Н	16Н	17Н	18Н	19Н	20Н	21Н	22Н	23Н
Січень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лютий	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Березень	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Квітень	276	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Травень	607	468	263	3	0	0	0	0	0	0	0
Червень	622	364	123	0	0	0	0	0	0	0	0
Липень	501	414	250	38	0	0	0	0	0	0	0
Серпень	366	271	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Вересень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Жовтень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Листопад	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Грудень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Існуючі засоби аналізу дозволяють зробити висновок про можливість використання зайвої електроенергії, виробленої СЕС, в інші години доби завдяки впровадженню накопичувача енергії. Однак, для цього необхідно розробити автоматизований алгоритм управління.

## 3 АЛГОРИТМ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 3.1 Загальні умови

Вибір концепції системи забезпечення електричною енергією є складним процесом, що враховує безліч факторів. До основних аспектів, які впливають на цей вибір, належать технічні характеристики об'єкта, економічна доцільність, екологічні вимоги, доступність енергоресурсів та можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії. Процес потребує всебічного аналізу умов експлуатації, прогнозування навантажень і врахування сучасних тенденцій розвитку енергетичних систем [23].

Для вибору концепції системи енергозабезпечення об'єкт спочатку класифікується відповідно до таких нормативних документів, як ДБН В.2.5-23:2010 "Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення" та Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Класифікація враховує тип, призначення, масштаб і умови експлуатації об'єкта [24]. При цьому розглядаються варіанти енергозабезпечення, що відповідають вимогам безпеки, енергоефективності та надійності. Після цього робиться детальний опис об'єкта, у якому ретельно аналізуються його потреби в електроенергії, специфіка умов експлуатації та можливі технічні, економічні або екологічні обмеження, що можуть вплинути на вибір системи енергозабезпечення. У разі необхідності проводиться корекція кількості джерел живлення для забезпечення надійності енергопостачання. Це може включати збільшення до двох джерел живлення або додаткове підключення резервного генератора, що дозволяє забезпечити безперебійне функціонування об'єкта за різних умов. Для об'єктів з підвищеними вимогами до надійності враховується можливість використання автономних джерел енергії [25].

Додатково, необхідно врахувати, чи йдеться про модернізацію існуючої системи енергоспоживання чи проектування для нового об'єкта. Це дозволяє адаптувати рішення до наявних умов, таких як доступність технологій у країні чи регіоні. Наприклад, геотермальна енергія може бути економічно вигідною,

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

але її використання може бути обмежене через відсутність ресурсів у конкретному регіоні. Також важливо врахувати, які технології переважають на ринку, їхню доступність і строки виконання проекту. Наприклад, інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні чи вітрові станції, може мати суттєвий вплив на економічну доцільність та ефективність системи. Встановлення таких об'єктів може потребувати додаткових досліджень з метою оптимізації розташування та продуктивності.

Крім того, слід врахувати екологічність і вплив на оточуюче середовище. Наприклад, у межах міста краще уникати використання гучних генераторів через дискомфорт для жителів, тоді як у віддалених районах важливо враховувати вплив на природу. Розташування об'єкта на площині або в зоні з сильними вітрами може впливати на вибір вітрових чи сонячних установок. Також потрібно врахувати географічні умови, такі як кількість сонячних днів у році або постійність вітрових потоків, щоб забезпечити максимально ефективне використання обраної системи.

Додатково потрібно врахувати політичний курс, за яким слідує законодавчі вимоги, економічну стабільність, а також потенційні зміни вартості енергоресурсів та державні субсидії чи податкові пільги для використання певних джерел енергії. Також потрібно врахувати міжнародні зобов'язання щодо зниження викидів парникових газів, які можуть впливати на вибір джерел енергії. Необхідно також врахувати законодавчі вимоги, такі як екологічні нормативи та стандарти безпеки й енергоефективності. При проектуванні обов'язковим є проведення оцінки впливу на навколишнє середовище, яка дозволяє визначити екологічні ризики та заходи їх мінімізації.

Ризики експлуатації включають можливість аварій чи збоїв у роботі системи, а також вразливість до стихійних лих, таких як землетруси, повені чи сильні вітри. Для зменшення таких ризиків необхідно передбачити використання сучасних систем моніторингу та управління енергетичними ресурсами. Соціальні аспекти охоплюють вплив на населення поблизу об'єкта та сприйняття громади щодо використання певних джерел енергії, наприклад, ядерної. Для

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

забезпечення соціальної підтримки важливо проводити інформаційну кампанію та консультації з місцевими громадами. Технічні інновації передбачають впровадження нових технологій для підвищення енергоефективності та можливості модернізації системи в майбутньому.

Зокрема, варто розглянути можливість використання розумних мереж (smart grids), які дозволяють інтегрувати відновлювані джерела енергії та оптимізувати споживання енергії. Кліматичні особливості, такі як температурні умови та рівень опадів, впливають на ефективність обладнання та роботу певних систем. Врахування цих аспектів дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з несприятливими погодними умовами, та забезпечити стабільність енергопостачання. Витрати на обслуговування охоплюють довгострокові витрати на підтримку системи в робочому стані та наявність кваліфікованих спеціалістів. При цьому важливо врахувати витрати на навчання персоналу та оновлення обладнання відповідно до сучасних стандартів.

Нижче на рисунку 3.1 представлена блок-схема.

### **3.2 Енергетичний арбітраж та оптимізація BESS**

Акумуляторні системи накопичення енергії (BESS) стають невід'ємною складовою сучасних енергетичних систем, змінюючи підходи до генерації, розподілу та споживання електроенергії. Завдяки інтеграції в мережу, такі системи сприяють її стабільності, врівноважуючи попит і пропозицію. Особливу актуальність BESS набувають у контексті зростання частки відновлюваних джерел енергії, які характеризуються змінністю генерації, що залежить від погодних умов. Наприклад, енергія, згенерована у сонячний або вітряний день, може бути накопичена в BESS для подальшого використання. Таким чином, ці системи стають ключовим інструментом для інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергомережу.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

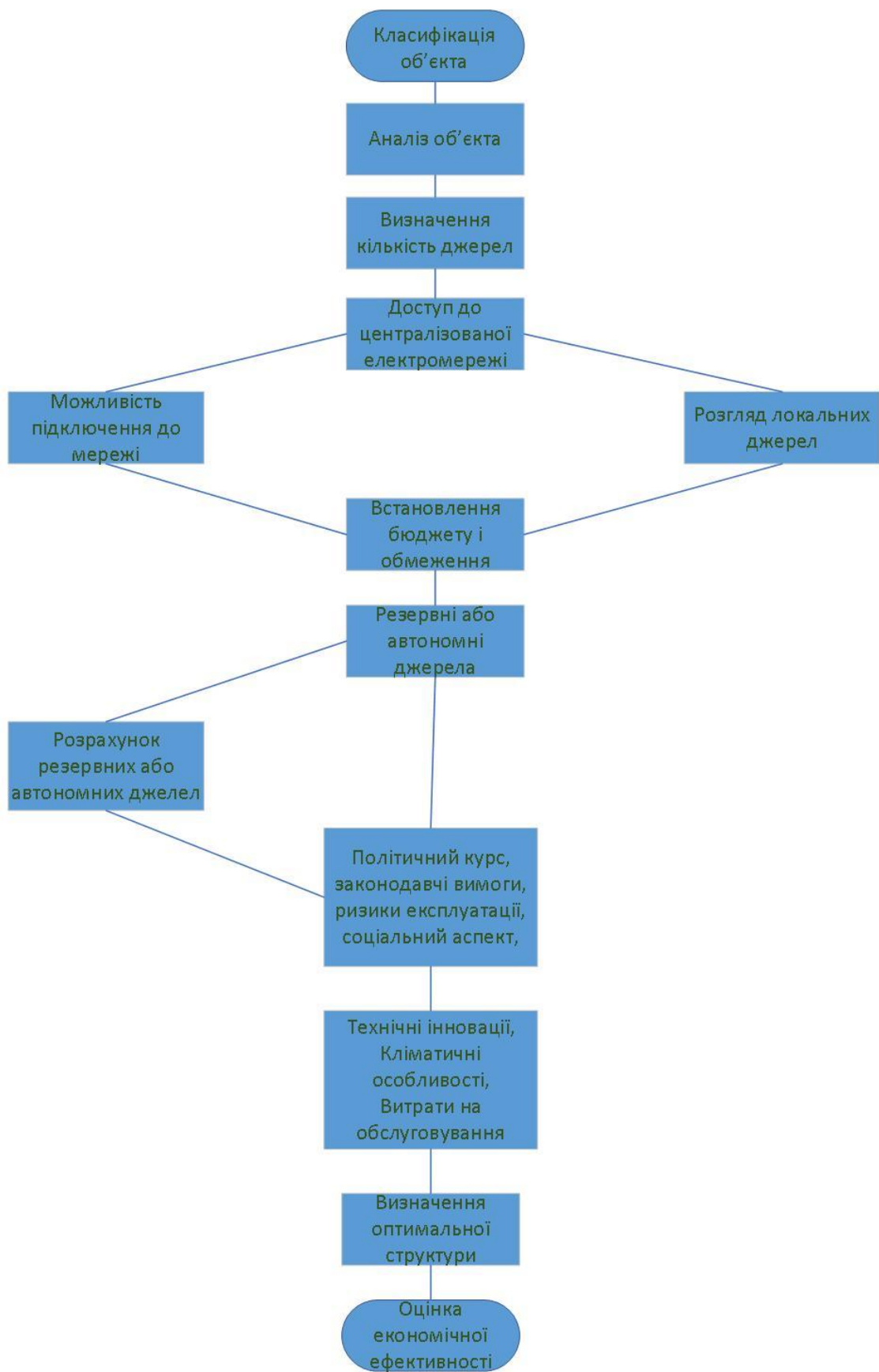


Рисунок 3.1 – блок-схема загального процесу розробки обґрунтованої концепції системи забезпечення електричною енергією

На лібералізованих ринках електроенергії ціни формуються в умовах конкуренції та залежать від співвідношення попиту і пропозиції. Непередбачуваність цих факторів спричиняє значні коливання цін на електроенергію в короткостроковій перспективі, що створює можливості для впровадження BESS. Зокрема, акумуляторні системи можуть забезпечувати прибутковість через стратегії енергетичного арбітражу, купуючи електроенергію за низькими цінами та продаючи її в періоди високого попиту. Використовуючи методи оптимізації, оператори BESS здатні розробляти ефективні графіки заряджання та розряджання, прогнозуючи їх на найближчу добу.

У цьому дослідженні представлено покроковий підхід до розробки оптимізаційної моделі за допомогою Python та інструментів з відкритим вихідним кодом для вирішення задач розгортання BESS. Окрема увага приділяється визначенню оптимальних розмірів таких систем, що дозволяє досягати максимальної економічної ефективності. Це питання стає особливо важливим у світлі зростання частки нестабільних відновлюваних джерел енергії в електромережі, що зумовлює збільшення цінових коливань.

BESS також сприяють зниженню пікових навантажень, виконуючи роль посередника між споживачами з визначеним графіком споживання електроенергії та енергосистемою. У ході роботи розроблено спрощений алгоритм, орієнтований на оптимізацію заряджання і розряджання системи з метою максимізації прибутку від енергетичного арбітражу. Такий підхід дозволяє на практиці демонструвати ефективність впровадження BESS у сучасних умовах функціонування енергетичних ринків.

### 3.3 Математичне представлення BESS в електричних мережах

Дана система об'єднує різноманітні розподілені енергетичні ресурси (DER), зокрема вітрогенератори, сонячні фотоелектричні установки та системи накопичення енергії (BESS). Сумарна потреба споживачів в електроенергії інтегрується в одне загальне навантаження. Усі ці елементи взаємодіють із

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

комунальною мережею, забезпечуючи двосторонній обмін електроенергією — як із мережі, так і до мережі.

У даній системі пріоритет надається використанню локальних розподілених енергетичних ресурсів для покриття потреб навантаження. Надлишкова вироблена енергія зберігається в BESS для подальшого використання. Водночас слід враховувати, що BESS має обмеження на обсяг зарядки, через що неможливо одночасно зберігати всю надлишкову енергію. У таких ситуаціях надлишкова електроенергія експортується назад у мережу. Цей розподіл енергії описується математичним рівнянням, наведеним нижче:

$$P_{grid}^t + P_{pv}^t + P_{wind}^t + P_{batt}^t - P_{load}^t = 0, \quad (3.1)$$

де  $P_{grid}^t$  - потужність, імпортована/експортована з/до мережі (позитивне значення — імпорт, негативне — експорт);

$P_{pv}^t$  - потужність, вироблена сонячною фотоелектричною системою;

$P_{wind}^t$  - потужність, вироблена вітрогенератором;

$P_{batt}^t$  - потужність, надана системою накопичення енергії (BESS);

$P_{load}^t$  - сумарна потужність навантаження.

Припускаючи наявність договірної угоди між роздрібним постачальником і виробником стосовно обсягів купівлі та продажу електроенергії, застосовується таке обмеження:

$$P_{max,sell} \leq P_{grid}^t \leq P_{max,buy} , \quad (3.2)$$

де  $P_{max,sell}$  - максимальна потужність, яку можна продати на рівні мережі;

$P_{max,buy}$  - максимальна потужність, яку можна купити на рівні мережі.

У разі недостатності місцевих джерел енергії для покриття потреби в навантаженні, система залучатиме додаткову електроенергію з мережі. Проте

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

обсяги цієї передачі регулюються встановленими мережевими обмеженнями, що наведені нижче:

$$P_{max,export} \leq P_{load}^t - P_{pv}^t - P_{wind}^t - P_{batt}^t \leq P_{max,import} , \quad (3.3)$$

де  $P_{max,export}$  - максимальна потужність, яку можна експортувати на рівні мережі;

$P_{max,import}$  - максимальна потужність, яку можна імпортувати на рівні мережі.

Потужність системи накопичення енергії (BESS) поділяється на дві складові: одна відповідає за зарядку, а інша — за розрядку. Її значення може бути від'ємним (під час зарядки) або додатним (під час розрядки).

$$P_{batt}^t = P_{batt,charge}^t + P_{batt,discharge}^t , \quad (3.4)$$

де  $P_{batt,charge}^t$  - потужність зарядки системи накопичення енергії (BESS);

$P_{batt,discharge}^t$  - Потужність розрядки системи накопичення енергії (BESS).

Бінарна змінна  $\sigma$  забезпечує, що зарядка і розрядка системи накопичення енергії (BESS) не можуть відбуватися одночасно. Коли  $\sigma=1$ , рівняння (3.6) стає неактивним, примушуючи потужність розрядки дорівнювати нулю, і навпаки. Окрім цього, потужність BESS повинна залишатися в межах допустимих значень, визначених її номінальними характеристиками.

$$P_{batt,charge}^t \geq \sigma^t P_{batt,charge,max} , \quad (3.5)$$

де  $\sigma^t P_{batt,charge,max}$  - максимальна потужність зарядки системи накопичення енергії (BESS).

$$P_{batt}^t \leq (1 - \sigma^t) P_{batt,discharge,max} , \quad (3.6)$$

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $P_{batt,discharge,max}$  - максимальна потужність розрядки системи накопичення енергії (BESS).

Також рівняння рівня заряду (State-of-Charge, SOC), наведене нижче, відображає обсяг енергії, що залишається в системі накопичення енергії (BESS) після кожного циклу зарядки або розрядки, з урахуванням ефективності цих процесів.

$$SOC_{batt}^t = SOC_{batt}^{t-1} - \frac{1}{E_{batt,cap}} \left( \eta_{batt,eff} P_{batt,charge}^t + \frac{P_{batt,discharge}^t}{\eta_{batt,eff}} \right) \Delta_t, \quad (3.7)$$

де  $SOC_{batt}^t$  - рівень заряду системи накопичення енергії (BESS);

$E_{batt,cap}$  - ємність системи накопичення енергії (BESS);

$\eta_{batt,eff}$  - коефіцієнт корисної дії зарядки/розрядки;

$\Delta_t$  - часовий інтервал (у годинах).

Рівень заряду (SOC) у будь-який момент часу має відповідати таким обмеженням:

$$SOC_{batt,min} \leq SOC_{batt}^t \leq SOC_{batt,max}, \quad (3.8)$$

де  $SOC_{batt,min}$  - мінімальний рівень заряду системи накопичення енергії (BESS);

$SOC_{batt,max}$  - максимальний рівень заряду системи накопичення енергії (BESS).

Головною метою цієї оптимізаційної моделі є зменшення витрат, пов'язаних з роботою системи. До цих витрат входить вартість купівлі електроенергії з мережі за спотовими ринковими цінами (цінами, що формуються в реальному часі залежно від попиту та пропозиції), що визначається наведеним нижче рівнянням:

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\min. \sum_{t \in T} P_{grid}^t C_{market}^t \Delta t, \quad (3.9)$$

де  $C_{market}^t$  - ціна електроенергії.

### 3.4 Моделювання на Python

На цьому етапі, після встановлення моделі, можна перейти до перетворення математичних рівнянь у виконуваний код і розв'язати їх із використанням розв'язувача з відкритим програмним забезпеченням.

Весь процес роботи програми складається з таких семи основних етапів:

- підготовка вхідних даних;
- оголошення розв'язувача змішаного цілочисельного програмування;
- визначення змінних;
- побудова обмежень;
- визначення цільової функції;
- розв'язання оптимізаційної задачі;
- роздрукування та збереження результатів.

Для апробації результатів будемо використовувати довільні дані.

#### 3.4.1 Підготовка вхідних даних

Як вхідні дані використовуються ринкова ціна, попит на навантаження, вітрогенерація та сонячна генерація, які мають часові позначки з інтервалом у пів години. На рисунку 3.2 представлений код для імпорту даних.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# Read Excel file
file_name = os.fsdecode("input/input_file.xlsx")
workbook = pd.ExcelFile(file_name)

output_folder = "output"
if not os.path.isdir(output_folder):
    os.makedirs(output_folder)

# Load timeseries data
marketDF = workbook.parse("Timeseries data")
marketDF = marketDF.iloc[:, :5]
marketDF.columns = ["time", "market_price_1", "load", "wind", "solar"]
marketDF = marketDF[~pd.isnull(marketDF["time"])].fillna(0)

market1DF = marketDF.copy()
market1DF.sort_values(by=["time"], inplace=True)
market1DF["time_string"] = market1DF.apply(lambda x: (x["time"] + datetime.time(0, 0, 0)), axis=1)
market1DF.set_index("time_string", inplace=True)
marketDF = market1DF

# Load static data
gridDF = workbook.parse("Grid")
gridDF = gridDF.iloc[:, :4]
gridDF.columns = ["max_buy_power", "max_sell_power", "max_import_power", "ma

```

Рисунок 3.2 – Фрагмент коду з Python для імпорту даних

### 3.4.2 Оголошення розв’язувача змішаного цілочисельного програмування

Наведений код оголошує розв’язувач, який застосовуватиметься для розв’язання оптимізаційної задачі. CBC є одним із сторонніх розв’язувачів з відкритим вихідним кодом, що підтримує змішане цілочисельне програмування.

```

# Create the mip solver with the CBC backend.
solver = pywraplp.Solver.CreateSolver("CBC")

inf = solver.infinity()

```

Рисунок 3.3 - Строка коду оголошення розв’язувача

У вхідному словнику значення даних часових рядів викликаються за допомогою відповідного ключа, представленого у форматі datetime. Для цього створюється список значень datetime, який пізніше використовується в коді,

наприклад, у циклі, що проходить через весь період часу, для пошуку потрібного ключа та отримання відповідних даних часових рядів.

```
tIndex = input["simData"]["tIndex"] # number of timeslots
dt = input["simData"]["dt"] # time interval in hour

# Create datetime array
startTime = input["simData"]["startTime"].strftime("%d/%m/%Y %H:%M")
tIndex = input["simData"]["tIndex"]
timestamp = pd.date_range(startTime, periods=tIndex, freq=str(dt * 60) + "mi")
time = [timestamp[i].strftime("%d/%m/%Y %H:%M") for i in range(len(timestamp))]
```

Рисунок 3.4 - Фрагмент коду створення списку datetime

### 3.4.3 визначення змінних

Змінні — це фізичні величини, якими можна керувати для досягнення основної мети — зменшення витрат на імпорт електроенергії з мережі.

У цій моделі визначено шість змінних:

- Grid power — живлення від мережі (безперервне, усі дійсні числа);
- BESS power — потужність BESS (безперервна, усі дійсні числа);
- BESS charging power — потужність заряджання BESS (безперервна, від'ємні дійсні числа);
- BESS discharging power — потужність розряджання BESS (безперервна, додатні дійсні числа);
- BESS charging status — статус зарядки BESS (двійкова змінна);
- BESS SOC — рівень заряду BESS (безперервна змінна в інтервалі 0–1).

У кодї нижче на рисунку 3.5 показано ініціалізацію цих змінних:

```
time_s = timeit.default_timer()
# Add timeseries variables
vGrid = [solver.NumVar(lb=-inf, ub=inf, name="") for _ in range(tIndex)]

vBattPower = [solver.NumVar(lb=-inf, ub=inf, name="") for _ in range(tIndex)]
vCharge = [solver.NumVar(lb=-inf, ub=0, name="") for _ in range(tIndex)]
vDischarge = [solver.NumVar(lb=0, ub=inf, name="") for _ in range(tIndex)]
vChargeStatus = [solver.BoolVar(name="") for _ in range(tIndex)]
vSOC = [solver.NumVar(lb=0, ub=1, name="") for _ in range(tIndex)]
```

Рисунок 3.5 – Ініціалізація змінних

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

### 3.4.4 Побудова обмежень

Обмеження для цієї моделі базуються на рівняннях 3.1–3.8, які описують ключові залежності та умови роботи системи. Ці обмеження багаторазово перевіряються протягом усього періоду моделювання (24 години, 48 часових інтервалів), щоб гарантувати, що значення змінних відповідають заданим умовам і фізичним обмеженням. Це забезпечує коректність оптимізації та реалістичність результатів. На рисунку 3.6 представлений фрагмент коду побудови обмежень.

```
# Add constraints
for i in range(tIndex):

    t = time[i]

    # Grid constraints
    solver.Add(vGrid[i] == input["market"]["load"][t] - input["market"]["sol
    solver.Add(vGrid[i] <= input["grid"]["max_buy_power"]) # Eqn. 2
    solver.Add(vGrid[i] >= -input["grid"]["max_sell_power"]) # Eqn. 2
    solver.Add(input["market"]["load"][t] - input["market"]["solar"][t] - ir
    solver.Add(input["market"]["load"][t] - input["market"]["solar"][t] - ir

    # Battery constraints
    solver.Add(vBattPower[i] == vCharge[i] + vDischarge[i]) # Eqn. 4
    solver.Add(vCharge[i] >= -input["batt"]["max_charge_rate"] * vChargeStat
    solver.Add(vDischarge[i] <= input["batt"]["max_discharge_rate"] * (1-vCh

    if i == 0:
        solver.Add(vSOC[i] == input["batt"]["initial_soc"] - dt / input["bat
    else:
        solver.Add(vSOC[i] == vSOC[i-1] - dt / input["batt"]["capacity"] * (

    solver.Add(vSOC[i] >= input["batt"]["min_soc"]) # Eqn. 7
    solver.Add(vSOC[i] <= input["batt"]["max_soc"]) # Eqn. 7
```

Рисунок 3.6 – Побудова обмежень

### 3.4.5 Визначення цільової функції

Рівняння 3.9 слугує цільовою функцією даної моделі. На рисунку 3.7 фрагмент коду.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

```
# Add objective
obj = 0
obj += sum([vGrid[i] * input["market"]["market_price_1"][time[i]] * dt for i
solver.Minimize(obj)
```

Рисунок 3.7 - Фрагмент коду побудови для визначення цільової функції

### 3.4.6 Розв'язання оптимізаційної задачі

Нарешті, для вирішення задачі оптимізації викликається розв'язувач, оголошений раніше. Параметр RunTime обчислює час, витрачений на пошук оптимального розв'язку. На рисунку 3.8 команда код розв'язання задачі.

```
status = solver.Solve()

time_e = timeit.default_timer()
runTime = round(time_e - time_s, 4)
```

Рисунок 3.8 – Команда коду розв'язання задачі.

### 3.4.7 Роздрукування та збереження результатів

Для виведення результатів використовується наведений на рисунку 3.9 код.

Якщо статус вказує на оптимальність або допустимість, це означає, що рішення було успішно знайдено. Після цього результат можна експортувати у файл Excel для подальшого аналізу.

```

if status == solver.OPTIMAL or status == solver.FEASIBLE:
    print("Solution is found.")
    print("Number of variables =", solver.NumVariables())
    print("Number of constraints =", solver.NumConstraints())
    print("Computation time = ", runTime)

    # Extract solution values
    excelWriter = pd.ExcelWriter('output/Result.xlsx', engine='xlsxwriter')

    objValue = round(solver.Objective().Value() / 100, 2)

    objValueDF = pd.DataFrame.from_dict({"obj_value": objValue}, orient="in

    result = list(zip([round(vGrid[i].solution_value(), 4) for i in range(t
        [round(vBattPower[i].solution_value(), 4) for i in ra
        [round(vCharge[i].solution_value(), 4) for i in range
        [round(vDischarge[i].solution_value(), 4) for i in ra
        [round(vSOC[i].solution_value(), 4) for i in range(tI
        [int(vChargeStatus[i].solution_value()) for i in rang
        ))
    resultDF = pd.DataFrame(result, index=time, columns=["Grid Power Flow (

    objValueDF.to_excel(excelWriter, sheet_name='Cost')
    resultDF.to_excel(excelWriter, sheet_name='Operation')
    excelWriter.close()
else:
    print("Solution cannot be found.")

```

Рисунок 3.9 – Фрагмент коду виведення результатів

### 3.5 Аналіз результатів

Оптимізаційна модель досягає своєї мети мінімізації витрат на електроенергію шляхом використання BESS як буфера: вона заряджає BESS до максимального рівня SOC, коли ціна на електроенергію низька, і розряджає його під час високих цін. На рисунку 3.10 показано, що BESS досягає 95% заряду о 14:30 в очікуванні пікової ціни о 16:30. Процес розряджання починається після 16:00, а до 17:30 ємність повністю виснажується, оскільки SOC падає до мінімального рівня. Цей результат ефективно демонструє здатність BESS здійснювати ціновий арбітраж.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

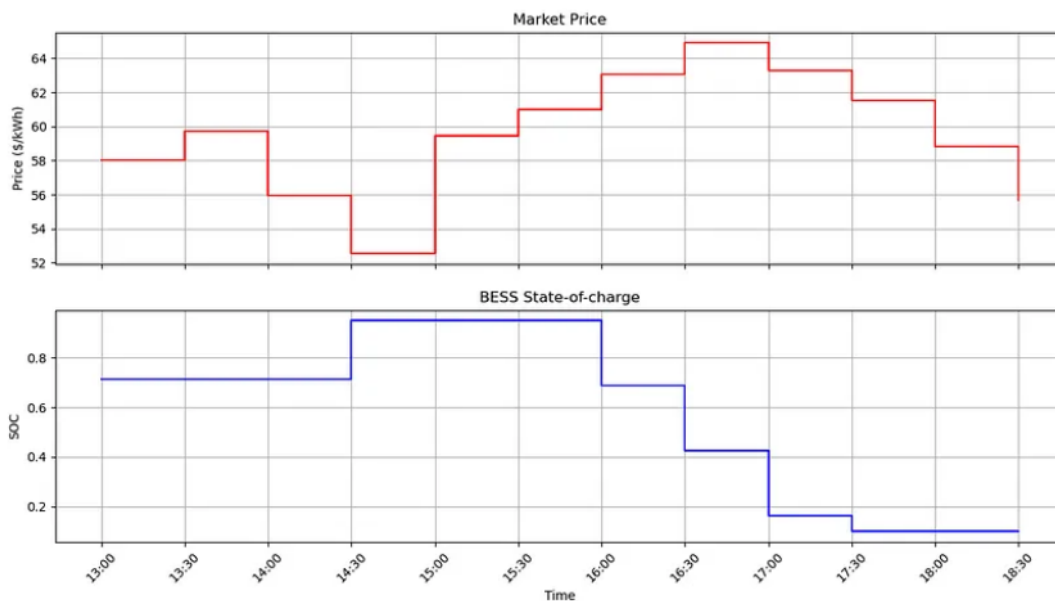


Рисунок 3.10 - Динаміка ринкової ціни на електроенергію та Стан заряду акумулятора (SOC) BESS

На рисунку 3.11 заштрихована область показує період, коли локальна генерація від ВДЕ (позначена зеленим кольором) перевищує попит на навантаження (помаранчевий колір). Після задоволення потреб навантаження залишкова енергія або зберігається в BESS, або експортується в мережу. Як зазначалося раніше, пріоритетом є передача залишку в BESS для подальшого використання в періоди високих цін.

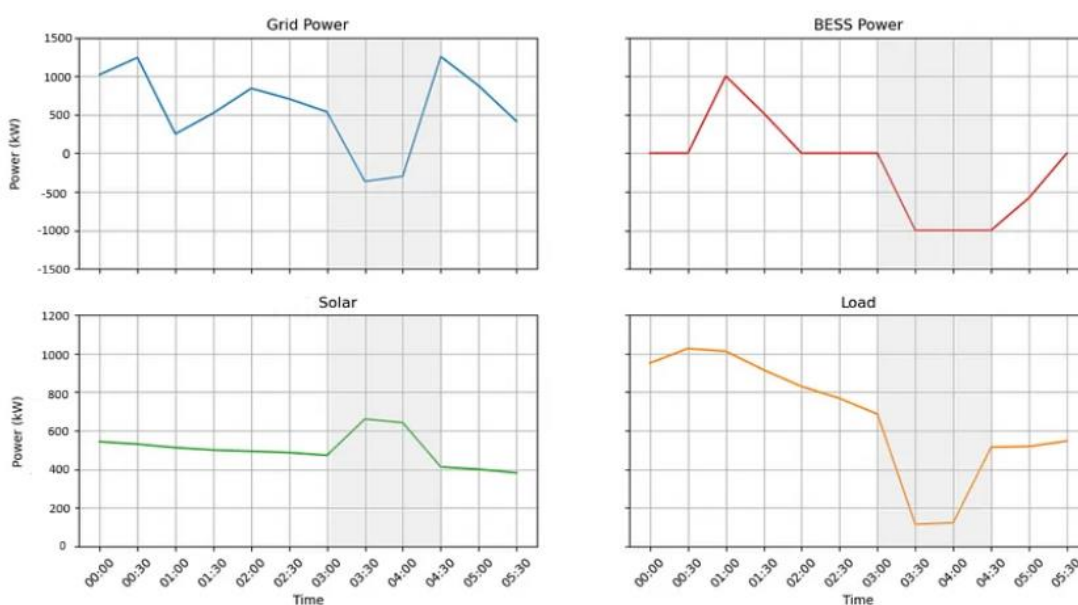


Рисунок 3.11 - Взаємодія генерації, навантаження, мережі та BESS

Представлена модель проста у вирішенні та ефективна для планування роботи BESS. Її можна вдосконалити, додавши модель старіння, яка враховує деградацію акумуляторів через цикли заряджання/розряджання та вплив зовнішніх факторів, як-от температура чи вологість. Для спрощення проблема старіння може бути лінеаризована.

Також можна дозволити BESS брати участь у кількох ринках, наприклад, додати регулювання частоти до енергетичного ринку, що збільшить прибутковість та операційну ефективність BESS.

### **3.6 Висновки**

Інтеграція систем зберігання енергії (BESS) є ключовим етапом у переході до екологічно чистих і стійких енергомереж. У цій статті показано, що BESS має значний потенціал у зменшенні витрат на електроенергію, ефективному використанні відновлюваних джерел енергії та забезпеченні стабільності мережі.

Запропонована модель є базовим підходом до математичного моделювання інтеграції BESS в енергосистему. Однак існують широкі можливості для її вдосконалення, щоб забезпечити практичну реалізацію в реальних умовах.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході виконання дипломної роботи досягнуто мети, що полягала у розробці енергетично обґрунтованої концепції системи забезпечення електричною енергією, яка забезпечує ефективне використання електроенергії за рахунок інтеграції сучасних технологій. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано сучасні підходи до енергозабезпечення, визначено принципи оптимізації роботи систем накопичення енергії та інтеграції відновлюваних джерел у розумні мережі.

Розроблена концепція демонструє можливість значного підвищення ефективності споживання електроенергії шляхом використання сонячних електростанцій, систем накопичення енергії та алгоритмів оптимального управління. Проведене моделювання показало, що запропоновані рішення дозволяють знизити витрати на електроенергію та забезпечити баланс між генерацією та споживанням, що особливо важливо для об'єктів з нерівномірним графіком навантаження.

Розробка враховує інтеграцію сучасних технологій, таких як розумні мережі (Smart Grid), що підвищують гнучкість управління енергетичними потоками, знижують втрати енергії та покращують прогнозування споживання. Це підтверджує доцільність впровадження таких систем для забезпечення надійного, економічно ефективного та сталого енергозабезпечення.

Отримані результати можуть бути використані для практичного впровадження у проектуванні енергетичних систем, зокрема для об'єктів з підвищеними вимогами до енергоефективності та автономності.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Фарадей М. Дослідження в галузі електрики. Лондон: Королівський інститут Великої Британії, 1831. 123 с.
2. Джоуль Дж. П. Розвиток електричного струму шляхом індукції магнетизму. *Philosophical Magazine*, 1832. 175 с.
3. Тесла Н. Нова система електродвигунів та трансформаторів змінного струму. *The Electrical Engineer*, 1888. 183 с.
4. Вестінгауз Г. Розвиток систем змінного струму. Пітсбург: Westinghouse Electric Corporation, 1890. 178 с.
5. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Statistics 2020*. URL: <https://www.irena.org> (дата звернення: 12.12.2023).
6. Геллінгс К. В. Розумна мережа: забезпечення енергоефективності та реагування на попит. Гобокен: Wiley, 2011. 250 с.
7. Боровик Ю. Т., Єлагін Ю. В. Проблеми та перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2019. № 65. С. 68–75. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336447396\\_PROBLEMI\\_TAJEPEK\\_TIVI\\_ROZVITKU\\_ALTERNATIVNOI\\_ENERGETIKI\\_V\\_UKRAINI](https://www.researchgate.net/publication/336447396_PROBLEMI_TAJEPEK_TIVI_ROZVITKU_ALTERNATIVNOI_ENERGETIKI_V_UKRAINI) (дата звернення: 12.12.2024).
8. Задихайло О. А. Основні напрями вдосконалення державного управління у сфері альтернативної енергетики в Україні. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2021. № 2. С. 260–273. URL: [https://www.researchgate.net/publication/357591987\\_OSNOVNI\\_NAPRAMI\\_VDOSKONALENNA\\_DERZAVNOGO\\_UPRAVLINNA\\_U\\_SFERI\\_ALTERNATIVNOI\\_ENERGETIKI\\_V\\_UKRAINI](https://www.researchgate.net/publication/357591987_OSNOVNI_NAPRAMI_VDOSKONALENNA_DERZAVNOGO_UPRAVLINNA_U_SFERI_ALTERNATIVNOI_ENERGETIKI_V_UKRAINI) (дата звернення: 12.12.2024).
9. Заруба Д. С., Швець М. Ю., Хохлов Ю. В. Машинне навчання для прогнозування споживання та генерації електроенергії. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2019. Т. 24, № 6. URL:

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- <https://doaj.org/article/0cc42124d9d24571a560a6c14cf8a43f> (дата звернення: 12.12.2024).
10. Технологічні тренди у сфері нових матеріалів для енергетики та військової сфери. *Грааль науки*. 2022. № 12–13. С. 155–160. URL: [https://www.researchgate.net/publication/367697791\\_TEHNOLOGICNI\\_TRENDI\\_U\\_SFERI\\_NOVIH\\_MATERIALIV\\_DLA\\_ENERGETIKI\\_TA\\_VIJSKO\\_VOI\\_SFERI](https://www.researchgate.net/publication/367697791_TEHNOLOGICNI_TRENDI_U_SFERI_NOVIH_MATERIALIV_DLA_ENERGETIKI_TA_VIJSKO_VOI_SFERI) (дата звернення: 12.12.2024).
11. Стріельковський В., Горіна Л., Корнеєва Є., Ковальова О. Енергозберігаючі технології та енергоефективність у постпандемічному світі *arXiv preprint arXiv:2312.11711*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.11711> (дата звернення: 12.12.2024).
12. Розподілена генерація та Smart Grid. *Науковий журнал*. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/2663-4139/article/view/6662/6613> (дата звернення: 12.12.2024).
13. A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A ... *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6269> (дата звернення: 12.12.2023).
14. A Comprehensive Review of Distribution Management Systems *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6269> (дата звернення: 12.12.2023).
15. Денисюк С. П., Махлін П. В., Шрам О. А., Слинько В. М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями). *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 41–48.
16. Пасло Н. О., Сікорська О. В. Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережах. *Вінницький національний технічний університет*. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/41506/150679.pdf?sequence=2> (дата звернення: 12.12.2024).
17. The energy hub: A powerful concept for future energy systems. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228350350\\_The\\_energy\\_hub-](https://www.researchgate.net/publication/228350350_The_energy_hub-)

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

- [A powerful concept for future energy systems](#) (дата звернення: 12.12.2023).
18. Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/371766749\\_Integrating\\_Smart\\_Energy\\_Management\\_System\\_with\\_Internet\\_of\\_Things\\_and\\_Cloud\\_Computing\\_for\\_Efficient\\_Demand\\_Side\\_Management\\_in\\_Smart\\_Grids](https://www.researchgate.net/publication/371766749_Integrating_Smart_Energy_Management_System_with_Internet_of_Things_and_Cloud_Computing_for_Efficient_Demand_Side_Management_in_Smart_Grids) (дата звернення: 12.12.2024).
19. Bansal, H. O., & Sharma, R. (2017). Flexible AC Transmission Systems: an Extended Overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. № 7(5). С. 2340-2348. DOI: 10.11591/ijece.v7i5.pp2340-2348. (дата звернення: 12.12.2024).
20. Gielen D., Boshell F., Saygin D., Bazilian M. D., Wagner N., Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*. 2019. № 24. С. 38–50. DOI: 10.1016/j.esr.2019.01.006. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 12.12.2023).
21. Ключко А. А. Цифрові технології в галузі архітектури і будівництва. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2022. Вип. 61. С. 80–95 URL: [https://www.researchgate.net/publication/361520502\\_DIGITAL\\_TECHNOLOGIES\\_IN\\_BRANCH\\_OF\\_ARCHITECTURE\\_AND\\_CONSTRUCTION](https://www.researchgate.net/publication/361520502_DIGITAL_TECHNOLOGIES_IN_BRANCH_OF_ARCHITECTURE_AND_CONSTRUCTION) (дата звернення: 12.12.2024).
22. Rehman H. U., Al-Ghamdi S. G., Ameen R. F. M. Positive Energy Building Definition with the Framework, Elements and Challenges of the Concept. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 19. P. 6260. DOI: 10.3390/en14196260. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6260> (дата звернення: 12.12.2024).
23. Renewable Sources in the Energy Supply Systems of Ukrainian Cities *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/348744632\\_RENEWABLE\\_SOURCES\\_IN\\_THE\\_ENERGY\\_SUPPLY\\_SYSTEMS\\_OF\\_UKRAINIAN\\_CITIES](https://www.researchgate.net/publication/348744632_RENEWABLE_SOURCES_IN_THE_ENERGY_SUPPLY_SYSTEMS_OF_UKRAINIAN_CITIES) – (дата звернення: 28.12.2024).

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

24. Analysis of Local Power Supply System Power Balance Based on Renewable Energy Sources and Storage Batteries. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/339992323\\_Analysis\\_of\\_local\\_power\\_supply\\_system\\_power\\_balance\\_based\\_on\\_renewable\\_energy\\_sources\\_and\\_storage\\_batteries](https://www.researchgate.net/publication/339992323_Analysis_of_local_power_supply_system_power_balance_based_on_renewable_energy_sources_and_storage_batteries) (дата звернення: 28.12.2024).

25. Features of Operating Modes Analysis of the Power System in Areas with Alternative Electric Power Sources. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/358153811\\_FEATURES\\_OF\\_OPERATING\\_MODES\\_ANALYSIS\\_OF\\_THE\\_POWER\\_SYSTEM\\_IN\\_AREAS\\_WITH\\_ALTERNATIVE\\_ELECTRIC\\_POWER\\_SOURCES](https://www.researchgate.net/publication/358153811_FEATURES_OF_OPERATING_MODES_ANALYSIS_OF_THE_POWER_SYSTEM_IN_AREAS_WITH_ALTERNATIVE_ELECTRIC_POWER_SOURCES) (дата звернення: 28.12.2024).

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		