МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему: «Аналіз доцільності використання механічних накопичувачів енергії в електричних мережах»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1414

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

Освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(назва освітньої програми)

Чабан Андрій Олександрович

(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н., Артемчук В.В.

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

Рецензент Коломієць Д.М.

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

Запоріжжя

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва)

Спеціалізація _____

(код та назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., проф. В.Л. Коваленко

«_____» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Чабану Андрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз доцільності використання механічних накопичувачів енергії в електричних мережах»
керівник роботи Артемчук В.В., д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «_27_» лютого 2025 року № 313 - с

2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Номенклатура механічних накопичувачів енергії, що застосовуються в електричних мережах різного класу напруги, із зазначенням їхніх технічних та енергетичних характеристик. Схеми інтеграції механічних накопичувачів у структуру електричних мереж та систем керування. Нормативні вимоги, галузеві стандарти та технологічні регламенти щодо використання механічних систем акумулювання енергії (маховикових накопичувачів, гравітаційних установок, пружинних систем тощо). Вихідні параметри мережі для аналізу: профілі навантаження, добові та сезонні коливання споживання, якісні показники електроенергії (напруга, частота, швидкість зміни потужності). Технічні характеристики обладнання: приводів,

систем керування, сенсорів моніторингу механічних параметрів, вимірювальних засобів та реєстраторів даних, а також програмно-обчислювальної платформи (ПК/ПЛК/вбудований контролер) і засоби зв'язку з АСУ ТП

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналітичний огляд сучасних основних типів механічних накопичувачів енергії 2) Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ 3) Математична модель маховика як механічного накопичувача енергії

Перелік графічного матеріалу 1) Тема, мета, завдання дослідження 2) Наукова новизна, практичне значення дослідження 3) Загальна характеристика основних типів механічних накопичувачів енергії 4) Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ 5) Математична модель маховика як механічного накопичувача енергії 6) Результати моделювання 7) Висновки.

4. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Артемчук В.В., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Артемчук В.В., д.т.н., проф.		

5. Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд сучасних основних типів механічних накопичувачів енергії	30.09.2025	
2	Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ	15.10.2025	
3	Математична модель маховика як механічного накопичувача енергії	30.11.2025	

Студент _____ Чабан А. О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.В. Артемчук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В, Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Чабан Андрій Олександрович. Аналіз доцільності використання механічних накопичувачів енергії в електричних мережах. Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», науковий керівник – Артемук В.В., професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем, доктор технічних наук. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025 рік.

У роботі в розглянуто, як перехід до енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії висуває на перший план проблему збереження й балансування електроенергії. Показано, що вітер і сонце створюють нову хвилю нестабільності в мережах: у певні години енергії забагато, в інші – відчувається гострий дефіцит. На цьому тлі механічні накопичувачі енергії постають не як другорядна допоміжна ланка, а як ключовий елемент інфраструктури, що дозволяє перетворювати надлишок електрики в гравітаційну, кінетичну або пружну енергію й повертати її до мережі у потрібний момент.

У першій частині роботи систематизовано основні типи механічних накопичувачів: гідроакумулюючі електростанції, гравітаційні установки на підйомі вантажів, маховикові (кінетичні) системи та накопичувачі на стисненому повітрі (CAES). Детально описано фізичні принципи їх дії, характерні діапазони потужності й енергоємності, значення коефіцієнта корисної дії, а також ресурси за кількістю циклів. Окрему увагу приділено світовій статистиці: підкреслено, що сьогодні саме ГАЕС забезпечують до 90–95 % глобальної потужності зберігання, тоді як гравітаційні стартапи, CAES і маховики знаходяться на стадії активного

розвитку й поступово зайняли власні ніші – від багатогодинного балансування до миттєвого регулювання частоти.

Друга частина роботи присвячена детальному аналізу європейського досвіду та українського контексту. Показано, як країни ЄС поєднують масштабні гідроакумулюючі комплекси в Альпах та Скандинавії з новими проектами гравітаційних сховищ у відпрацьованих шахтах, а також із швидким нарощуванням батарейних систем. На цьому тлі проаналізовано стан і роль українських ГАЕС – Київської, Ташлицької, Дністровської – у щодобовому вирівнюванні графіків навантаження та інтеграції ВДЕ. Окремо описано екологічні та соціальні дискусії довкола нових гідроакумулюючих проектів, насамперед Канівської ГАЕС, що дозволяє побачити реальні компроміси між енергетичною доцільністю та збереженням річкових екосистем.

У третій, розрахунково-моделювальній частині, розроблено математичну модель маховикового накопичувача, інтегрованого до вузла мікромережі з відновлюваними джерелами енергії. Маховик описано як тверде тіло з моментом інерції, що обертається з обмеженим діапазоном кутових швидкостей; введено класичні залежності для кінетичної енергії, рівняння руху з урахуванням втрат, а також поняття стану заряду SOC як безрозмірної характеристики «заповнення» накопичувача. На основі балансу потужностей у вузлі «ВДЕ – навантаження – маховик» побудовано модель керування потужністю FESS залежно від дисбалансу $\Delta P(t)$ і поточного SOC, що дозволяє реалізувати різні стратегії заряд–розряд.

У середовищі MATLAB реалізовано програму, яка імітує добові графіки роботи мікромережі з ВДЕ та маховиковим накопичувачем. На основі синтезованих профілів сонячної/вітрової генерації та змінного навантаження змодельовано динаміку кутової швидкості, запасеної енергії та SOC маховика. Для поглибленого аналізу побудовано систему тривимірних графіків, що відображають залежності типу SOC(t,ΔP), PFESS(t, PRES), PFESS(PL, SOC) тощо. Ці візуалізації дозволяють у наочній формі оцінити режими, за яких маховик

ефективно поглинає надлишок від ВДЕ або, навпаки, підтримує навантаження при дефіциті генерації, а також показують обмеження, пов’язані з діапазоном швидкостей та межами SOC.

Порівнюючи технічні, економічні та екологічні характеристики різних механічних технологій, у роботі сформульовано висновок про доцільність їх використання як невід’ємної частини гнучкої енергосистеми. ГАЕС та CAES доцільно застосовувати для багатогодинного зберігання великих обсягів енергії, гравітаційні системи – як довговічні безреагентні сховища у специфічних географічних умовах, тоді як маховики найбільш ефективні у ролі швидкодіючих буферів для регулювання частоти й підтримання якості електропостачання. Для України запропоновано рекомендації щодо подальшого розвитку гідроакумуляції, пілотних проектів механічних накопичувачів нового типу та створення ринкових умов, які б стимулювали їх інтеграцію у мережу.

Ключові слова: МЕХАНІЧНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, ГІДРОАКУМУЛЮЮЧА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ГРАВІТАЦІЙНИЙ НАКОПИЧУВАЧ, МАХОВИКОВА ЕНЕРГОСИСТЕМА, CAES, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, МІКРОМЕРЕЖА, MATLAB-МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

Chaban Andrii Oleksandrovych. Analysis of the Feasibility of Using Mechanical Energy Storage in Electrical Networks. Master's qualification thesis for obtaining a higher education degree in specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics." Scientific supervisor – Artemchuk V.V., Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Doctor of Technical Sciences. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

The thesis examines how the transition toward power systems with a high share of renewable energy sources brings to the forefront the challenge of energy storage and grid balancing. It is shown that wind and solar generation introduce a new wave of instability: at certain hours the system experiences a surplus of electricity, while at others it faces a sharp deficit. In this context, mechanical energy storage systems emerge not as auxiliary components, but as essential infrastructure capable of converting excess electrical energy into gravitational, kinetic, or compressed-air energy and returning it to the grid when needed.

The first part of the work systematizes the main types of mechanical storage technologies: pumped-storage hydropower plants, gravity-based lifting systems, flywheel (kinetic) storage, and compressed-air energy storage (CAES). The physical principles of their operation, their typical power and energy ranges, efficiency values, and cycle lifetimes are described in detail. Special attention is paid to global statistics showing that pumped-storage hydropower currently provides 90–95% of the world's installed large-scale storage capacity, while gravity systems, CAES, and flywheels

continue to evolve and have already occupied specific niches-from multi-hour storage to fast frequency regulation.

The second part of the thesis presents a detailed analysis of European experience and the Ukrainian context. It demonstrates how EU countries combine large-scale pumped-storage facilities in the Alps and Scandinavia with emerging gravity storage projects in decommissioned mines and rapidly expanding battery installations. Against this backdrop, the role of Ukrainian pumped-storage plants-Kyiv, Tashlyk, and Dniester-in daily load leveling and renewable integration is examined. Environmental and social debates surrounding new hydropower storage projects, particularly the Kaniv PSP, are outlined, illustrating real compromises between energy feasibility and the preservation of river ecosystems.

The third, modeling-oriented section presents a mathematical model of a flywheel energy storage system integrated into a microgrid node supplied by renewable sources. The flywheel is described as a rotating rigid body with a defined moment of inertia and a limited speed range. Classical relationships for kinetic energy, motion equations with losses, and a dimensionless state of charge (SOC) indicator are introduced. A control model for the flywheel power PFESS is built based on the instantaneous power imbalance $\Delta P(t)$ and the current SOC, enabling different charge–discharge strategies.

A MATLAB-based simulation program is developed to model daily operating profiles of a microgrid with renewable sources and a flywheel storage system. Using synthesized solar/wind generation curves and variable load profiles, the dynamic behavior of angular velocity, stored energy, and SOC is obtained. A set of 3D visualizations-such as SOC(t, ΔP), PFESS(t, PRES), PFESS(PL, SOC)-is generated to illustrate system behavior under different conditions. These visual tools clearly show when the flywheel effectively absorbs renewable surplus or supports the load during generation deficits, highlighting operational constraints such as speed limits and SOC boundaries.

Based on a comparative assessment of technical, economic, and environmental characteristics of mechanical storage systems, the thesis concludes that such technologies represent a vital component of a flexible energy system. Pumped-storage and CAES systems are most suitable for multi-hour storage of large energy volumes, gravity storage offers long service life without chemical degradation, while flywheels serve as fast-response buffers for frequency control and power quality support. For Ukraine, recommendations are provided regarding the development of pumped-storage capacity, pilot deployment of modern mechanical storage systems, and the creation of market conditions that encourage their integration into the national grid.

Keywords: MECHANICAL ENERGY STORAGE, PUMPED-STORAGE HYDROPOWER, GRAVITY STORAGE, FLYWHEEL ENERGY SYSTEM, CAES, RENEWABLE ENERGY SOURCES, MICROGRID, MATLAB SIMULATION.

ЗМІСТ

Вступ……12

1. Основні типи механічних накопичувачів енергії……16

1.1 Гравітаційні накопичувачі (підйом вантажів і гідроакумулюючі станції)……16

1.2Маховики (кінетичні накопичувачі)……..22

1.3Накопичення енергії стисненим повітрям (CAES)……..24

1.4Глобальні тенденції і приклади використання……26

1.5Європейський досвід та перспективи……...…27

1.6 Український контекст…… …….29

1.7 Висновки за розділом 1…….31

2. Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ ……..35

2.1 Економічна ефективність механічних накопичувачів……35

2.1.1. Помпові гідроакумулюючі електростанції…….35

2.1.2. Маховики……...36

2.1.3. Системи акумулювання енергії на стисненому повітрі (CAES)……..37

2.1.4. Гравітаційні стартапи (типу Energy Vault)…….....37

2.2 Екологічні аспекти використання механічних накопичувачів……..39

2.3 Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ……42

2.4 Висновки за розділом 2…….45

3 Математична модель маховика як механічного накопичувача енергії…..47

3.1. Маховик як накопичувач кінетичної енергії…….47

3.2. Рівняння руху маховика……..50

3.3 Зв’язок механічних та електричних величин……51

3.4. Спрощена модель для інтеграції в енергосистему з ВДЕ…….52

3.5. Динаміка SOC маховика…… 54

3.6. Інтерпретація з точки зору інерції енергосистеми……55

3.7. Підсумкова структурована модель……..57

3.8 Реалізація моделі роботи маховика (fess) в мікромережі з ВДЕ у середовищі MATLAB……...58

3.9 Висновки по розділу 3……...74

Висновки…… ……76

Перелік посилань……..…..79

Додаток А МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАХОВИКА (FESS) В МІКРОМЕРЕЖІ З ВДЕ……84

ВСТУП

У другій половині XXI століття людство увійшло в епоху великих енергетичних змін. Те, що здавалося лише футуристичними прогнозами, поступово стало реальністю: відновлювані джерела енергії перестали бути екзотичними технологіями й перетворилися на важливу складову енергетичних систем більшості країн світу. Вітер, який протягом століть використовували для помелу зерна або підсилення мореплавства, сьогодні обертає гігантські турбіни, постачаючи електроенергію мільйонам споживачів. Сонячне випромінювання, що завжди було символом тепла та світла, набуло нового виміру - воно живить фотоелектричні панелі, роблячи енергетику чистішою та доступнішою.

Однак за цим технологічним поступом приховується важливий виклик. Відновлювані джерела енергії, незважаючи на свої переваги, є природно нестабільними. Їхня робота залежить від факторів, які неможливо повністю контролювати: зміни погоди, сезонності, географічних умов. У певні години доби система енергопостачання може отримувати надлишок електроенергії, а в інші - відчувати різкий дефіцит. Такі коливання створюють нову, раніше не властиву енергосистемам проблему - проблему балансування та регулювання.

Саме тому питання зберігання енергії стає однією з центральних тем сучасної енергетики. Багато країн уже зрозуміли: без ефективних систем накопичення енергії неможливо забезпечити стабільність мереж, високу якість електропостачання та безпеку енергетичної інфраструктури. У цьому контексті механічні накопичувачі енергії знову виходять на передній план, поєднуючи класичні принципи механіки з інноваціями XXI століття.

Механічні накопичувачі - це своєрідні «скарбниці» енергії, які можна заповнювати у години надлишкового виробництва та використовувати при

необхідності. Їхня робота ґрунтується на простих, але надійних фізичних принципах: піднятті вантажів, русі води, обертанні масивних тіл чи стисненні газу. Ці процеси дозволяють перетворювати електричну енергію в інші форми - потенційну, кінетичну або пружну - а потім знову відновлювати її у вигляді електрики.

Наймасштабнішим і найпоширенішим видом механічних накопичувачів залишаються гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС). Сьогодні саме вони забезпечують до 94–96 % усього обсягу зберігання електроенергії у світі. ГАЕС виконують одразу кілька стратегічно важливих функцій: згладжують пікові навантаження, забезпечують резервні потужності, стабілізують частоту в енергосистемі й підвищують гнучкість мереж. Їхня здатність накопичувати величезні обсяги енергії робить їх незамінними у системах із високою часткою ВДЕ.

Однак поряд із ГАЕС активно розвиваються й інші типи механічних накопичувачів, які здатні доповнити та частково замінити традиційні системи. Сьогодні у фокусі інженерних розробок перебувають гравітаційні системи на основі підйому вантажів, махові колеса високої швидкості (флайвіл-системи) та системи зі стисненим повітрям (CAES). Ці технології здатні працювати у різних масштабах - від невеликих модулів для локальних мереж до потужних промислових систем [1].

Гравітаційні накопичувачі використовують один з фундаментальних законів природи - закон тяжіння. Суть їхньої роботи полягає в тому, що у години надлишкового виробництва вантажі піднімаються на певну висоту, а у години дефіциту - опускаються, приводячи в дію генератор. Попри очевидну простоту, такі системи демонструють вражаючу ефективність та довговічність, а також можуть встановлюватися у місцях, де будівництво ГАЕС є неможливим.

Інший перспективний напрям - махові колеса, які накопичують енергію у швидкому обертанні ротора у вакуумній камері. Флайвіл-системи особливо

корисні тоді, коли потрібна миттєва реакція, наприклад, для компенсації короткочасних провалів або надлишків генерації. Вони витримують сотні тисяч циклів заряд–розряд без значної деградації, що робить їх вигідним рішенням для мережевих операторів та промислових підприємств.

Не менш цікавою є технологія накопичення енергії за допомогою стисненого повітря. CAES-системи використовують підземні порожнини або спеціальні резервуари, де повітря, стиснуте під високим тиском, зберігається до моменту, коли його потрібно використати для генерації електроенергії. Ця технологія відрізняється великою ємністю, тривалістю зберігання та можливістю масштабування.

Загалом розвиток механічних накопичувачів є невід'ємною частиною глобального руху до вуглецево-нейтральної енергетики. Вони допомагають зменшувати залежність від викопних джерел, підвищують енергоефективність, підтримують стабільність мереж та сприяють інтеграції ВДЕ. Сьогодні країни на всіх континентах змагаються у створенні масштабних систем накопичення, які б забезпечили їхнім енергетичним комплексам автономність, стійкість і гнучкість.

Водночас механічні системи мають і важливе соціально-економічне значення. Вони створюють нові робочі місця, стимулюють розвиток інфраструктури, підвищують інвестиційну привабливість регіонів та сприяють модернізації промисловості. Багато експертів вважають, що саме накопичувачі енергії стануть ключовим елементом енергетичної безпеки країн у найближчі десятиліття.

Тому ця магістерська робота присвячена комплексному аналізу механічних накопичувачів енергії - від їхніх фізичних принципів і технічних параметрів до їх ролі у сучасних енергосистемах. У дослідженні розглянуто як традиційні ГАЕС, так і новітні технології, включно з гравітаційними, кінетичними та пружними системами зберігання енергії. Особлива увага приділена їх ефективності,

екологічній безпеці, експлуатаційним особливостям та перспективам розвитку на тлі глобальної енергетичної трансформації.

Мета дослідження. Метою цієї магістерської роботи є всебічне вивчення механічних накопичувачів енергії, аналіз їхнього значення у сучасних енергетичних системах та оцінка перспектив їх подальшого розвитку в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети передбачається виконати такі завдання:

1. Розкрити фізичні принципи роботи механічних накопичувачів.
2. Описати сучасні технології механічного накопичення енергії та їх класифікацію.
3. Дослідити роль ГАЕС у глобальній енергетиці та оцінити їх інфраструктурне значення.
4. Проаналізувати новітні механічні системи (гравітаційні, флайвіл, CAES).
5. Визначити технічні та економічні переваги й обмеження різних технологій.
6. Оцінити їхню перспективність у контексті побудови низьковуглецевої економіки.
7. Сформулювати загальні рекомендації щодо інтеграції механічних накопичувачів у сучасні енергетичні системи.

Об’єкт дослідження:

Процеси накопичення та віддачі енергії в енергетичних системах.

Предмет дослідження:

Механічні технології зберігання енергії, їх технічні характеристики, принципи роботи та роль у балансуванні сучасних електромереж.

1.ОСНОВНІ ТИПИ МЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

1.1 Гравітаційні накопичувачі (підйом вантажів і гідроакумулюючі станції)

У міру зростання частки відновлюваних джерел енергії світова енергетика стикається з фундаментальною проблемою - нерівномірністю генерації. Сонячні та вітрові установки не можуть гарантувати постійний рівень вироблення, що ускладнює підтримання стабільності енергосистеми. У цьому контексті гравітаційні накопичувачі енергії набувають нового значення, повертаючи нас до однієї з базових фізичних сил - сили тяжіння. На основі простого принципу перетворення електроенергії у потенціальну гравітаційну енергію вони демонструють дивовижну ефективність і довговічність, що робить їх перспективним напрямком розвитку глобальної енергетичної інфраструктури.

Гравітаційні системи збереження енергії зазвичай реалізуються у двох концептуально різних формах. Перша - це гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС), які вже десятиліттями залишаються найбільш потужним і технологічно зрілим видом акумулювання енергії. Їхня робота базується на переміщенні великих обсягів води між верхнім і нижнім резервуарами, де надлишкова електроенергія використовується для перекачування води вгору, а у години пікового споживання вона повертається вниз, приводячи в дію турбіни. ГАЕС відіграють ключову роль у балансуванні мережі, забезпечуючи величезні резерви потужності з високим коефіцієнтом корисної дії та тривалим терміном експлуатації.

Друга форма - сучасні твердотільні гравітаційні накопичувачі, що базуються на підйомі і опусканні масивних вантажів. Ці установки можуть використовувати бетонні блоки, металеві конструкції чи інші вантажі, які підіймаються за

допомогою електродвигунів і зберігають у собі потенціальну енергію на висоті. Під час опускання вантажі обертають генератори, повертаючи електроенергію в мережу. Хоча такі системи лише проходять стадію масштабного впровадження, їхня архітектура дозволяє будувати накопичувачі у міських зонах, на промислових територіях чи навіть у шахтах, забезпечуючи високу гнучкість розгортання.

Спільною рисою цих технологій є опора на гравітацію як абсолютно передбачувану і стабільну природну силу. На відміну від хімічних батарей, гравітаційні накопичувачі не потребують рідкісних матеріалів, не деградують із часом і мають потенціал працювати десятиліттями з мінімальними втратами ефективності. Це робить їх не лише екологічно безпечними, але й економічно привабливими у довготривалій перспективі.

Таким чином, гравітаційні накопичувачі становлять собою сучасний прояв класичного фізичного принципу, адаптований до потреб XXI століття. Вони поєднують фундаментальні наукові засади та інженерні інновації, утворюючи важливий елемент майбутньої енергосистеми, здатної забезпечувати стабільність у світі, де частка відновлюваної генерації невпинно зростає.



Рис. 1.1 Концептуальне зображення гравітаційного накопичувача енергії від компанії Energy Vault (дві башти-накопичувачі поруч із вітроелектростанцією) [1]

В основі такого рішення – використання надлишкової електроенергії для підняття важких блоків, акумулюючи потенційну енергію; при зворотному русі (спуску блоків) енергія повертається в мережу у вигляді електрики. Гравітаційні системи зберігання діють за принципом, подібним до гідроакумулюючих ГЕС, але замість води піднімається твердий вантаж. Гідроакумулююча електростанція (ГАЕС) – це найбільш розвинутий вид гравітаційного накопичувача: у періоди профіциту електроенергії вода перекачується в верхнє водосховище (накопичення енергії), а під час пікових навантажень вода спускається через турбіни, виробляючи електрику [1]. ГАЕС мають високий коефіцієнт корисної дії (як правило 80–90%), значні обсяги накопичення (від кількох сотень до тисяч МВт·год) і тривалий термін служби, вимірюваний десятиліттями. Саме гідроакумулюючі станції сьогодні домінують у глобальній структурі зберігання енергії: встановлена потужність ПГАЕС у світі сягає ~200 ГВт і становить понад 90% від загальної ємності накопичення електроенергії на рівні електромереж [2].

Новітні гравітаційні накопичувачі на основі підйому вантажів є спробою адаптувати гідроакумулюючий принцип до місць, де будівництво водосховищ неможливе. Компанії на кшталт Energy Vault впроваджують системи, що використовують крани або башти для підіймання важких блоків (масивних брил з ґрунту, відходів виробництва тощо) за наявності надлишкової електроенергії, і опускання їх для генерації енергії під час дефіциту. Пілотні проекти показали конкурентні показники: так, система EVx Energy Vault у Швейцарії (демонстраційна установка 2020 року) досягла ККД ~75%, а вдосконалення технології очікувано підвищить ефективність до ≈80%, що порівнянно з ГАЕС та літій-іонними батареями [2].

У 2023 році в Китаї запущено першу комерційну гравітаційну станцію Energy Vault потужністю 25 МВт на 100 МВт·год поруч із вітропарком під Шанхаєм [3]. Ця «башта батарея» здатна забезпечувати повну потужність

протягом 4 годин і керується автоматизованою системою для оптимального заряд–розряд циклу. Інженери стверджують, що технологія масштабується до систем 12-годинної тривалості (гігават-годинного класу) при збереженні високого ККД. Таким чином, гравітаційні накопичувачі є перспективним напрямом довготривалого зберігання енергії – вони поєднують в собі переваги відсутності деградації з часом (на відміну від батарей) та відносно простих і екологічно безпечних матеріалів (вода, ґрунт, бетон), хоча поки поступаються ГАЕС за масштабом реалізованих проектів [3].

Гравітаційні накопичувачі здатні акумулювати дуже великі об’єми енергії (особливо ГАЕС, що можуть мати сотні мегават потужності і працювати по 6–10 годин на добу). Вони швидко реагують на зміни навантаження – ГАЕС можуть перемикатися з режиму насосу в генерацію за лічені хвилини або навіть секунди, забезпечуючи частотне та резервне регулювання в мережі. Водночас, для реалізації памп-стораж (ГАЕС) потрібні специфічні географічні умови – наявність двох водойм з перепадом висот, великих площ під водосховища – що обмежує їх будівництво. ГАЕС іноді мають екологічні недоліки: створення дамб і нових водойм впливає на екосистеми річок, міграцію риби, може призвести до затоплення земель та соціального впливу на місцеві громади [4].

Упродовж останніх років Європа переживає справжнє відродження інтересу до гідроакумулюючих електростанцій. Зростання частки відновлюваної енергетики, її нестабільність і потреба у великих сховищах енергії роблять ГАЕС привабливими для урядів і енергетичних компаній. Проте за кожним новим проєктом поступово виростає тінь екологічних застережень. Історія повторюється знову й знову: там, де інженери бачать необхідну інфраструктуру для низьковуглецевого майбутнього, екологи бачать загрозу для водних екосистем, міграційних шляхів риби й природної рівноваги річкових долин.

У Європі це протистояння стає все помітнішим. Уже кілька років поспіль у наукових публікаціях з’являються попередження про те, що нові проєкти

гідроакумуляції можуть супроводжуватися значними впливами на довкілля. Зокрема, дослідники наголошують, що створення верхніх і нижніх резервуарів часто змінює морфологію річок, обмежує біорізноманіття та порушує природні гідрологічні цикли водних систем [5].

Особливо багато дискусій викликають проєкти у гірських районах, де природні водойми мають високу екологічну цінність. Як показує детальний аналіз Європейського об'єднаного дослідницького центру (JRC), навіть «маломасштабні» ГАЕС можуть створювати бар'єри для міграції риби й істотно змінювати температурний режим води у природних озерах та річках [6].

Гучний приклад – Шотландія, де заплановані проєкти гідроакумуляції біля Лох-Нессу викликали настороженість місцевих екологічних організацій. Рибальські спільноти попереджають, що різкі коливання рівня води, які притаманні ПСГ (pumped-storage hydro), можуть негативно вплинути на нерест лососевих та інших цінних видів риби [7].

Але є історія, яка особливо болісно відгукується в українському контексті. Це - Канівська ГАЕС. Проєкт, який з технічного погляду може відіграти важливу роль у стабілізації української енергосистеми, водночас породжує тривогу серед екологів та місцевих громад. Опозиційні голоси звучать давно, і з кожним новим обговоренням вони тільки підсилюються. У публікаціях українських екологічних організацій зазначається, що створення Канівської ГАЕС може негативно вплинути на стан річкової екосистеми Дніпра, змінити його природну течію та поставити під загрозу водні біотопи, які є домівкою для десятків видів риби та птахів [8].

Дніпро - це жива система, складна й багатошарова, і кожне втручання в її динаміку може мати далекосяжні наслідки. Дослідники, які аналізували аналогічні проєкти у світі, доводять: зміна рівнів води, притаманна ГАЕС, може руйнувати прибережні екосистеми, спричиняти ерозію берегів і порушувати стабільність

донних відкладів [9] Саме ці ризики українські екологи називають серед ключових аргументів проти будівництва.

До того ж, як зазначає низка аналітичних публікацій, екологічна експертиза проєкту має суперечливий статус: термін дії попередніх висновків сплив, а потреба в оновленій оцінці впливу на довкілля стала предметом публічних дискусій . Частина експертів наполягає, що без нової і повної екологічної оцінки будівництво є ризикованим і може порушити норми екологічної безпеки [10].

З іншого боку, прихильники проєкту нагадують про нагальну потребу в гнучких потужностях української енергосистеми. Інтеграція великої кількості ВДЕ в майбутньому потребуватиме сховищ енергії, і ГАЕС, як стверджується у звітах Міжнародної асоціації гідроенергетики, залишається найбільш технологічно зрілим і довговічним рішенням для таких завдань [11] 2024).

Та попри ці аргументи, питання екологічної безпеки залишається в центрі дискусії. Дніпро - не просто річка. Це історична артерія, культурний символ і складна екологічна система, яка вже зазнала значних трансформацій унаслідок каскаду водосховищ. Саме тому будь-який новий великий проєкт на Дніпрі неминуче викликає занепокоєння - особливо коли в європейській практиці видимі приклади аналогічних суперечливих ініціатив.

Європейські ГАЕС - від Альп до Британських островів - показують одну закономірність: будівництво таких об’єктів можливе лише тоді, коли екологічна складова є не додатком, а центральним елементом планування. І саме цей досвід варто враховувати Україні, особливо коли йдеться про настільки важливі для довкілля території, як басейн Дніпра [9-11].

Альтернативні гравітаційні системи (як-от Energy Vault) не потребують великої кількості води чи великих територій, але для них важливе забезпечення механічної надійності конструкцій та точність керування. Загалом, гравітаційні накопичувачі вирізняються високою довговічністю (відсутнє значне старіння – вантажі та водосховища можуть слугувати десятиліттями), відносно низькими

експлуатаційними витратами та безпечністю (немає ризику займання чи токсичних викидів). Це робить їх привабливими для великомасштабного застосування у складі енергосистем [12-16].

1.2 Маховики (кінетичні накопичувачі)

Маховиковий накопичувач зберігає електроенергію у вигляді кінетичної енергії обертання масивного ротора, який розкручується електродвигуном (при заряджанні) і сповільнюється генератором (при розрядці), повертаючи електроенергію в мережу. Головні переваги маховиків – миттєва реакція та висока потужність на коротких інтервалах часу. Вони здатні за лічені секунди збільшувати або зменшувати віддачу енергії, тому широко застосовуються для регулювання частоти та згладжування швидких коливань в мережі. Наприклад, у складі системи PJM Interconnection (США) ще з 2011 року працює маховиковий комплекс Beacon Power потужністю 20 МВт, що забезпечує послуги регулювання частоти, використовуючи близько 200 маховиків сумарною енергоємністю ~5 МВт·год [17].



Рис. 1.2: Приклад установок з маховими накопичувачами енергії на станції Beacon Power (20 МВт) у штаті Нью-Йорк, США [18].

У синіх резервуарах під кожним модулем обертаються ротори високошвидкісних маховиків, розміщені у вакуумі. Контейнери поруч містять допоміжне обладнання та електроніку керування системою.

За останні роки технологія маховиків удосконалюється – застосовуються магнітні підшипники та вакуумні камери для мінімізації втрат на тертя, що підвищує ККД (іноді понад 85–90% для короткочасних циклів) і подовжує час утримання енергії. Однак типова тривалість зберігання маховика обмежується хвилинами: більшість комерційних маховикових систем розраховані на 15–30 хвилин повної потужності, що достатньо для балансування миттєвих коливань, але не для довготривалого зсуву енергії між піками виробництва та споживання. Маховики мають високу циклічну довговічність – вони можуть виконувати десятки тисяч циклів заряд–розряд без деградації, на відміну від хімічних акумуляторів. Це робить їх економічно вигідними для застосувань, де потрібні

часті цикли (наприклад, стабілізація частоти, компенсація миттєвих провалів напруги, безперебійне живлення).

Маховикові накопичувачі зазвичай реалізуються у відносно невеликих масштабах (кілька мегават потужності). Найбільший на сьогодні проект – система на 30 МВт у провінції Шаньсі, Китай, запущена у 2024 році. Вона складається зі 120 високошвидкісних маховиків (магнітно-левітуючих), згрупованих у модулі по 12 машин, і під'єднана до мережі 110 кВ для надання послуг регулювання частоти. Раніше найбільшими вважалися установки по 20 МВт у США (Stephentown, NY та Hazle Township, PA) [17]. Окрім автономного використання, маховики все частіше інтегрують гібридно з батарейними системами – така комбінація дозволяє миттєво реагувати на зміни навантаження за рахунок маховиків, зменшуючи навантаження на батареї і подовжуючи їхній ресурс. Наприклад, у Нідерландах у 2020 році введено в експлуатацію гібридну систему S4 Energy (маховик + літій-іонний накопичувач) для покращення якості електропостачання. В Ірландії та Великій Британії маховики використовуються для підтримки стійкості мереж з високою часткою вітрової енергії, надаючи послуги миттєвого резерву.

Через відносно малу енергоємність маховиків, їхня роль зводиться переважно до короткострокового буферу. Для довготривалого зберігання (години) ці системи нерентабельні – зростання розміру ротора чи швидкості обертання обмежене матеріалами та інженерними викликами (центробіжні напруження, безпека). Також, хоча сам маховик не містить небезпечних хімікатів, швидкообертові частини потребують надійних систем безпеки (герметичний корпус у разі руйнування ротора). В цілому, маховики займають свою нішу – миттєва високоциклічна буферизація енергії, доповнюючи інші види накопичувачів.

1.3 Накопичення енергії стисненим повітрям (CAES)

Compressed Air Energy Storage (CAES) – ще один різновид механічного накопичувача, що працює за рахунок стиснення та розширення газу (повітря). У періоди низького навантаження електроенергія витрачається на привід компресорів, які закачують повітря під високим тиском в підземні каверни (соляні шахти, резервуари) або наземні ємності. При необхідності віддати енергію – стиснене повітря випускається через турбіну, розширюючись і обертаючи генератор. Класичні CAES-станції існують з кінця 1970-х років (першу побудовано в Ганторфі, Німеччина, 290 МВт) і можуть забезпечувати тривалість генерації кілька годин. Історично такі системи потребували використання природного газу для підігріву повітря при розширенні (щоб компенсувати охолодження і втрати тиску), що дещо знижувало чистоту технології. Втім, сучасні адіабатичні CAES прагнуть усунути спалювання палива – тепло, виділене при стисненні, акумулюється у теплообмінниках і використовується повторно при розширенні, що підвищує ККД і екологічність [19 – 22].

На сьогодні CAES демонструє одні з найбільших проектів довготривалого зберігання енергії після ГАЕС. У 2022–2024 роках у Китаї введено в дію кілька передових CAES-станцій. Зокрема, в провінції Хубей запрацював комплекс потужністю 300 МВт з ємністю 1500 МВт·год (5 годин) на базі двох соляних каверн. Ця установка стала найбільшим у світі акумулюванням енергії без використання літію чи води, і її ККД досягає ~64% (планово до 70%) – наближаючись до ефективності ГАЕС. Станція побудована за 2 роки, що у 3–4 рази швидше за спорудження еквівалентної за потужністю ГАЕС. Подібні проекти розгортаються і в інших регіонах: наприклад, у провінції Хенань будується CAES на 300 МВт/1200 МВт·год. Такі системи здатні вирівнювати добові коливання – накопичувати надлишок від вітрових електростанцій у ночі чи сонячних вдень і віддавати під час вечірніх піків, забезпечуючи балансування попиту/пропозиції та

резерв потужностіhttps://www.energy-storage.news/worlds-largest-compressed-air-energy-storage-project-connects-to-the-grid-in-china/ -:~:text=hydro%20energy%20storage%20,achieve%20closer%20to%2080 [23].

Висока потужність і ємність (сотні МВт на години) при відносно невеликій площі зайняття землі (підземні сховища). Використання поширеного робочого тіла (повітря) без токсичних матеріалів. Термін служби установок також обчислюється десятиліттями, а число циклів майже не обмежене фізично (при дотриманні режимів тиску). Важливий аспект – геологічні умови: потрібні або природні каверни, або спорудження великих резервуарів, що може лімітувати локації для CAES (як і у випадку ГАЕС з географією водойм). Ефективність сучасних CAES поступається батареям та ГАЕС (наразі ~60–70% проти 80–90%), але відсутність затратних матеріалів (як у батареях) і масштабованість до дуже великої енергоємності робить їх конкурентними для довготривалого зберігання (6–12 годин і більше). З екологічного погляду, нові CAES не мають прямих викидів CO_2 (якщо живляться від надлишкової ВДЕ і працюють адіабатично), тож є чистою технологією зберігання енергії [19-23].

1.4 Глобальні тенденції і приклади використання

Світовий сектор накопичувачів енергії наразі переживає стрімке зростання, зумовлене розвитком ВДЕ. Станом на початок 2020-х років механічні накопичувачі, насамперед ГАЕС, домінували у загальній встановленій ємності зберігання. Як згадувалося, на гідроакумулюючі станції припадає ~95% обсягу зберігання енергії в мережах по всьому світу. Загальна потужність ПГАЕС оцінюється у 160–200 ГВт глобально, що еквівалентно приблизно 8–9 тис. ГВт·год накопичувальної спроможності. Для порівняння, сукупна потужність великих батарейних систем станом на 2022 рік була значно меншою – близько 28 ГВт, хоча темпи її приросту дуже високі (лише за 2022 рік введено +11 ГВт, +75% за рік).

Таким чином, традиційні механічні сховища (ГАЕС) поки що забезпечують левову частку довготривалої гнучкості енергосистем, але хімічні накопичувачі (літій-іонні батареї) «наздоганяють» за потужністю і, ймовірно, у майбутньому перевищать їх за темпами введення нових об’єктів [1].

Географічно найбільші потужності ГАЕС встановлені у країнах з давньою гідроенергетичною інфраструктурою та придатним рельєфом. Лідерами є Китай, США, Японія та Західна Європа. Зокрема, Китай тільки за 2020-2024 роки запустив понад 8 ГВт нових ГАЕС і планує довести обсяг гідроакумулювання до ~60–70 ГВт найближчими роками. Сполучені Штати мають близько 23 ГВт ПГАЕС (97% накопичення на рівні електромереж США), велика частина яких побудована в 1970–1990-х роках; тепер там робиться акцент на розвиток батарей, але й Pumped Storage отримує підтримку як довготермінове рішення. Європа (детальніше нижче) експлуатує біля 50–60 ГВт ПГАЕС, зосереджених в Альпійському регіоні (Швейцарія, Австрія, Італія, Франція), на Піренеях (Іспанія) та Балканах. Японія має понад 30 ГВт гідроакумулюючих станцій, інтегруючи їх для регулювання АЕС та ВДЕ на островах.

Окрім ГАЕС, у світі починають з’являтися великі проекти інших механічних технологій. Уже згадувані CAES у Китаї демонструють, що ці технології можуть бути розгорнуті на масштабах сотень мегават і забезпечувати сезонне резервування енергії без прямих викидів. Гравітаційні баштові накопичувачі від Energy Vault плануються не тільки в Китаї, а й в США та Європі – компанія оголосила про ряд проектів сумарною ємністю 2 ГВт·год у партнерстві з місцевими енергокомпаніями. Маховики поки розвиваються як нішева технологія для мережевого регулювання; крім названого китайського 30 МВт проекту, кілька-мегаватні системи встановлені в Великобританії (для служби миттєвого резерву при великих ВДЕ), в Австралії (для стабілізації автономних мікромереж) тощо [2,3].

Загальна тенденція – комбінація різних типів накопичувачів для забезпечення повного спектру послуг: від секундних (частотне регулювання) до багатогодинних (нічний переток сонячного надлишку на вечірній пік). Механічні накопичувачі, завдяки своїй масштабності та довготривалості, залишатимуться ключовими для довгих інтервалів (4–12 годин і більше), тоді як батареї займають нішу швидкого маневрування на інтервалі хвилини-години. Водночас, розвиток водневих технологій (ще один шлях сезонного накопичення) може в перспективі доповнити механічне зберігання, але це виходить за рамки даного аналізу [1-3].

1.5 Європейський досвід та перспективи

Європа історично є одним із центрів розвитку гідроакумулюючих систем. За даними Єврокомісії, у країнах ЄС сумарна встановлена потужність ГАЕС становить ≈46 ГВт (близько чверті світової). Якщо врахувати також Велику Британію, Норвегію, Швейцарію та інші європейські країни поза ЄС, ця цифра сягає ~57 ГВт. Найбільші ГАЕС Європи – це, зокрема, Dinorwig у Великобританії (1800 МВт, 11 ГВт·год накопичення), Travelers у Франції та Швейцарії (серія альпійських ПГАЕС потужністю 1000+ МВт кожна), Coo-Trois-Ponts у Бельгії (1080 МВт) та Капрун в Австрії. ГАЕС довели свою ефективність для інтеграції ВДЕ: наприклад, Іспанія та Німеччина активно закачують денний надлишок сонячної енергії у воду, щоб покрити вечірній попит, а Австрія та Швейцарія працюють як “батарея Європи”, накопичуючи нічну електрику з надлишків вітру в Німеччині та віддаючи у піки.

За останні роки Європа також стрімко нарощує хімічні накопичувачі. Станом на листопад 2025 року, на європейському ринку встановлено близько 99,3 ГВт різних систем зберігання. Із них 53,6 ГВт (≈54%) – це гідроакумуляція, а 44,8

ГВт (≈45%) – електрохімічні накопичувачі (переважно літій-іонні батареї, з яких 17 ГВт – великі мережеві, а ~28 ГВт – дрібні домогосподарські системи). Таким чином, частка механічних сховищ поки що найбільша, але уже до 2030 року очікується зростання ємності батарей в Європі до >160 ГВт, що суттєво перевищить поточні потужності ПГАЕС. Європейська стратегія енергопереходу визнає важливість гідро- і інших довготривалих накопичувачів: підтримуються проекти модернізації існуючих ГАЕС, будівництво станцій із використанням існуючих водойм (так звані closed-loop PHS без впливу на річки) та інноваційні гравітаційні системи. Наприклад, у Норвегії розглядають проекти використання гірських озер як “батареї Європи”, а у Німеччині досліджують можливість переобладнання шахт під підземні ГАЕС чи гравітаційні накопичувачі. Румунія спільно з австралійськими партнерами (Green Gravity) планує переоснастити 17 закритих вугільних шахт під гравітаційні сховища енергії (підйом-спуск вантажів у шахтних стовбурах) [3] – це приклад, як механічні технології інтегруються у програму справедливої трансформації вугільних регіонів [26-29].

Європейський Союз також приділяє увагу нормативному стимулюванню систем зберігання. Прийнято Регламент ЄС по батареях (2023) [24], що встановлює стандарти стійкості і утилізації, але паралельно у ЄС діє Clean Energy Package [25], який зобов’язує усувати бар’єри для участі накопичувачів (у т.ч. механічних) на ринку електроенергії та допоміжних послуг. У ряді країн запроваджуються аукціони на потужності або гнучкість, де механічні накопичувачі можуть конкурувати за контрактами на резервування енергії. Наприклад, у Великобританії схема Enhanced Frequency Response дозволила ГАЕС і маховикам отримувати винагороду за швидкодію [30]. Швейцарія та Австрія інвестують у розширення своїх ПГАЕС, оскільки бачать у них засіб балансування європейської мережі з ростом ВДЕ. В цілому, Європа розглядає механічні накопичувачі як невід’ємну частину свого міксу гнучкості разом із батареями, водневими технологіями та розумним управлінням попитом [31].

1.6 Український контекст

Для України механічні накопичувачі енергії – відносно новий, але стратегічно важливий напрямок, враховуючи плани інтеграції значних обсягів ВДЕ і потребу підвищення надійності об’єднаної енергосистеми. На сьогодні єдиними масштабними накопичувачами електроенергії в Україні є гідроакумулюючі електростанції. Інші технології зберігання поки що перебувають на ранніх стадіях (пілотні батарейні проекти, відсутні промислові CAES чи гравітаційні установки), тому ГАЕС фактично виконують усі завдання довготривалого балансування та покриття пікових навантажень.

Діючі об’єкти: Київська ГАЕС (введена в 1970-ті роки, потужність ~235 МВт), Ташлицька ГАЕС в Миколаївській області (перша черга 2×160 МВт запущена 2006–2007 рр., зараз 320 МВт, будується розширення до 900 МВт), а також Дністровська ГАЕС на р. Дністер (Чернівецька обл.) – найбільший проект, який частково працює: 3 агрегати з 7 запланованих введені, загальна потужність ~750 МВт з перспективою розширення до вражаючих 2268 МВт. Будівництво Канівської ГАЕС (1000 МВт) було розпочато ще за СРСР, заморожено, і лише у 2010-х роках проєкт відновлено та адаптовано до потреб сучасної енергосистеми (станом на 2023 р. реалізація знов затримана, зокрема через війну та екологічні ризики) [32].

ГАЕС України відіграють критично важливу роль у щодобовому вирівнюванні графіку навантаження. Наприклад, Ташлицька ГАЕС працює в парі з Південноукраїнською АЕС, забезпечуючи покриття піків ввечері та вранці і тим самим дозволяючи атомним блокам працювати рівномірно. Київська ГАЕС спільно з Київською ГЕС регулює режим Київського енерговузла та стабілізує

частоту в мережі Центральної України. Дністровська ГАЕС після завершення стане однією з найбільших у Європі і суттєво посилить гнучкість Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України – її планують використовувати для балансування потужних ВЕС і СЕС, що споруджуються в південних регіонах. В українській Енергетичній стратегії до 2035 року прямо зазначено, що розвиток ГАЕС є пріоритетом для забезпечення маневрених потужностей та інтеграції ВДЕ. Зокрема, передбачено добудову Дністровської та Ташлицької ГАЕС, а також можливе зведення менших ГАЕС у Карпатському регіоні на основі існуючих гідровузлів [33].

Інші види механічних накопичувачів в Україні поки що не застосовуються промислово. Маховики можуть знайти використання в складі систем управління якістю електроенергії на великих промислових об'єктах чи вузлах ВДЕ, але наразі про реалізовані проекти інформації немає. CAES для України малоймовірні через відсутність придатних соляних каверн значного об'єму (хоча теоретично можна використовувати шахтні виробітки Донбасу чи соляні родовища Прикарпаття, але це потребує детального вивчення). Нові гравітаційні технології (типу шахтних підйомників) могли б зацікавити Україну в контексті відновлення шахтарських регіонів – як видно, такі плани вже є в Румунії та Польщі. Наразі ж, в короткостроковій перспективі саме ГАЕС залишатимуться головним накопичувачем країни. Оператор "Укргідроенерго" прогнозує, що введення нових агрегатів ГАЕС значно підвищить стійкість ОЕС України та дозволить інтегрувати десятки відсотків генерації з ВДЕ без ризику дисбалансів [32-33].

Важливо відзначити, що з 2022 року, через воєнні дії, енергосистема України зазнала значних втрат та стала ізольованішою (відбулося аварійне відключення від російської/білоруської систем і дострокова синхронізація з європейською ENTSO-E). В цих умовах маневрені потужності набули ще більшого значення. ГАЕС використовуються для покриття дефіциту генерації у вечірні години, коли можливості імпорту з ЄС обмежені, а також для аварійного

резервування при пошкодженнях мережі. Таким чином, роль механічних накопичувачів для енергобезпеки України зросла – вони стали одним з елементів стійкості перед зовнішніми шоками і дозволяють ефективніше використовувати доступну генерацію.

Перспективи розвитку: після перемоги та відновлення енергосектору, ймовірно, Україна приділить увагу і сучасним технологіям накопичення. Вже зараз реалізуються проекти з батарейними системами (перша промислова літій-іонна система 1 МВт/2,25 МВт·год запущена на сонячній станції у 2021 р., а у 2023 р. введено 45 МВт системи у Буцьку). Але у масштабі мережі основну ставку роблять на потенціал гідроакумуляції – за оцінками, Україна ще може збільшити її на кілька гігават. При цьому слід враховувати екологічні та соціальні фактори (як показує досвід із Канівською ГАЕС, такі проекти вимагають прозорої оцінки впливу та врахування думки місцевих громад).

Висновки до розділу 1

Проведений огляд показує, що механічні накопичувачі енергії залишаються одним із ключових «фундаментів» сучасної та майбутньої енергосистеми. Попри стрімкий розвиток батарейних технологій, саме механічні сховища забезпечують основну частину довготривалого зберігання енергії в світі, працюючи з масштабами сотень мегават і гігават-годин. Вони опираються не на складну хімію, а на базові фізичні принципи - гравітацію, кінетику обертання та термодинаміку газів, - що робить такі системи структурно простими, довговічними та передбачуваними.

Гравітаційні накопичувачі, передусім гідроакумулюючі електростанції, залишаються беззаперечними «важковаговиками» глобального ринку зберігання

енергії. На них припадає близько 90–95 % встановленої потужності всіх накопичувачів у світі, а сумарна потужність ПГАЕС оцінюється у 160–200 ГВт. Вони здатні працювати по кілька годин на добу в генерації, забезпечуючи тисячі мегават-годин накопичення, високий ККД (80–90 %) і ресурс у десятки років. Водночас огляд європейського досвіду та ситуації навколо Канівської ГАЕС показує й інший бік медалі: такі проєкти нерозривно пов’язані з глибоким втручанням у природні водні екосистеми, зміною русел річок, міграції риби, берегової лінії та соціальної структури прибережних громад. Сучасна дискусія в Європі й в Україні дедалі більше наголошує, що нові ГАЕС можуть бути виправдані лише за умови максимально прозорої та жорсткої екологічної оцінки, а також пошуку компромісних рішень - використання вже існуючих водойм, закритих гідровузлів, варіантів «closed-loop» без прямого впливу на річкові системи.

Новітні твердофазні гравітаційні системи (як Energy Vault) демонструють цікаву спробу перенести принцип ГАЕС у середовище, де немає гірських озер і великих річок. Підйом і спуск бетонних блоків дозволяє досягати ККД ≈75–80 %, створювати установки на десятки мегават і сотні мегават-годин та розміщувати їх там, де традиційні ГАЕС неможливі - на промислових майданчиках, у шахтах, поблизу вітропарків. Ці системи ще далекі від масштабів класичних ПГАЕС, але вони відкривають перспективу «гравітаційної енергетики без води» і можуть стати важливим елементом трансформації вугільних регіонів, де шахтні стовбури отримують нове життя як енергетичні сховища.

Маховикові накопичувачі займають свою, зовсім іншу нішу. Вони не про багатогодинне зберігання, а про швидкість і точність. При відносно невеликій енергоємності (одиниці МВт·год) маховики забезпечують миттєву зміну потужності, ККД до 85–90 % на коротких інтервалах і практично необмежену кількість циклів заряд–розряд. Приклади на кшталт комплексу Beacon Power (20 МВт, США) та китайської системи на 30 МВт показують, що маховики стають

«нервовою системою» мережі: вони гасять миттєві коливання, підтримують частоту, захищають обладнання від провалів напруги. Через обмежену тривалість зберігання (хвилини) маховики не конкурують із ГАЕС чи CAES, а доповнюють їх, працюючи там, де потрібна надшвидка реакція й висока циклічність.

Системи CAES, своєю чергою, виступають проміжною ланкою між класичними ГАЕС і хімічними батареями. Вони дозволяють створювати об'єкти потужністю сотні МВт з ємністю тисячі МВт·год, використовуючи як робоче середовище звичайне повітря. Сучасні адіабатичні CAES, як-от комплекс у провінції Хубей на 300 МВт / 1500 МВт·год, демонструють ККД ≈60–70 %, не потребують спалювання газу й побудови великих водосховищ, а терміни будівництва суттєво коротші, ніж у ГАЕС. Головним обмеженням є геологія - потреба в підземних кавернах чи великих ємностях, - проте там, де такі умови є, CAES перетворюється на потужний інструмент добового й навіть тижневого балансування.

Огляд глобальних тенденцій показав, що світ рухається до багаторівневої архітектури накопичення: ГАЕС і CAES відповідають за довготривалу гнучкість (4–12 годин і більше), маховики та батареї - за швидкі та середні часові масштаби. Європейський досвід підтверджує цю картину: на кінець 2020-х років тут експлуатується близько 46–57 ГВт ГАЕС, при цьому потужність батарей зростає рекордними темпами та незабаром перевищить механічні системи за встановленою потужністю. Однак, навіть за такого розвитку подій, саме механічні накопичувачі залишаються опорою довготривалого балансування, а європейські стратегії прямо вказують на необхідність модернізації та розширення існуючих ПГАЕС, пошуку нових гравітаційних і CAES-рішень.

В українському контексті механічні накопичувачі мають особливо важливе стратегічне значення. Київська, Ташлицька та Дністровська ГАЕС фактично є єдиними великими «акумуляторами» ОЕС України, які щодоби згладжують піки навантаження, забезпечують маневреність атомної генерації й допомагають

інтегрувати наявні ВДЕ. Потенціал подальшого розвитку гідроакумуляції оцінюється у кілька гігават додаткової потужності, однак реалізація таких проектів неминуче стикається з питаннями екологічної безпеки та суспільної підтримки - як показує приклад Канівської ГАЕС. Для України надалі буде важливо поєднати досвід великих ГАЕС із пошуком нових рішень: гравітаційних систем у шахтах, пілотних маховикових комплексів для стабілізації вузлів ВДЕ, а можливо й перспективних CAES на базі існуючих підземних виробок.

Отже, загальний висновок розділу можна сформулювати так: механічні накопичувачі енергії не конкурують між собою, а формують цілісну «екосистему гнучкості», де кожна технологія займає власну нішу за часом зберігання, масштабом і типом послуг. Гравітаційні системи, маховики та CAES разом створюють багаторівневу опору для інтеграції відновлюваної енергетики, підвищення стійкості енергосистем і забезпечення енергетичної безпеки як у глобальному, так і в українському вимірі.

2. ІНТЕГРАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ У ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА ВДЕ

2.1 Економічна ефективність механічних накопичувачів

Економіка проектів зберігання енергії залежить від багатьох чинників: капітальні витрати на будівництво, експлуатаційні витрати, ресурс і кількість циклів, вартість альтернативних рішень (наприклад, пікових газових електростанцій чи відключень навантаження), а також від ринкових механізмів монетизації послуг (ринок електроенергії, допоміжні послуги, плата за резерв). Механічні накопичувачі історично вирізняються високими початковими інвестиціями, але довгим строком служби і низькими щорічними витратами. Розглянемо основні технології з точки зору економіки.

2.1.1. Помпові гідроакумулюючі електростанції

Капітальні витрати на ГАЕС дуже залежать від місця – коливаються в діапазоні 1–2 млн євро на 1 МВт потужності (тобто для станції 500 МВт це може бути €500–1000 млн). У перерахунку на ємність зберігання (МВт·год) при 6–8 год роботи це еквівалентно ~$100–200 за 1 кВт·год встановленої ємності, що конкурентно з сучасними батареями. Проте будівництво ГАЕС займає багато часу (5–10 років) і має кредитні ризики. З іншого боку, термін експлуатації перевищує 50 років, а деякі ГАЕС працюють 70+ років з модернізаціями – тобто інвестиція окупається у довгій перспективі. Вартість операції ГАЕС низька: не потрібне пальне, персоналу відносно небагато, основні витрати – це насоси, турбіни і підтримка дамб. Таким чином, Levelized Cost of Storage (LCOS) для великих ГАЕС є одним з найнижчих серед накопичувачів. За оцінками, сучасні ГАЕС здатні забезпечувати зберігання з приведеною вартістю $50–100 за 1 МВт·год циклу, що менше ніж у більшості батарей. Економічна віддача ГАЕС проявляється не лише в різниці тарифів «ніч-день» (спекулятивне зберігання), а й у наданні системних

послуг – за що в багатьох країнах зараз починають платити (наприклад, за підтримку частоти, регулювання напруги, резерв потужності) [34 -38].

У регульованих умовах ГАЕС можуть компенсуватися державою як інфраструктура, а на ринку – отримувати дохід із різниці цін та ринку допоміжних послуг.

2.1.2. Маховики

Маховики мають високі капітальні витрати на 1 кВт потужності, але низькі на 1 кВт·год (бо їх енергоємність мала). Наприклад, проект 20 МВт/5 МВт·год Beacon Power коштував близько $50 млн, тобто $2,5 млн/МВт потужності, але аж $10 тис/кВт·год ємності – в десятки разів дорожче за батареї у показнику $/кВт·год. Втім, це оманлива метрика, оскільки маховик не призначений для зберігання великих обсягів енергії. Правильніше порівнювати вартість за 1 МВт регулювання: тут маховики цілком конкурентні, особливо з урахуванням понад 100 000 циклів протягом життя без заміни. Витрати на експлуатацію маховиків мінімальні (немає витратних матеріалів, автоматична робота), тому основне – окупити капекс. Окупність досягається за рахунок плати за послуги з регулювання частоти та інерції: наприклад, у деяких країнах оператори платять за миттєву підтримку частоти (в Британії – служба Dynamic Containment). Якщо ринок цих послуг розвинений, маховики можуть заробляти достатньо, щоб виправдати інвестицію, особливо як доповнення до батарей (продовжують їх ресурс). В Україні поки ринку для цього немає, але з часом, із збільшенням ВДЕ, така ніша може з’явитися [39-41].

2.1.3. Системи акумулювання енергії на стисненому повітрі (CAES)

Історичні проекти CAES мали помірні капітальні витрати (~$1–1.5 млн/МВт), але потребували дешевий газ для підігріву, що впливало на операційні витрати. Нові адіабатичні CAES оцінюються приблизно в $1–2 млн за МВт (китайський 300 МВт проект коштував ~$270 млн, тобто ~$0.9 млн/МВт, або $180 за кВт·год ємності – дуже вигідно). Якщо підтвердиться досягнення заявленого ККД ~70%, то експлуатаційні витрати (основні – це втрата 30% електрики на циклі) будуть співмірні з втратами в інших накопичувачах. CAES також потребує обслуговування компресорів/турбін, але технології в цілому зрілі (узяті з газових турбін). Економічна модель CAES – заробіток на різниці цін між періодами та на допоміжних послугах (резерв, чорний старт тощо). У країнах з дешевою нічною електрикою (або надлишком ВДЕ) і дорогим піковим кіловат-години, CAES може окупатися. Наприклад, в Китаї ці проекти підтримуються державою саме для поглинання надлишків ВДЕ, а в майбутньому можуть отримувати плату за зменшення відключень ВДЕ (curtailment) [19].

2.1.4. Гравітаційні стартапи (типу Energy Vault)

Поки що про реальні комерційні результати рано говорити, але компанія заявляє конкурентоспроможність із літій-іонними батареями за показником LCoS. Очікуваний levelized cost їх систем – ~$50–100 за МВт·год циклу, за рахунок використання дешевих матеріалів (відходів) і довгого терміну експлуатації без деградації. Якщо ефективність справді досягне >80%, то операційні втрати невеликі. Велика перевага – масштабованість за ємністю: можна збільшувати

висоту або кількість блоків під потреби, що гнучкіше за фіксовану геометрію водойм у ГАЕС. Економічно вигідною така система буде там, де є значні коливання цін або часті режими заряд-розряд, бо вона може працювати багато циклів без деградації [42].

Традиційним способом покриття піків було будівництво газових турбін або підтримання резерву на ТЕС (що швидко включаються). Проте, зі зростанням цін на вуглеводні та екологічними вимогами, викопні пікери стають менш привабливими. Механічні накопичувачі, хоча й дорогі в будівництві, дозволяють економити паливо і знижувати викиди. У багато яких європейських країнах зараз питання стоїть так: вкладатися у накопичувачі чи платити за простої ВДЕ і тримати газові потужності? Все більше урядів та компаній схиляються до першого.

З іншого боку, у сегменті короткотривалого регулювання літій-іонні батареї суттєво подешевшали – з ~$1000/кВт·год у 2010 р. до <$200/кВт·год у 2024 р.. Це означає, що для 4-годинного зберігання батареї вже можуть конкурувати за ціною з ГАЕС (якщо є можливість швидко будувати). Тому економічна ніша механічних накопичувачів зміщується до довших тривалостей (8+ годин), де потрібні дуже великі ємності – там батареї поки надто дорогі або ненадійні через деградацію. Наприклад, при тривалостях >10 годин технології на зразок ПГАЕС, CAES чи теплоакумуляції мають нижчий LCoS, ніж літій-іонні системи, навіть з урахуванням прогнозованого здешевлення останніх.

Отже, економічна ефективність механічних накопичувачів проявляється в масштабі та довговічності: при великих обсягах енергії, які треба перекачувати щодня протягом десятиліть, капіталовкладення окуповуються нижчою собівартістю циклу. У короткострокових застосуваннях чи при малих масштабах – дешевше ставити батареї. Тому оптимальна стратегія для енергосистем – комбінувати різні типи: використовувати ГАЕС/CAES для базового нічного накопичення і резерву, гравітаційні/батареї середньої тривалості для добових

нерівномірностей, і маховики/надконденсатори для миттєвих флуктуацій. Це дозволяє досягти економії за рахунок використання кожної технології в тій області, де вона найефективніша [42].

2.2 Екологічні аспекти використання механічних накопичувачів

З точки зору впливу на довкілля, механічні накопичувачі мають як переваги, так і певні ризики. Розглянемо основні технології:

Гідроакумулюючі електростанції. Вважаються відновлюваним та чистим джерелом зберігання, оскільки не спричиняють викидів парникових газів при роботі (окрім невеликих витоків водосховищ метану через біорозклад органіки). ГАЕС дозволяють уникнути спалювання тонн викопного палива, опосередковано зменшуючи викиди CO_2 і забруднювачів повітря. Водночас екологічні ризики ГАЕС пов’язані зі створенням водосховищ: затоплення земель (можлива втрата лісів, сільгоспугідь), зміна гідрологічного режиму річок, вплив на водну фауну (міграція риби, якість води). Особливо проблема актуальна для річок у рівнинній місцевості – тому, скажімо, українські природоохоронці стурбовані впливом Канівської ГАЕС на річкову екосистему Дніпра. У гірських районах (Австрія, Швейцарія) ГАЕС будують здебільшого як закриті контури (off-river, без перехоплення русел) – там вплив менший. Ще один аспект – соціальний: переселення мешканців із зон затоплення, зміна ландшафтів, рекреаційна цінність територій. Сучасні проекти прагнуть врахувати це, проектуючи багатоцільові водосховища (що служать також для водопостачання, рекреації, захисту від повеней), а також впроваджуючи заходи з рибопроходів, заліснення схилів тощо. В цілому, вуглецевий слід ГАЕС дуже малий (будівництво бетону/металу –

основний внесок), а протягом експлуатації – мінімальний. Тому з точки зору клімату ГАЕС однозначно позитивні.

Маховики. Практично нейтральні екологічно під час роботи – немає викидів, немає використання небезпечних речовин. Матеріали маховиків – сталь або композити, що підлягають переробці. Є невеликий рівень шуму (вакуумні насоси, обертання), який потрібно ізолювати, але у промислових зонах це не проблема. Маховики не займають великої площі і можуть розташовуватись навіть у міських підстанціях. Питання може виникати щодо утилізації композитних роторів (якщо такі використовуються) – але їх ресурс десятки років, і обсяги невеликі порівняно, скажімо, з відпрацьованими батареями. Тому маховики часто називають екологічно дружнім накопичувачем. У них, однак, є аспект безпеки: при механічному руйнуванні ротора може виділятися велика енергія – тож конструкція має повністю поглинути уламки. Дотримання технічних стандартів дозволяє мінімізувати цей ризик (корпуси випробовуються на розрив).

CAES. Традиційні системи, де спалювався газ при розширенні, мали відповідно викиди CO_2 та NOx, хоч і менші, ніж у газових турбін тієї ж потужності (бо більшість енергії давало розширення повітря). Сучасні CAES з термоізоляцією практично не мають прямих викидів – якщо електрика для них надходить з ВДЕ, то повний цикл чистий. Втім, певний екологічний ризик – робота з високим тиском. У підземних сховищах треба уникати витоків повітря, які можуть виносити сольові розсоли, чи навіть спричинити мікросейсмічність (як і будь-яка діяльність у підземних кавернах). Але загалом вплив CAES локалізований і набагато менший, ніж у випадку видобутку копалин чи будівництва дамб. За використання існуючих соляних шахт вплив додатково зменшується. Отже, CAES можна вважати екологічно прийнятною технологією за умови дотримання норм герметичності і безпеки.

Гравітаційні башти. Основні матеріали – стальні конструкції, бетонні або композитні вантажі. Викиди CO_2 пов’язані з їх виробництвом (зокрема, цемент),

але після побудови установка десятиліттями працює без додаткових витрат матеріалів. Energy Vault пропонує робити блоки з відходів (зола ТЕС, мінеральні відвали, стара скловолокниста продукція) – це навіть допомагає утилізувати сміття. Такі баштові накопичувачі займають певну площу і висоту (~100 м і більше), що впливає на ландшафт та може викликати зауваження громад щодо вигляду чи вписаності в середовище. Однак прямого впливу на ґрунти, воду чи повітря немає. Можна говорити про мінімальний вплив: трохи шуму від моторів (тільки при зарядці-розрядці), відсутність небезпечних речовин. Невеликий ризик – падіння вантажів у разі аварії, але система керування проєктують з багаторазовим резервуванням, щоб цього не сталося.

Порівняння з акумуляторами. Хімічні батареї, зокрема літієві, мають свої екологічні проблеми – це видобуток корисних копалин (літію, кобальту, нікелю тощо) зі значним порушенням екосистем і забрудненням води, а також утилізація відпрацьованих батарей (які містять токсичні компоненти). При масовому впровадженні батарей постає питання переробки, щоб уникнути накопичення небезпечних відходів. Механічні накопичувачі в цьому плані виграють: вони базуються на інертних матеріалах – вода, повітря, метали, бетон – які або не дефіцитні, або легко перероблюються. ГАЕС, щоправда, впливають на ландшафт, але їх модернізація чи закриття (через багато десятків років) не залишає отруйних залишків, лише змінений рельєф, який можна рекультивувати. Батареї ж потрібно збирати і переробляти, що вимагатиме енергії та створює додатковий промисловий цикл. Таким чином, з позицій кругової економіки і сталого розвитку механічні сховища виглядають привабливо, особливо якщо впроваджувати їх розумно, мінімізуючи локальний природний вплив. Вони дозволяють значно скоротити вуглецевий слід енергосистеми (даючи змогу замістити газові турбіни та повніше використовувати ВДЕ) і сприяють декарбонізації електромереж без появи нових екологічних проблем.

2.3 Інтеграція механічних накопичувачів у електричні мережі та ВДЕ

Інтеграція механічних накопичувачів у енергосистему охоплює декілька рівнів: виробництво (генерацію), передавання (магістральні мережі), розподіл (локальні мережі) та споживання. У кожному з них накопичувачі можуть виконувати специфічні функції, покращуючи стабільність і ефективність роботи мережі.

На рівні генерації механічні накопичувачі дозволяють згладжувати нерівномірність виробітку ВДЕ. Наприклад, велика вітрова ферма може бути доповнена поруч ГАЕС або CAES, яка акумулює нічний надлишок вітру і випускає його вдень, коли вітер стих чи споживання вище. Також ГАЕС можуть працювати в парі з АЕС та ТЕС базового режиму – накопичуючи енергію в години мінімального навантаження, щоб теплові блоки не знижували потужності. Це підвищує ККД використання генерації і зменшує пуски-зупинки ТЕС, які дуже неефективні і зношують обладнання. Для України актуальний приклад – співпраця Ташлицької ГАЕС з Південноукраїнською АЕС, що дозволяє атомним енергоблокам працювати на номіналі без втрат на маневрування. У майбутньому, коли частка сонячної генерації збільшиться, денної перевиробіток СЕС (наразі вже спостерігається у південних областях) можна буде закачувати у гідро- чи повітряні сховища, уникаючи відключення сонячних станцій опівдні. Це і економічно вигідніше, і дозволяє збільшити частку відновлюваної електроенергії в балансі.

На рівні передавання (високовольтні мережі) великі накопичувачі відіграють роль резерву та буферу для системного оператора. Вони можуть швидко компенсувати аварійний дисбаланс – наприклад, раптове відключення великої електростанції чи перетоку. ГАЕС здатні забезпечити спінінговий резерв

(spinning reserve) – тобто вже напрацьована вода може миттєво подати потужність у мережу, подібно до працюючої турбіни ТЕС, що тримається в резерві. Це підвищує надійність роботи системи і запобігає аварійному зниженню частоти. Крім того, велике сховище, підключене до магістральної мережі, розвантажує лінії електропередач у години перенавантаження. Скажімо, якщо є обмежена пропускна здатність ЛЕП з району ВДЕ, встановлення накопичувача на кінці лінії дозволить накопичувати енергію локально, коли лінія перевантажена, і видавати її пізніше, коли звільнилася пропускна спроможність. Таким чином згладжуються перетоки по магістралях, що особливо важливо для запобігання аварій у мережах з нестабільною генерацією (вітрові шквали можуть спричинити різкий стрибок потужності по лініях – накопичувач це “зріже”).

На рівні розподільчих мереж (області, міста) механічні накопичувачі поки що рідкість, оскільки ГАЕС і CAES – великі об’єкти, які доцільно підключати до високої напруги. Проте є концепції міні-ГАЕС (наприклад, використання існуючих водонапірних башт або невеликих резервуарів на пагорбах) для живлення ізольованих районів. В Австралії реалізують проект, де два сільських водосховища слугують для зберігання енергії, стабілізуючи локальну мережу з сонячними фермами. Також маховики можуть встановлюватися на підстанціях для компенсації миттєвих провалів напруги або підтримки якості електроенергії. У місцевостях з нестабільним енергопостачанням (наприклад, острівні мережі, слабко пов’язані регіони) такі пристрої можуть запобігати відключенням шляхом миттєвої підстраховки поки включиться резервний генератор.

З інтеграцією відновлюваних джерел механічні накопичувачі особливо тісно пов’язані. Високопотужні вітрові електростанції на узбережжях нерідко будуються поруч з морем, де рел’єф гористий – там же є потенціал для будівництва ГАЕС. В Іспанії та Португалії вже кілька ВЕС мають у своєму складі резервуари для накопичення енергії. Сонячні електростанції можуть вдень закачувати воду в верхні резервуари, а ввечері – та вночі отримувати назад

електрику, фактично перетворюючи денну сонячну генерацію на нічну. Це критично важливо для повної заміни викопних джерел: без зберігання довелося б тримати нічні газові станції, але з достатньою кількістю накопичувачів – гідроакумуляції чи навіть великих батарей – можна покривати нічний попит раніше накопиченою сонячною енергією.

Допоміжні послуги, які надають механічні накопичувачі, покращують якість електроенергії. ГАЕС можуть надавати реактивну потужність для підтримки напруги, виступати синхронними компенсаторами (обертові машини, що стабілізують частоту – деякі ГАЕС мають такий режим). Маховики і ГАЕС забезпечують системі ефект інерційності – тобто при різкій зміні навантаження вони протидіють зміні частоти за рахунок кінетичної енергії роторов (у ГАЕС – маса турбіни-генератора, у маховика – сам маховик). Це важливо, бо сонячні й вітрові інвертори такої інерції не мають, і система з великим відсотком ВДЕ стає "легкою", схильною до різких перепадів частоти. Накопичувачі вирішують цю проблему, повертаючи в систему необхідну інерцію та резерви.

Взаємодія з іншими інфраструктурами. Наприклад, гідроакумулюючі станції інколи поєднують з водопостачанням (верхній резервуар як запас води для міста) або з виробництвом водню (надлишок енергії викачують у воду і ще електролізер працює паралельно). Гравітаційні накопичувачі у шахтах можуть вирішувати проблему рекультивації шахт та забезпечувати енергією майбутні енергоємні ферми даних чи теплиці під землею (такі проекти розглядаються в ЄС).

Таким чином, механічні накопичувачі енергії є потужним інструментом інтеграції відновлюваних джерел та підвищення гнучкості електромереж. Вони доповнюють інші технології зберігання і засоби керування попитом, формуючи багаторівневу систему стабілізації енергопостачання: від миттєвих масштабів (секунди) до сезонних (тижні й місяці). За умов грамотного планування та підтримки з боку регуляторів, механічні накопичувачі можуть значно знизити витрати на перебудову мереж під ВДЕ, зменшити необхідність будівництва

пікових електростанцій і сприяти надійному переходу до декарбонізованої енергетики.

2.4 Висновки за розділом

Механічні накопичувачі енергії – перевірені часом та інноваційні – відіграють важливу роль у сучасній і майбутній електроенергетиці. Глобальний аналіз показує, що традиційні гідроакумулюючі станції наразі забезпечують основну частку зберігання енергії у світі, особливо для довготривалого балансування мереж з високою часткою відновлюваних джерел. В Європі ГАЕС і надалі залишаються критично важливими для гнучкості системи, хоча стрімкий розвиток акумуляторів змінює баланс на їх користь у короткостроковому проміжку. В Україні механічні накопичувачі, передусім ГАЕС, є фактично єдиним інструментом масштабного зберігання енергії і мають стратегічне значення для інтеграції ВДЕ та підтримки стабільності ОЕС.

Кожна технологія має свої ніші та переваги. ГАЕС пропонують величезні потужності й енергоємності з високим ККД і довгим ресурсом, але потребують відповідних природних умов та капіталовкладень. Flywheel-маховики надають миттєву реакцію і витривалість до частих циклів, проте підходять лише для коротких інтервалів зберігання. CAES здатні накопичувати значні об’єми енергії без географічних обмежень, окрім наявності підземних порожнин, і в новітньому виконанні можуть досягати конкурентної ефективності. Гравітаційні системи підйому вантажів – перспективна альтернатива для місць без водойм, що поєднує простоту і екологічність, хоча ще потребує доведення економічної доцільності на практиці.

Економічний аналіз демонструє, що механічні накопичувачі стають вигідними у сценаріях, де потрібне масштабне та тривале зберігання – саме тут вони перевершують хімічні батареї за повною вартістю циклу. Водночас у швидких регулюючих застосуваннях батареї та маховики чудово доповнюють одне одного, подовжуючи строк служби систем та знижуючи сумарні витрати. Із погляду сталого розвитку, механічні рішення часто мають нижчий вплив на довкілля в життєвому циклі, ніж масове виробництво акумуляторів – вони використовують доступні природні матеріали і позбавлені токсичних відходів, хоча потребують уважного проектування, щоб мінімізувати локальні екологічні наслідки (особливо для ГАЕС).

З огляду на швидке зростання частки ВДЕ і посилення вимог до гнучкості, доцільність впровадження механічних накопичувачів в електричних мережах є доведеною і навіть необхідною. На глобальному рівні ці технології вже працюють десятиліттями, а нові проекти у Китаї, Європі, США розширюють межі їх можливостей (більші потужності, вищий ККД, нові конструктивні рішення). Для України розвиток існуючих та будівництво нових ГАЕС – економічно виправданий крок для забезпечення енергетичної безпеки і ефективної інтеграції зеленої енергії у повоєнному відновленні енергосистеми. У поєднанні з іншими технологіями зберігання та розумним управлінням попитом, механічні накопичувачі здатні створити гнучку, надійну та екологічно чисту електричну мережу майбутнього, де надлишкова енергія не втрачається, а зберігається і використовується тоді, коли це найбільш потрібно.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАХОВИКА ЯК МЕХАНІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

У цьому розділі зосередимось на маховику як механічному накопичувачі енергії та його інтеграції в систему електропостачання з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ).

3.1. Маховик як накопичувач кінетичної енергії

Маховик розглядаємо як тверде тіло з моментом інерції I , що обертається з кутовою швидкістю ω . Для простоти візьмемо суцільний циліндричний диск маси m та радіуса R .

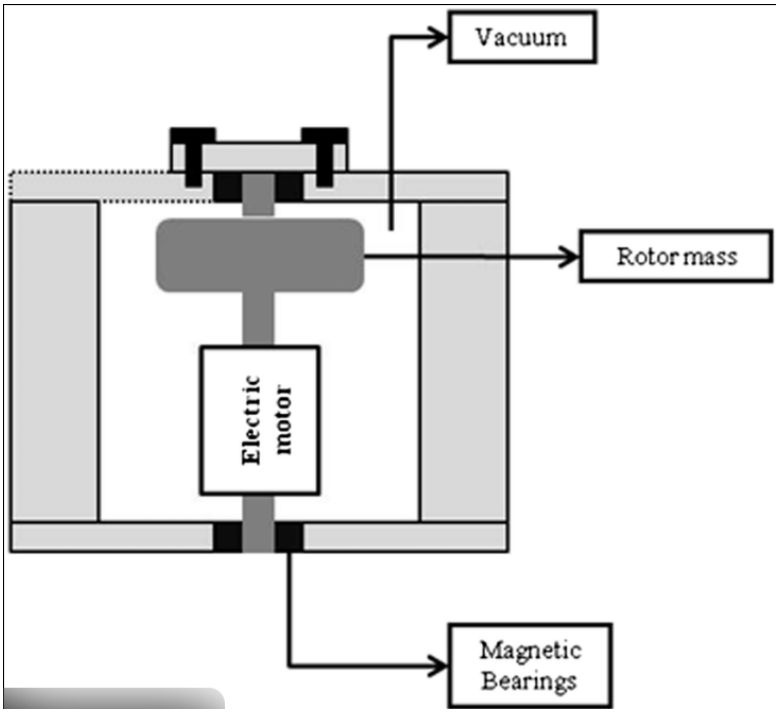


Рисунок 3.1 – Конструктивна схема маховикового накопичувача енергії (FESS) з вакуумною камерою та магнітними підшипниками

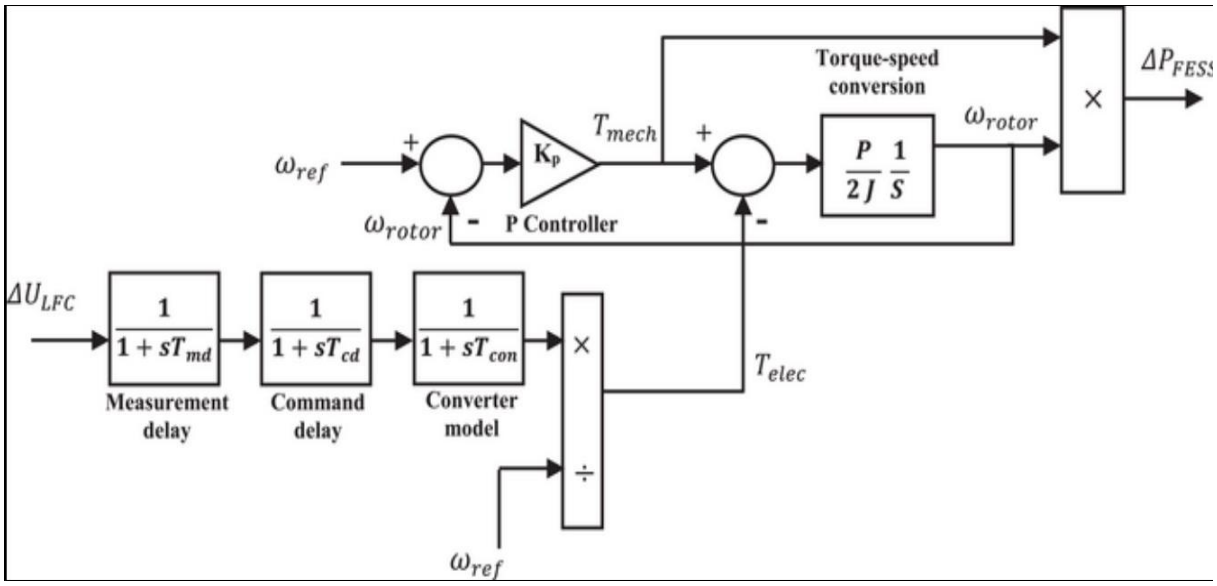


Рисунок 3.2 – Структурна модель керування FESS для регулювання частоти з урахуванням часових затримок та динаміки електромашини

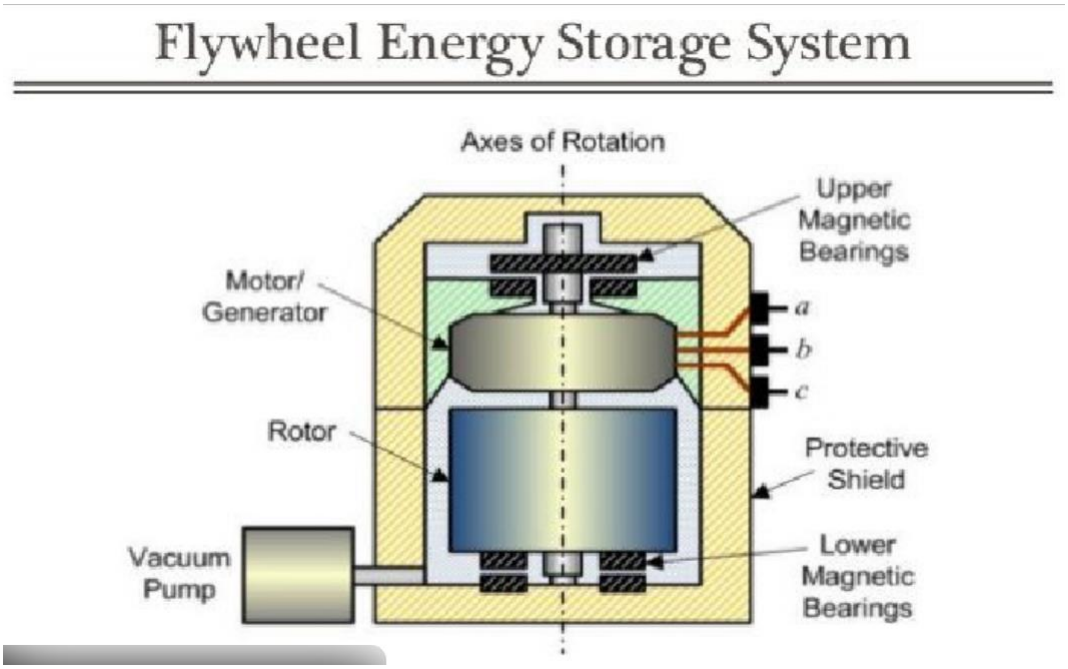


Рисунок 3.3 – Будова маховикового накопичувача енергії з магнітними підшипниками та вакуумною камерою

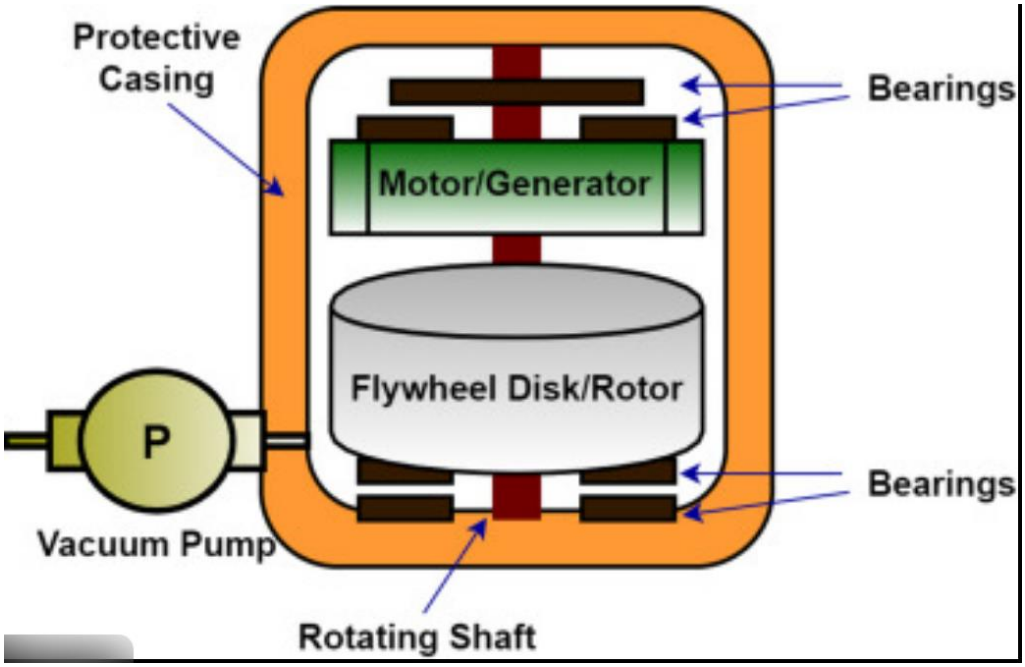


Рисунок 3.4 – Схема конструкції маховикового накопичувача енергії з електродвигуном-генератором, вакуумною системою та опорними підшипниками

Тоді його момент інерції:

$$J = \frac{1}{2} mR^2. \tag{3.1}$$

Накопичена в маховику кінетична енергія задається класичною формулою:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J\omega^2. \tag{3.2}$$

У реальній системі маховик працює в межах:

$$\omega_{min} \le \omega(t) \le \omega_{max}, \tag{3.3}$$

що відповідає запасу енергії від E_{min} до E_{max}:

$$E_{\text{min}} = 1/2\, J\omega_{\text{min}}^{\uparrow}2, \qquad E_{\text{max}} = 1/2\, J\omega_{\text{max}}^{\uparrow}2. \tag{3.4}$$

Зручно ввести аналог state of charge (SOC), як у батарей:

$$\text{SOc}(t) = \frac{E_{\text{kin}}(t) - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}, \qquad 0 \le \text{sOc}(t) \le 1. \tag{3.5}$$

Цей безрозмірний показник відображає, наскільки «заряджений» маховик.

3.2. Рівняння руху маховика

Динаміку обертання описує рівняння моментів:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_{\text{m}} - T_{\text{e}} - T_{\text{loss}}, \tag{3.6}$$

де T_{m} – момент від електромашини в режимі двигуна (заряд маховика),

T_{e} – момент від електромашини в режимі генератора (розряд маховика),

T_{loss} – сумарний момент втрат (механічне тертя, аеродинамічні втрати, втрати в підшипниках тощо).

Часто T_{loss} апроксимують лінійною залежністю від швидкості:

$$T_{\text{loss}} = B\,\omega, \tag{3.7}$$

де B – коефіцієнт в'язкого тертя (Н·м·с). Тоді рівняння руху набирає вигляду:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - B\omega. \tag{3.8}$$

Це – базове диференційне рівняння, яке описує зміну швидкості маховика при зарядженні та розрядженні.

3.3 Зв'язок механічних та електричних величин

Маховик напряму не працює з мережею – між ним і електросистемою стоїть електромашина (частіше за все синхронний або PMSM двигун/генератор) та перетворювач частоти (DC/AC інвертор). Потужність на валу машини зв'язана з моментом та швидкістю:

$$P_{mech} = T_{em}\,\omega, \tag{3.9}$$

де T_{em} – електромагнітний момент машини (з урахуванням знаку: позитивний – заряд, негативний – розряд). Для подальшого спрощення використовуємо:

$$T_m - T_e = T_{em}. \tag{3.10}$$

і переписуємо рівняння руху:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_{em} - B\omega. \tag{3.11}$$

З урахуванням перетворень у силовій електроніці (інвертор, випрямляч), електрична потужність маховикової системи P_{FESs} може бути зв'язана з механічною:

$$P_{FESs} = \eta_{ei} P_{mech} = \eta_{ei} T_{em}\omega. \tag{3.12}$$

де η_{ei} – ККД електричної частини (перетворювач + машина).

В режимі заряду маховика (з боку мережі ми споживаємо потужність):

$$P_{grid-FESs} > 0 \Rightarrow T_{em} > 0. \tag{3.13}$$

в режимі розряду:

$$P_{FESs-grid} > 0 \Rightarrow T_{em} < 0. \tag{3.14}$$

Зміна енергії маховика в загальному вигляді:

$$\frac{dE_{kin}}{dt} = P_{in} - P_{out} - P_{loss}. \tag{3.15}$$

де P_{loss} включає механічні та електричні втрати, узгоджені з попередніми рівняннями.

3.4. Спрощена модель для інтеграції в енергосистему з ВДЕ

Розглянемо енергосистему вузла мікромережі з ВДЕ, навантаженням та маховиком. Позначимо:

$P_{\text{RE}s}(t)$ – потужність відновлюваних джерел (сонце, вітер),

$P_{\text{L}}(t)$ – потужність навантаження,

$P_{\text{FES}s}(t)$ – потужність маховикової системи (позитивна – віддаємо в мережу, негативна – заряджаємося),

$P_{\text{grid}}(t)$ – потужність обміну з основною мережею (якщо є).

Баланс потужностей у вузлі можна записати як:

$$P_{\text{RE}s}(t) + P_{\text{FES}s}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{L}}(t). \tag{3.16}$$

У ізольованій мікромережі (без P_{grid}) маємо:

$$P_{\text{RE}s}(t) + P_{\text{FES}s}(t) = P_{\text{L}}(t). \tag{3.17}$$

Маховик тут виступає як регулюючий елемент, що компенсує різницю між генерацією ВДЕ та навантаженням.

Введемо «дисбаланс потужності»:

$$\Delta P(t) = P_{\text{RE}s}(t) - P_{\text{L}}(t). \tag{3.18}$$

Якщо $\Delta P(t) > 0$ – генерація ВДЕ перевищує навантаження; якщо $\Delta P(t) < 0$ – навантаження більше, ніж поточна генерація ВДЕ.

Логіка роботи маховика:

при $\Delta P(t) > 0$ маховик заряджається:

$$P_{\text{FESs}}(t) = -k_{\text{Ch}}\Delta P(t), \tag{3.19}$$

де k_{Ch} – коефіцієнт участі маховика в поглинанні надлишку потужності (0–1);

при $\Delta P(t) < 0$ маховик розряджається:

$$P_{\text{FESs}}(t) = -k_{\text{dis}}\Delta P(t), \tag{3.20}$$

де k_{dis} – коефіцієнт участі маховика в покритті дефіциту.

У компактному вигляді з урахуванням насичення за ς:

$$P_{\text{FESs}}(t) = f\left(\Delta P(t), \text{SOc}(t)\right), \tag{3.21}$$

де функція $f(\cdot)$ враховує обмеження за потужністю $P_{\text{FESS,max}}$ та межі $\text{SOc}_{\text{min}}, \text{SOc}_{\text{max}}$.

3.5. Динаміка SOC маховика

Зв’язок між $P_{\text{FESs}}(t)$ та зміною запасу енергії можна описати так:

$$\frac{dE_{\text{kin}}}{dt} = -\frac{P_{\text{FESs}}(t)}{\eta_{\text{cycle}}}, \tag{3.22}$$

де при розряді (маховик віддає енергію в мережу) $P_{FESs}(t) > 0$,

η_{cycle} – узагальнений ККД циклу (враховує механічні й електричні втрати).

Тоді диференційне рівняння для SOC:

$$\frac{dSOc}{dt} = \frac{1}{E_{max} - E_{min}} \frac{dE_{kin}}{dt} = -\frac{P_{FESS}(t)}{\eta_{cycle}(E_{max} - E_{min})}. \quad (3.23)$$

З урахуванням обмежень:

$$SOc_{min} \le SOc(t) \le SOc_{max}. \quad (3.24)$$

3.6. Інтерпретація з точки зору інерції енергосистеми

Маховик – це не лише накопичувач енергії, а й джерело інерції для енергосистеми. В синхронних системах схему можна уявити так: еквівалентний момент інерції всієї системи збільшується за рахунок додаткового маховика.

Якщо розглядати вузол як еквівалентний генератор із сумарним моментом інерції $J_{tot} = J_{grid} + J_{FESs}$, то спрощене «рівняння розгону» (swing equation) у відносних одиницях можна записати як:

(3.25)

де H_{eq} – приведена до бази константа інерції (секунди),

f – частота системи,

P_m – сумарна механічна потужність,

P_e – електрична потужність, що відбирається навантаженням.

За рахунок FESS ми фактично збільшуємо H_{eq} та зменшуємо $\frac{df}{dt}$ при збуреннях. Формально внесок маховика в еквівалентну інерцію можна оцінити через його запасену енергію при номінальній частоті.

3.7. Підсумкова структурована модель

Підсумуємо отримані співвідношення у вигляді системи рівнянь, яку можна використати в моделюванні системи «ВДЕ + навантаження + маховик»:

Енергія маховика:

$$E_{kin}(t) = \frac{1}{2} J \omega^2(t). \tag{3.26}$$

Рівняння руху маховика:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B\omega(t). \tag{3.27}$$

Електромеханічний зв’язок:

$$P_{FESs}(t) = \eta_{el}\, T_{em}(t)\, \omega(t). \tag{3.28}$$

Баланс потужності вузла мікромережі (ізольований випадок):

$$P_{\text{REs}}(t) + P_{\text{FESs}}(t) = P_{\text{L}}(t). \tag{3.29}$$

Формування керуючої потужності маховика (регулювання дисбалансу):

$$\Delta P(t) = P_{\text{REs}}(t) - P_{\text{L}}(t). \tag{3.30}$$

$$P_{\text{FESs}}(t) = f\left(\Delta P(t), \text{SOc}(t)\right). \tag{3.31}$$

де f враховує обмеження за потужністю та SOC.

Динаміка SOC:

$$\frac{d\text{SOc}}{dt} = -\frac{P_{\text{FESs}}(t)}{\eta_{\text{cycle}}(E_{\text{max}} - E_{\text{min}})}. \tag{3.32}$$

Ця модель достатньо компактна, щоб її реалізувати у середовищах типу MATLAB/Simulink, Modelica чи Python (наприклад, для імітацій добових графіків ВДЕ та навантаження з маховиком), але водночас має всі ключові фізичні зв’язки: механіка обертання, електромеханічне перетворення, баланс потужностей та «логіка» роботи накопичувача в системі з ВДЕ.

3.8 Реалізація моделі роботи маховика (fess) в мікромережі з ВДЕ у середовищі MATLAB

Розроблена програма наведена в додатку А у середовищі MATLAB та моделює роботу маховикової енергетичної системи (FESS) у складі мікромережі, що живиться від відновлюваних джерел енергії. У центрі моделі - реалістичний часовий перебіг роботи ВДЕ, навантаження та механічного накопичувача енергії, який компенсує коливання потужності в мережі.

На першому етапі програма задає фізичні параметри маховика: момент інерції, допустимий діапазон кутових швидкостей, запас енергії, межі заряду (SOC) та технічні обмеження потужності. Це створює основу для коректного опису механіки обертання й енергетичних процесів.

Далі формується часовий ряд тривалістю 24 години, у межах якого генеруються синтетичні добові графіки відновлюваної генерації та навантаження. Профіль ВДЕ імітує комбінацію сонячної та вітрової енергії, тоді як навантаження відтворює характерні добові цикли споживання з ранковими та вечірніми піками. Таким чином, модель наближена до реальних режимів роботи мікромережі.

У головному обчислювальному циклі програма крок за кроком визначає дисбаланс між виробництвом і споживанням та обчислює потужність, з якою повинен працювати маховик. Якщо в системі виникає надлишок енергії, маховик переходить у режим заряду; якщо генерації бракує - віддає енергію назад у мережу. Алгоритм враховує обмеження на максимальну потужність, а також на допустимі межі SOC, що робить процес максимально наближеним до реальної експлуатації накопичувача.

Після цього програма розраховує зміну енергії, кутової швидкості та стану заряду маховика в кожен момент часу. На основі цих результатів будуються різні тривимірні поверхні, які наочно демонструють взаємозв’язок між основними параметрами системи. Програма автоматично формує 10 об’ємних 3D-графіків, серед яких: поведінка SOC у залежності від часу та дисбалансу потужності; потужність FESS як функція відновлюваної генерації та навантаження; кутова

швидкість маховика на фоні енергетичних збурень; залежності між SOC, потужністю маховика та параметрами мікромережі.

Ці графічні поверхні дають можливість вивчати поведінку системи з різних боків, аналізувати критичні режими та оцінювати ефективність маховикового накопичувача в умовах нестабільної роботи ВДЕ.

Таким чином, програма не лише обчислює динаміку енергосистеми, а й забезпечує глибоку візуалізацію процесів, що є надзвичайно корисним інструментом для досліджень, оптимізації керування та опису поведінки мікромережі з інтегрованим маховиковим накопичувачем.

Крім базового моделювання, програма дозволяє гнучко варіювати ключові параметри маховика. Наприклад, момент інерції J можна змінювати в широкому діапазоні - у нашому випадку використано значення 500 кг·м², що відповідає середньопотужним промисловим маховикам. Діапазон кутових швидкостей, заданий від 104 рад/с (1000 об/хв) до 628 рад/с (6000 об/хв), дозволяє оцінювати роботу накопичувача в режимах від мінімального до максимально допустимого запасу енергії. Це дає змогу аналізувати, як змінюється енергетична ємність FESS - від 2,7 МДж до 98,7 МДж, що є характерним діапазоном для реальних маховикових систем.

Програма також моделює реалістичні обмеження потужності накопичувача. Максимальна потужність розряду та заряду встановлена на рівні 500 кВт, що дозволяє оцінити поведінку FESS під час різких стрибків генерації або навантаження. На графіках видно, що у більшості моментів доби маховик працює з малою потужністю - близько 0–10 кВт, що свідчить про низький рівень SOC. Однак у пікові моменти, коли відновлювана генерація перевищує навантаження, система здатна розвинути потужність до 70–75 кВт, активно поглинаючи надлишкову енергію.

Особливістю програми є можливість моделювання добових коливань ВДЕ. Генерація від сонця та вітру формується синтетично, але з дотриманням

характерних для реальних систем закономірностей. Вітрова компонента змінюється в межах від 0.6 до 1.0 p.u., тоді як сонячна досягає максимуму у середині дня - близько 1.0 p.u.. У результаті сумарна генерована потужність ВДЕ змінюється від 0 до 600 кВт, що дозволяє оцінювати роботу FESS за різних погодних умов та рівнів інсоляції.

Ще однією важливою функцією програми є деталізований аналіз динаміки SOC. Оскільки межі SOC встановлені у діапазоні 0.10–0.95, система запобігає некоректній роботі маховика при надмірному розряді або перезаряді. Програма відстежує зміну заряду з часовою роздільністю 60 секунд, що дозволяє фіксувати навіть короткочасні стрибки у роботі. У підсумку користувач бачить, що SOC у більшості випадків тримається поблизу мінімальної межі 0.10, а у періоди надлишку генерації може зрости до 0.22–0.25, чітко відображаючи реакцію системи на добові коливання.

На рисунках 3.5…3.14 наведено результати моделювання.

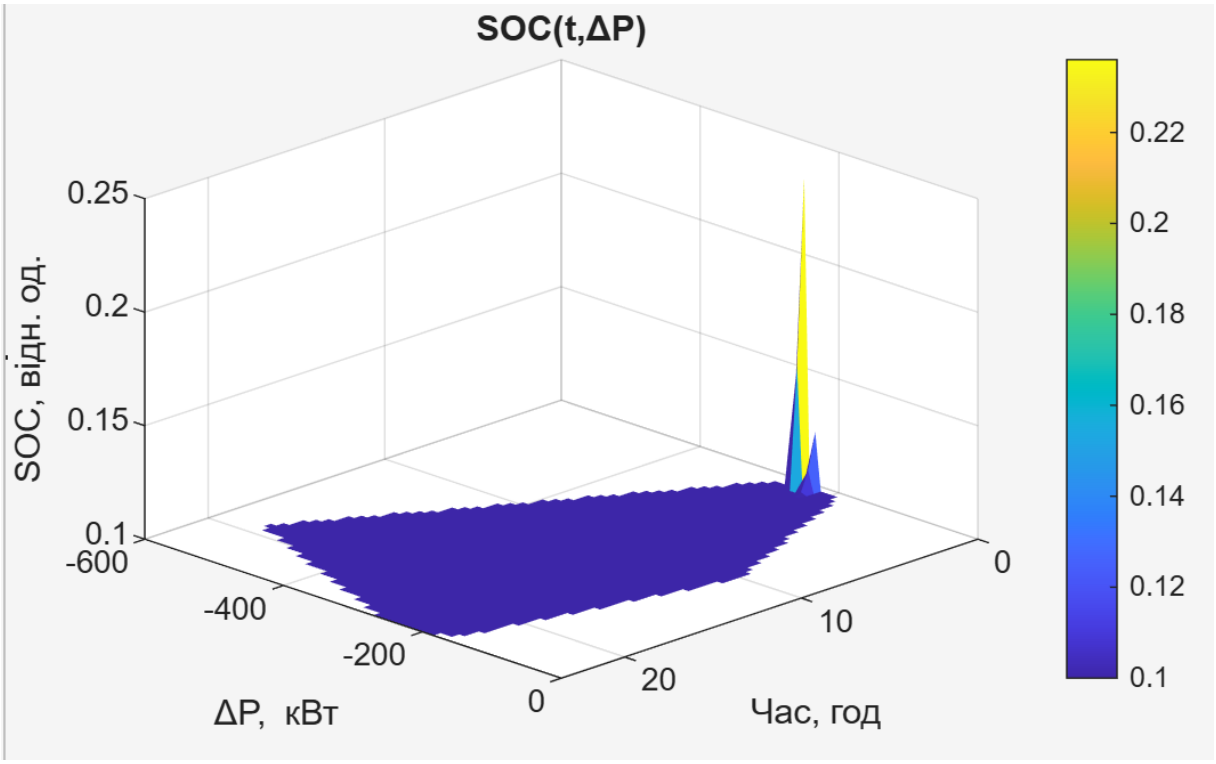


Рисунок 3.5 Залежність рівня заряду маховика SOC від часу роботи мікромережі та дисбалансу потужності (ΔP)

На графіку представлена тривимірна поверхня, що демонструє, як змінюється стан заряду маховика (SOC) під впливом добового режиму роботи мікромережі та коливань між генерацією ВДЕ й навантаженням. Вісь часу охоплює повні 24 години роботи, а дисбаланс потужності ΔP змінюється приблизно в межах від –600 до 0 кВт, що відповідає періодам стійкого дефіциту генерації відносно навантаження.

Значення SOC у більшості інтервалів утримуються поблизу нижньої допустимої межі 0.10, що свідчить про постійний режим розряду накопичувача через нестачу енергії від ВДЕ. Лише в окремі короткі моменти, переважно у середній частині доби, SOC підвищується до 0.22–0.25, коли генерація короткочасно перевищує споживання. Ці піки, видимі як вузькі «виступи» на поверхні, відображають рідкі епізоди, коли маховик отримує достатній надлишок потужності для заряджання.

Таким чином, графік показує, що за заданих умов мікромережі маховик більшу частину часу підтримує роботу системи, компенсуючи дефіцит енергії, а можливості для його заряджання виявляються обмеженими та короткотривалими.

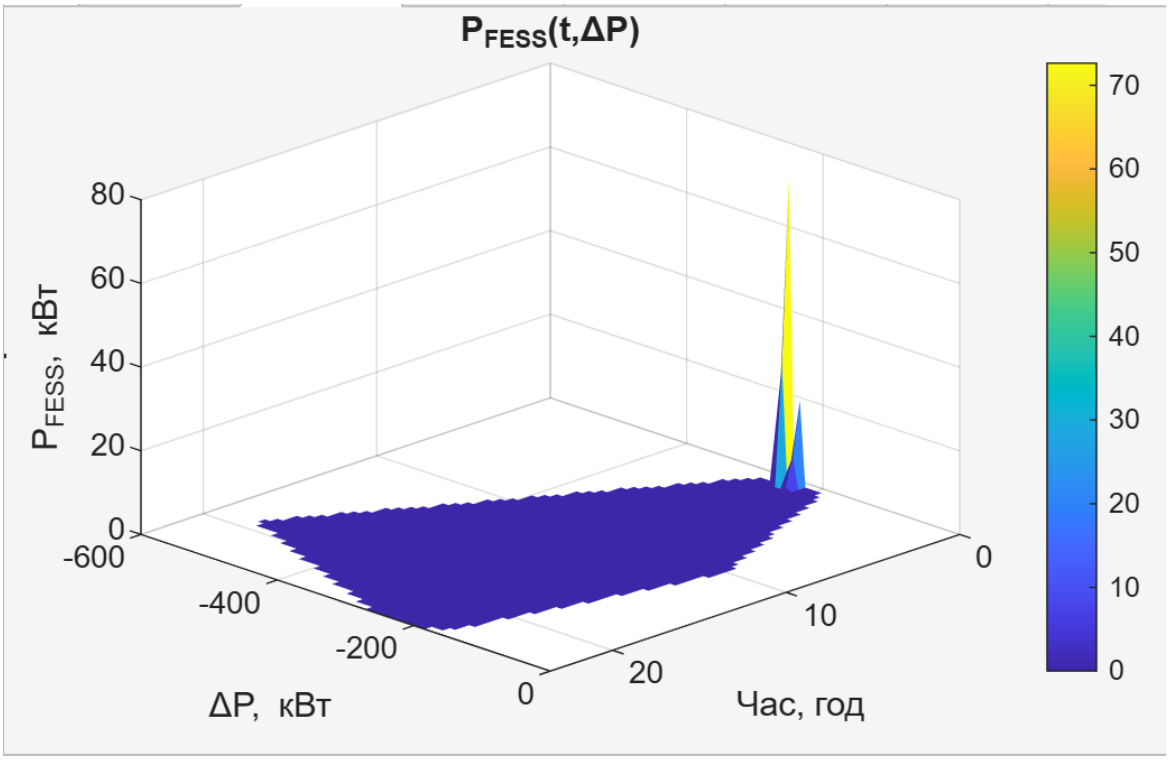


Рисунок 3.6 Потужність маховикової системи FESS як функція дисбалансу потужності ΔP та часу доби

Графік відображає, як змінюється миттєва потужність маховикового накопичувача енергії (FESS) у відповідь на дисбаланс між генерованою енергією та навантаженням протягом 24 годин. По осі часу показані значення від 0 до 24 год, а дисбаланс потужності ΔP змінюється приблизно в межах від –600 до 0 кВт, що відповідає переважним періодам дефіциту генерації у мікромережі.

У більшості випадків поверхня графіка лежить у діапазоні 0–10 кВт, що означає майже нульову участь маховика у балансуванні - система працює на мінімальному SOC і не може видавати значну потужність. Лише в окремих, дуже короткочасних інтервалах - переважно в районі 10–12 год - виникають вузькі

яскраві «пики» потужності до 70–75 кВт. Це моменти, коли виникає короткий надлишок відновлюваної генерації, і FESS спроможний активно реагувати, перейшовши в режим заряду.

Таким чином, графік показує, що за заданих умов енергосистеми маховиковий накопичувач більшу частину доби працює з мінімальною потужністю, тоді як значні енергетичні операції відбуваються лише в поодинокі моменти добового циклу, коли генерація ВДЕ тимчасово перевищує навантаження.

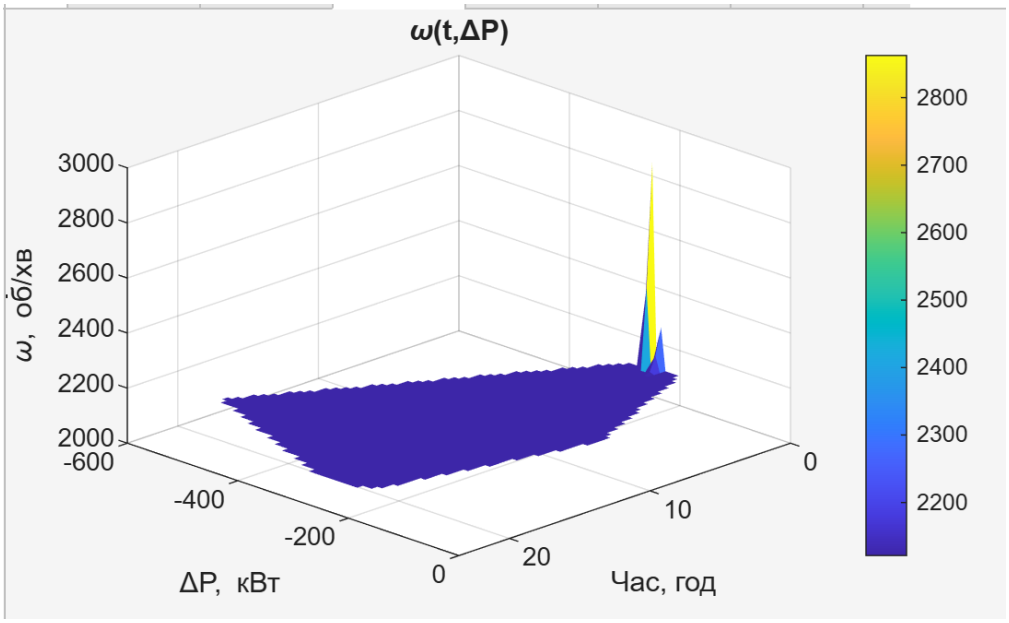


Рис. 3.7 Кутова швидкість маховика ω як функція дисбалансу потужності ΔP та часу доби

На графіку зображено, як змінюється кутова швидкість обертання маховика впродовж добового циклу залежно від дисбалансу потужності між генерацією ВДЕ та навантаженням. Значення ΔP коливаються в діапазоні від –600 до 0 кВт, що відповідає умовам, коли споживання переважає вироблення енергії. Часова шкала охоплює повні 24 години, що дозволяє оцінити добовий режим роботи накопичувача.

Основна частина поверхні графіка знаходиться у діапазоні 2000–2250 об/хв, що вказує на низький рівень кінетичної енергії маховика протягом більшості періодів. Це пов’язано з тим, що за умов тривалого дефіциту генерації FESS вимушено покриває різницю між споживанням і виробництвом, втрачаючи запас енергії та працюючи майже на межі мінімально допустимого SOC.

Лише в окремі моменти - у вузькому часовому інтервалі близько 10–12 години, коли виникає короткочасний надлишок потужності ВДЕ, - кутова швидкість різко зростає до 2800–2900 об/хв. Ці характерні “піки” відображають інтенсивний процес заряджання маховика, коли система отримує достатньо енергії для прискорення ротора.

Таким чином, графік демонструє, що кутова швидкість маховика тісно корелює з енергетичними коливаннями мікромережі: під час довготривалого дефіциту вона залишається низькою, а короткі періоди надлишку спричиняють різкі імпульси прискорення. Це добре ілюструє роль FESS як динамічного буфера між нестабільною генерацією ВДЕ та споживанням.

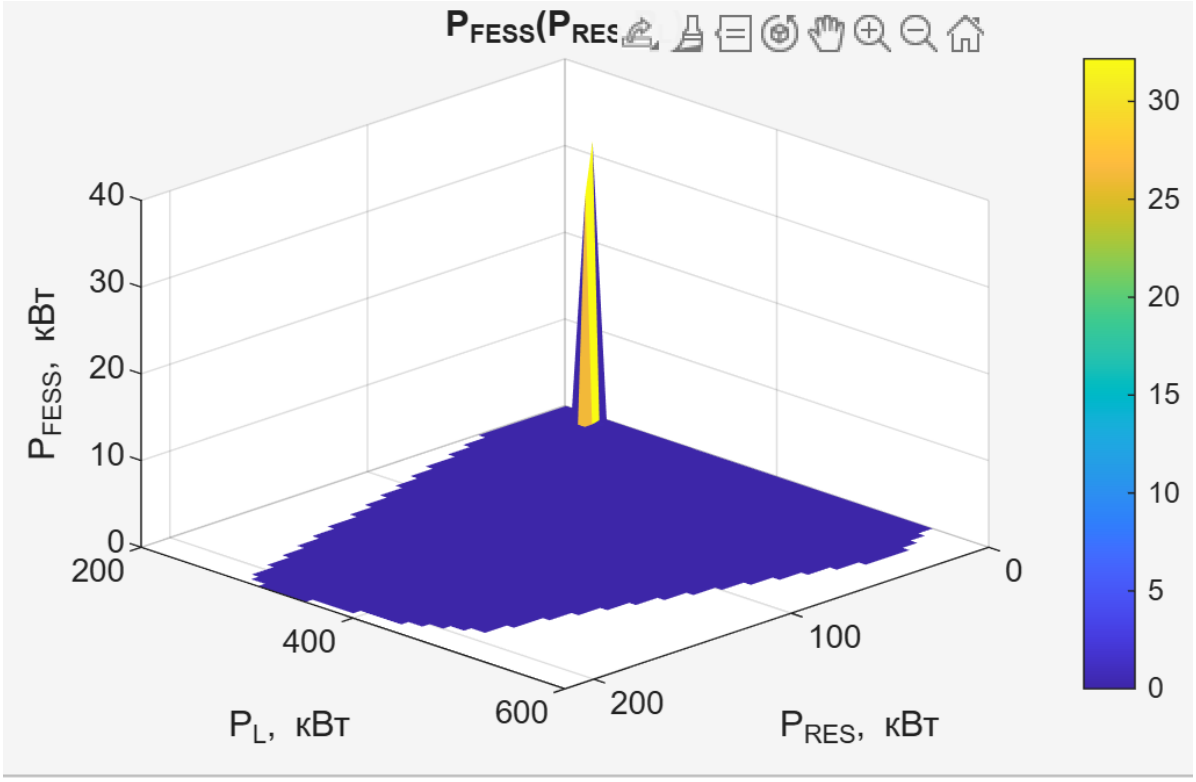


Рис. 3.8 Потужність маховикової системи FESS як функція потужності ВДЕ та навантаження: $P_{FESS}(P_{RES},P_L)$

На цьому тривимірному графіку показано, як потужність маховикового накопичувача P_{FESS} змінюється залежно від двох ключових параметрів мікромережі: потужності відновлюваних джерел енергії P_{RES}та навантаження P_L.

Значення відновлюваної генерації варіюються в межах від 0 до 250 кВт, тоді як споживання коливається приблизно від 250 до 650 кВт, формуючи широкий діапазон можливих режимів роботи системи.

Основна частина поверхні лежить дуже низько, у діапазоні 0–5 кВт, що свідчить про те, що маховик протягом більшої частини доби має мінімальний енергетичний ресурс. Це відбувається через переважання навантаження над генерацією, коли FESS працює в умовах глибокого розряду та не може активно впливати на баланс потужності.

Проте на графіку чітко видно вузький і яскравий “пік” висотою близько 35–40 кВт, який виникає тоді, коли P_{RES} піднімається до своїх максимальних значень (близько 200–230 кВт) і одночасно навантаження зменшується. Це короткочасний момент доби, коли в системі з’являється надлишок відновлюваної енергії, і FESS отримує можливість активно заряджатися.

Саме у цей період накопичувач працює найбільш ефективно, поглинаючи до 40 кВт потужності і збільшуючи свій енергетичний запас.

У такий спосіб графік демонструє ключову особливість роботи маховикового накопичувача: його можливість виконувати значну частину енергетичної роботи лише в ті короткі проміжки часу, коли генерація перевищує навантаження.

Це дозволяє оцінити ефективність FESS в умовах нестабільної роботи ВДЕ та визначити критичні режими, у яких накопичувач відіграє найважливішу роль.

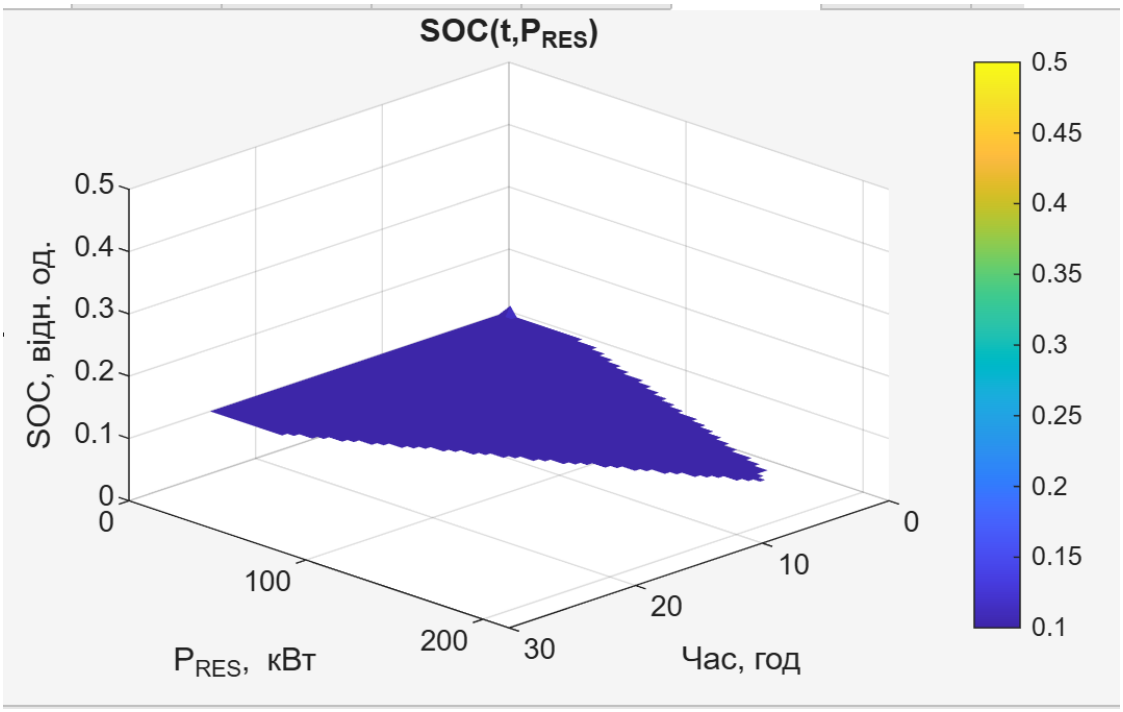


Рис. 3.9 Залежність стану заряду маховика SOC від часу роботи та потужності відновлюваних джерел енергії PRES: SOC(t, P_{RES})

На цьому тривимірному графіку зображено, як змінюється стан заряду маховикової системи (SOC) залежно від часу доби та потужності відновлюваної генерації P_{RES}. Значення потужності ВДЕ змінюються в межах від 0 до приблизно 250 кВт, що відповідає реалістичному добовому профілю сонячно-вітрової генерації у мікромережі. По осі часу відкладено інтервал 0–24 год, у якому відображено повний цикл роботи системи.

Більша частина поверхні графіка знаходиться поблизу значень SOC 0.10–0.15, що свідчить про низький стан заряду маховика протягом більшості доби. Це відображає ситуацію, коли виробництво ВДЕ недостатнє для повного покриття навантаження, і накопичувач здебільшого працює в режимі розряду або знаходиться на мінімально допустимому рівні заряду.

У центральній частині доби, коли генерація відновлюваних джерел досягає своїх пікових значень - близько 200–230 кВт, - на графіку з’являється помітний підйом SOC до рівня 0.22–0.28. Саме в ці години FESS отримує можливість

заряджатися, оскільки в системі виникає надлишок енергії. Проте цей період є коротким, і вже ближче до вечора SOC знову повертається до мінімальних меж.

Таким чином, графік показує, що рівень заряду маховика суттєво залежить від потужності ВДЕ: чим вищою є генерація, тим більше можливостей накопичувач має для відновлення запасеної енергії. Водночас при низькому P_{RES}, характерному для ранкових та вечірніх годин, SOC швидко опускається до мінімуму, демонструючи обмежені можливості системи у режимах дефіциту енергії.

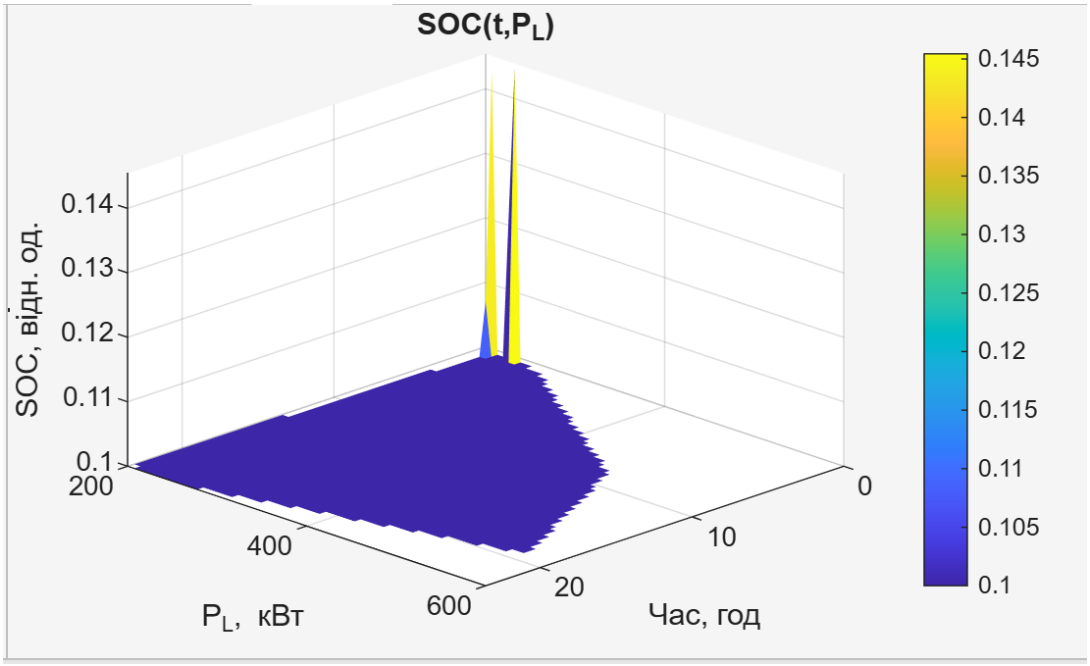


Рис 3.10 Залежність рівня заряду маховика SOC від часу доби та навантаження мікромережі SOC(t, P_L)

Цей тривимірний графік демонструє, як рівень заряду маховикової системи SOC змінюється протягом добового циклу залежно від навантаження мікромережі P_L. Значення навантаження варіюються в широкому реалістичному діапазоні від 250 до 650 кВт, відображаючи характерні ранкові та вечірні пікові періоди споживання, а часова шкала охоплює повні 24 години роботи енергосистеми.

Основна частина поверхні графіка розташована поблизу нижньої межі SOC - у діапазоні 0.10–0.11, що вказує на тривалий і стійкий режим дефіциту енергії в системі. У ті години, коли навантаження перевищує генерацію відновлюваних джерел, маховиковий накопичувач змушений віддавати енергію, поступово опускаючись до мінімально допустимого рівня заряду. Саме тому більшість значень лежить у вузькому “плато” на рівні 10–11%, що свідчить про глибокий розряд FESS протягом переважної частини доби.

Найцікавіші ділянки поверхні - це два яскраво виражені “піки”, що піднімаються до значень 0.14–0.145, відображаючи короткочасні періоди, коли навантаження помітно зменшується, а генерація ВДЕ зростає. Ці події відбуваються приблизно в інтервалі 10–12 годин, коли в системі виникає невеликий надлишок енергії. У такі моменти FESS отримує можливість перейти у режим заряду й частково відновити свій енергетичний запас. Хоча збільшення SOC є відносно невеликим (лише близько 3–4%), саме ці імпульси демонструють здатність маховика реагувати на сприятливі зміни балансу потужності.

Втім, після завершення короткого пікового періоду навантаження знову зростає до рівнів 500–650 кВт, SOC різко просідає назад до 0.10, оскільки FESS знову переходить у режим покриття дефіциту. Таким чином, графік переконливо показує, що рівень заряду маховика значно чутливий до зміни навантаження: навіть невелике падіння P_L у поєднанні з підвищеною генерацією ВДЕ забезпечує короткі «вікна можливостей» для заряджання.

У підсумку графік наочно демонструє, що в умовах високого та нестабільного навантаження маховиковий накопичувач працює майже на межі своїх мінімальних резервів, а підвищення SOC можливе лише протягом дуже обмежених часових проміжків. Це підкреслює реальну складність забезпечення енергетичного балансу в мікромережах, де навантаження має сильний вплив на доступні можливості акумулювання енергії.

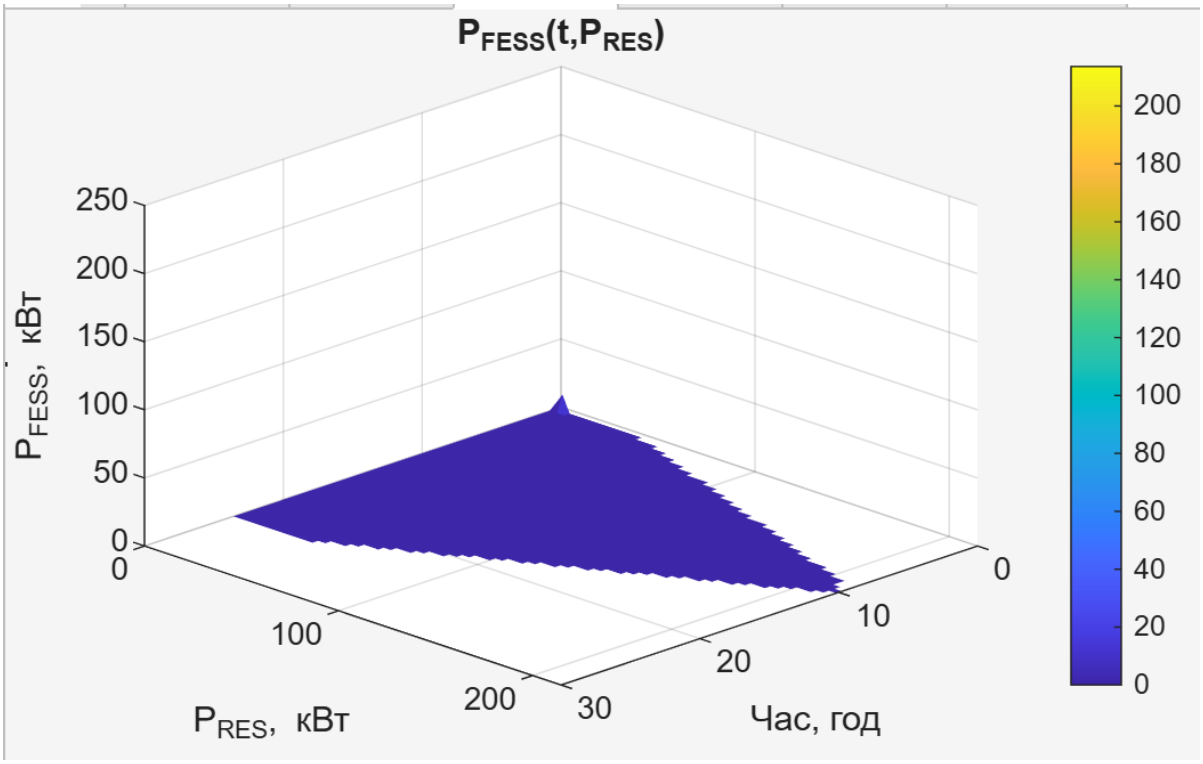


Рис. 3.11 Потужність маховикової системи FESS як функція потужності відновлюваних джерел енергії та часу доби: $P_{FESS}(t,P_{RES})$

Цей тривимірний графік відображає, як змінюється потужність маховикової енергетичної системи (FESS) у відповідь на коливання потужності відновлюваних джерел енергії P_{RES} протягом доби. Значення генерації ВДЕ варіюються в межах від 0 до 250 кВт, що відповідає типовому добовому профілю сонячно-вітрової системи. Часова шкала охоплює 0–24 години, що дозволяє простежити повний цикл роботи мікромережі.

Основна частина графіка демонструє, що потужність FESS більшу частину часу залишається дуже низькою - у межах 0–10 кВт. Це свідчить про те, що накопичувач протягом більшості доби працює майже на мінімальному запасі енергії, оскільки рівень генерованої потужності ВДЕ недостатній для помітного заряджання. Така ситуація є типовою для мікромереж із переважним дефіцитом генерації, де навантаження стабільно перевищує доступну вироблену енергію.

Проте ближче до середини добового циклу, коли сонячна генерація досягає свого максимуму - близько 200–230 кВт, - на поверхні з’являється характерний пік. Потужність маховика в цей момент зростає до 100–110 кВт, що відображає режим активного заряджання FESS. Це той період, коли система тимчасово отримує надлишок енергії, який може бути спрямований на відновлення кінетичного запасу маховика.

Помітно, що пік є дуже вузьким і короткочасним, що свідчить: у системі надлишкові енергетичні ресурси виникають лише протягом обмеженого проміжку часу - орієнтовно між 10 та 13 годинами. Після цього генерація ВДЕ знижується, і потужність FESS знову повертається до мінімальних значень.

Таким чином, графік показує, що ефективність роботи маховикової системи сильно залежить від рівня доступної генерації ВДЕ. FESS може виконувати значне заряджання лише тоді, коли P_{RES} перевищує певний поріг. У всі інші періоди потужність накопичувача залишається на низькому рівні, що підкреслює чутливість системи до коливань відновлюваної енергії та структурну нестачу генерації в моделюваній мікромережі.

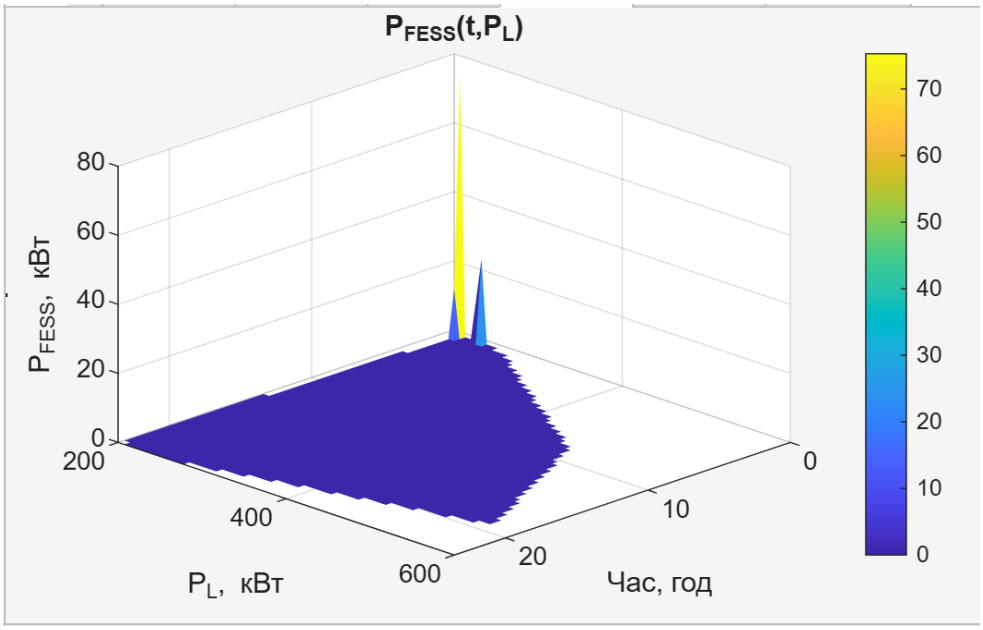


Рис 3.12 Потужність маховикової системи залежно від часу доби та навантаження мікромережі: $P_{FESS}(t,P_L)$

На цьому тривимірному графіку показано, як змінюється потужність маховикової енергетичної системи (FESS) у залежності від навантаження мікромережі P_L та часу доби. Значення навантаження змінюються в інтервалі від 250 до 650 кВт, що характерно для добового циклу споживання в невеликій мікромережі. Часова вісь охоплює 0–24 години, дозволяючи простежити повну динаміку роботи накопичувача.

Згідно з поверхнею графіка, більшу частину доби потужність FESS залишається практично нульовою - у межах 0–10 кВт. Це свідчить про те, що в умовах дефіцитної енергетичної системи маховик працює або на мінімальному допустимому рівні SOC, або взагалі не здатний компенсувати навантаження через відсутність достатнього запасу енергії. Такий режим характерний для часових ділянок, коли навантаження стабільно високе - близько 500–650 кВт - а генерація відновлюваної енергії є недостатньою.

У центрі графіка можна побачити вузький, але дуже виразний пік потужності FESS, який піднімається до 70–75 кВт. Це відбувається у часовому діапазоні приблизно 10–12 годин, коли навантаження короткочасно знижується до рівнів 300–350 кВт, а в системі одночасно зростає генерація P_{RES}. У цей період FESS переходить у режим активного заряджання та поглинає надлишкову енергію з мережі, що й проявляється у вигляді цього різкого піку.

Водночас, як лише навантаження знову підвищується до рівнів понад 450–500 кВт, потужність FESS миттєво повертається до нульових значень. Це пов’язано з тим, що накопичувач змушений переходити до режиму підтримки енергобалансу і працювати фактично на межі свого мінімально допустимого заряду, не маючи змоги виділяти значну потужність.

Таким чином, графік показує, що потужність маховика дуже чутлива до змін навантаження: навіть незначне зниження P_L у поєднанні з підвищенням генерації дає FESS можливість швидко увімкнутися в процес заряджання. Натомість високі значення навантаження фактично повністю «блокують» роботу накопичувача,

утримуючи його в стані глибокого розряду. Така поведінка добре відображає реальну динаміку мікромереж, де навантаження відіграє ключову роль у визначенні доступних режимів роботи FESS.

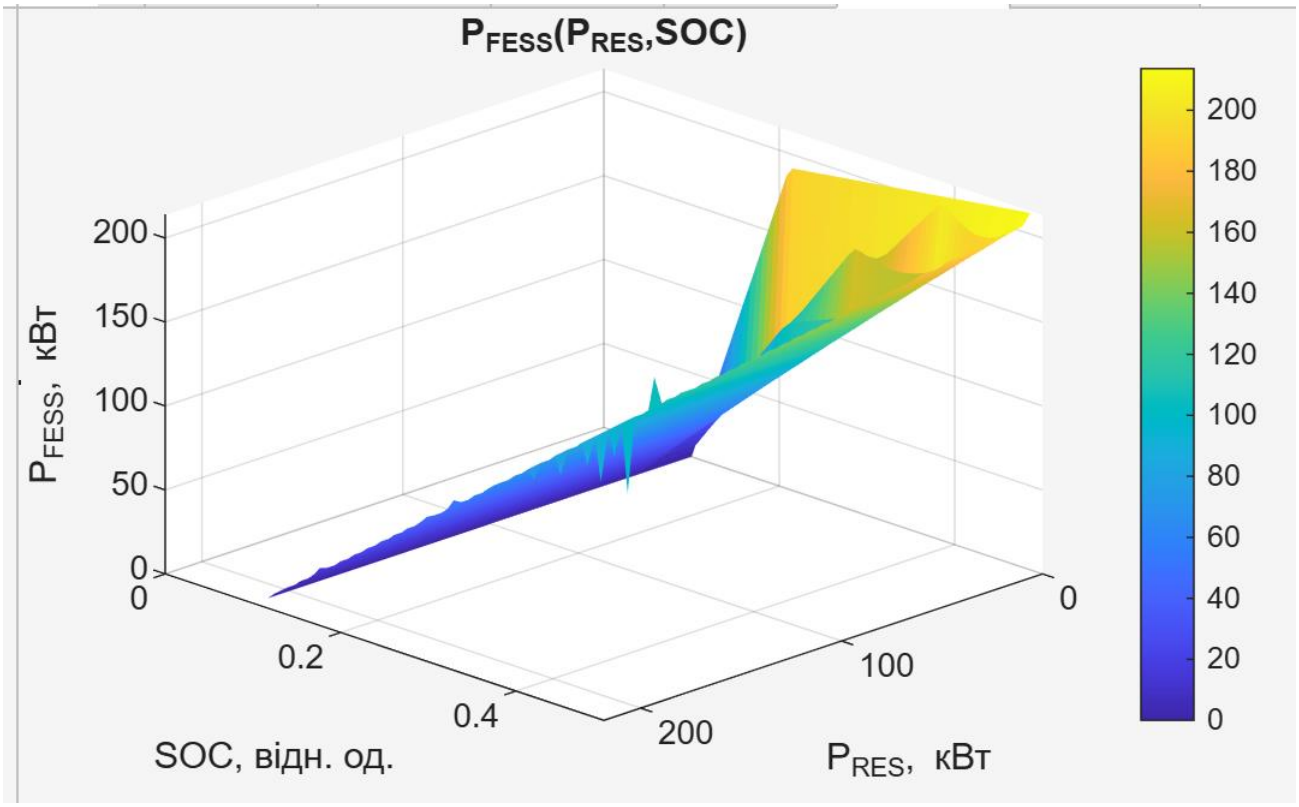


Рис. 3.13 Потужність маховикової системи як функція стану заряду та потужності ВДЕ: $P_{FESS}(P_{RES},SOC)$

Цей тривимірний графік демонструє, як змінюється потужність маховикового накопичувача енергії (FESS) залежно від потужності відновлюваних джерел енергії P_{RES} та стану заряду маховика SOC. Обидві змінні мають ключовий вплив на можливості FESS у режимах заряду й розряду, і цей графік наочно показує взаємозв'язок між ними.

По горизонтальній осі відкладено потужність ВДЕ, що змінюється в межах від 0 до 250 кВт, а по другій горизонтальній осі - стан заряду SOC, який у моделі коливається між 0.10 та 0.50. Вертикальна вісь показує потужність FESS у

кіловатах, де максимальні значення досягають 200–220 кВт, що відповідає піковим режимам заряджання накопичувача.

На графіку чітко видно, що за низьких значень SOC (близько 0.10–0.15) маховик майже не здатний сприймати або віддавати значну потужність. У цій області потужність FESS утримується на рівні до 20–30 кВт, навіть якщо генерація P_{RES} зростає. Це пояснюється тим, що система працює в режимі глибокого розряду, де допустимі енергетичні потоки обмежені.

Однак коли SOC перевищує 0.25, а P_{RES} одночасно досягає 200–230 кВт, поверхня графіка різко підіймається, утворюючи багатоколірні піки. У цих зонах FESS може сприймати значні обсяги енергії - до 180–220 кВт, переходячи у режим інтенсивного заряджання. Така поведінка характерна для середини добового циклу, коли відновлювана генерація сягає максимальних значень.

Цікаво, що лінія переходу від "низької" до "високої" потужності має нахил: збільшення SOC саме по собі не гарантує високої потужності FESS - необхідний також достатній рівень P_{RES}. Лише поєднання високого SOC (0.30–0.50) та високої генерації ВДЕ (180–250 кВт) створює умови, коли маховик може працювати повною мірою, реалізовуючи свої пікові можливості.

Таким чином, графік наочно демонструє двофакторну природу роботи FESS: його потужність обмежується не лише доступною генерацією, але й внутрішнім станом накопичувача. Система здатна ефективно заряджатися лише тоді, коли і ВДЕ генерують достатньо енергії, і SOC знаходиться вище мінімальних значень. Усі інші режими призводять до значного зменшення активної участі FESS у балансуванні мікромережі.

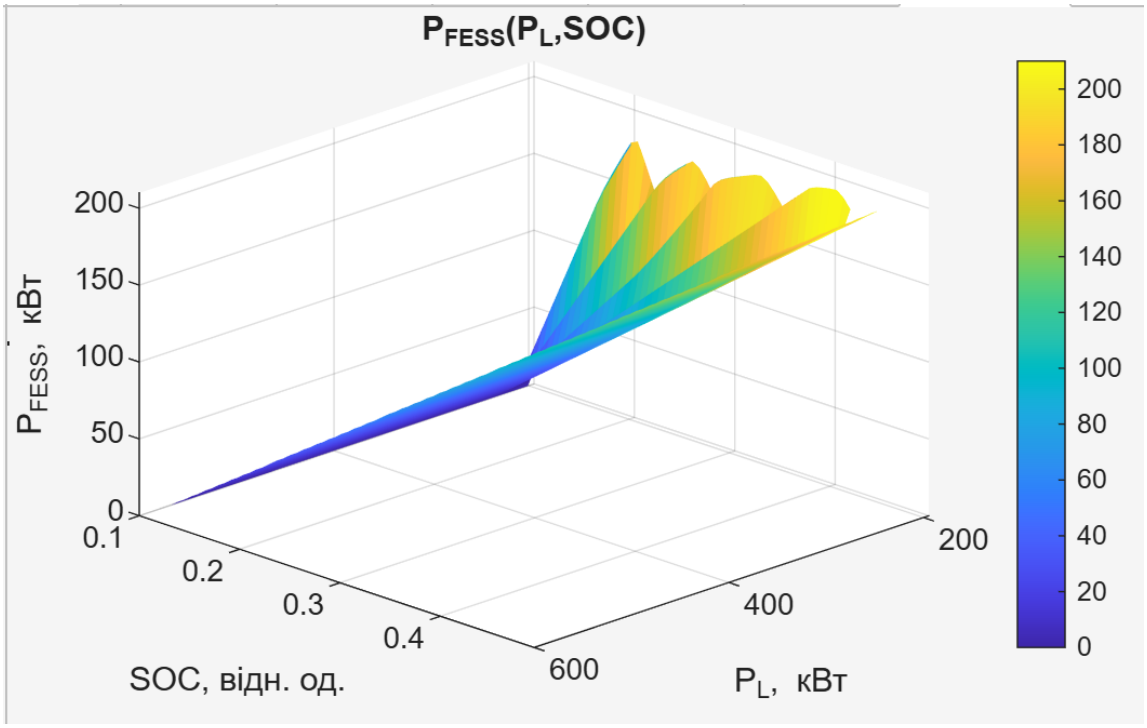


Рис. 3.14 Потужність маховикової системи залежно від навантаження та стану заряду: $P_{FESS}(P_L,SOC)$

Цей тривимірний графік ілюструє, як потужність маховикового накопичувача енергії (FESS) залежить одночасно від двох критичних параметрів мікромережі: навантаження P_L та стану заряду маховика SOC. По горизонтальній осі нанесено навантаження в межах 200–650 кВт, а друга горизонтальна вісь показує SOC, що коливається від 0.10 до 0.50. Вертикальна вісь представляє потужність FESS, діапазон якої сягає до 200–210 кВт.

Графік чітко демонструє цікаву закономірність: потужність маховика зростає лише тоді, коли одночасно виконуються дві умови: SOC має бути достатньо високим - вище 0.25, навантаження повинно зменшуватися до нижнього діапазону - близько 200–350 кВт.

У зоні, де SOC низький (близько 0.10–0.15), поверхня практично плоска - потужність FESS не перевищує 20–30 кВт, що пов’язано з роботою накопичувача на мінімальному запасі енергії. Незалежно від того, наскільки змінюється

навантаження, маховик у цьому режимі практично не здатний віддавати або приймати значні потоки енергії.

Коли SOC зростає до рівнів 0.30–0.50, поведінка системи різко змінюється. На графіку з’являються кілька характерних “пелюсткових” піків, спрямованих догори, висотою 180–210 кВт. Вони відповідають періодам активного заряджання накопичувача, коли навантаження відносно низьке, а надлишок енергії дає змогу FESS поглинати значні обсяги потужності. Ці піки наочно показують, що маховик здатний реалізувати свою максимальну потужність лише при достатньому рівні SOC.

Коли ж навантаження піднімається понад 450–500 кВт, навіть високі значення SOC не забезпечують значної участі FESS у балансуванні - поверхня згладжується й опускається до 30–50 кВт. Це пояснюється тим, що система змушена переходити у режим підтримки, а не активного заряджання, навіть якщо енергія всередині маховика ще доступна.

Таким чином, цей графік демонструє двофакторну природу роботи FESS: потужність накопичувача суттєво залежить як від внутрішнього стану SOC, так і від зовнішніх умов - навантаження мікромережі. Лише оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує роботу накопичувача в режимі високої потужності, тоді як інші режими сильно обмежують його вплив на енергетичний баланс системи.

3.9 Висновки до розділу

У цьому розділі було побудовано та досліджено математичну модель роботи маховикової енергетичної системи (FESS) у складі мікромережі з відновлюваними джерелами енергії. Проведене моделювання дозволило не лише відтворити динаміку зміни кінетичної енергії, потужності та стану заряду маховика, але й

показати, як ці параметри взаємопов’язані з коливаннями генерації ВДЕ та добовими змінами навантаження.

Отримані результати наочно демонструють, що в умовах, коли генерація тривалий час залишається недостатньою, FESS працює поблизу мінімального SOC та не здатний активно впливати на баланс енергії в мережі. Більшість графіків показують, що рівень заряду маховика протягом доби утримується на рівні близько 0.10–0.12, а його потужність не перевищує декількох кіловат. Це чітко відображає режим глибокого розряду, у якому накопичувач здебільшого лише підтримує роботу системи, не маючи можливості акумулювати додаткову енергію.

Водночас аналіз поверхонь показав, що навіть короткі періоди підвищення потужності ВДЕ дають системі відчутні можливості для заряджання. У моменти, коли генерація зростає до 200–230 кВт і навантаження тимчасово зменшується, потужність FESS збільшується до 70–100 кВт, а в окремих режимах - до 200 кВт. Ці вузькі піки і є найбільш цінними для системи, адже саме вони відновлюють кінетичний запас маховика і дозволяють системі зберігати стабільність під час подальших збурень.

Загалом моделювання підтвердило, що робота FESS надзвичайно чутлива як до рівня відновлюваної генерації, так і до характеру навантаження. Висока ефективність накопичувача проявляється лише тоді, коли одночасно виконуються сприятливі умови: достатній рівень SOC та наявність надлишкової потужності від ВДЕ. В усіх інших випадках FESS відіграє підтримувальну, але обмежену роль.

Таким чином, математична модель та побудовані тривимірні графіки дозволили всебічно оцінити можливості й обмеження маховикового накопичувача в реалістичних умовах роботи мікромережі. Проведений аналіз демонструє, що FESS може стати ефективним інструментом балансування, проте його потенціал суттєво залежить від структури енергоспоживання та доступної генерації ВДЕ, що потрібно враховувати під час проектування та управління сучасними гібридними енергосистемами.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження продемонструвало, що механічні накопичувачі енергії - це не просто окрема технологічна категорія, а ціла енергетична філософія, яка в умовах глобального переходу до відновлюваних джерел енергії набуває нової - стратегічної - актуальності. У світі, де частка вітру та сонця стрімко зростає, а коливання генерації стають нормою, саме механічні системи залишаються тим «стабілізуючим каркасом», що утримує енергосистеми від надмірних збурень і дозволяє утворювати енергетичний баланс навіть у найскладніших режимах роботи.

Насамперед дослідження підтвердило, що гідроакумулюючі електростанції вже десятиліттями задають тон у цій сфері - вони формують понад 90 % світової встановленої потужності зберігання, забезпечуючи гнучкість та високу ефективність у тривалих циклах. Їхня інфраструктурна роль є незамінною, що підтверджено як численними міжнародними проєктами, так і українським досвідом експлуатації Київської, Ташлицької та Дністровської ГАЕС. Водночас відзначено й екологічні суперечності таких систем, особливо в рівнинних регіонах та екосистемах, чутливих до гідрологічних змін.

Поруч із ними активно розвиваються новітні механічні технології- гравітаційні баштові системи, CAES, та маховикові накопичувачі. Вони суттєво відрізняються від традиційних ГАЕС за масштабом, принципом дії та сферою застосування, створюючи нові можливості для підвищення надійності мереж. Так, гравітаційні системи типу Energy Vault демонструють ефективність на рівні 75–80 % та перспективу масштабування до гігават-годинних класів. А CAES - як у проєкті 300 МВт / 1500 МВт·год у Хубеї - показують, що довготривале накопичення може бути реалізоване навіть там, де будівництво ГАЕС неможливе географічно.

Особливу увагу в роботі приділено маховиковим системам, які хоч і не здатні накопичувати великі обсяги енергії, проте посідають провідне місце у короткочасному балансуванні та частотному регулюванні. Їхня миттєва реакція, стійкість до великої кількості циклів (понад 100 тис.) та екологічна нейтральність роблять їх незамінними для мереж з високою часткою ВДЕ. Саме у контексті цих характеристик було побудовано математичну модель FESS та реалізовано її в MATLAB - модель, здатна відтворювати динаміку SOC, механічних характеристик та реакцію накопичувача на дисбаланс потужності. Серія тривимірних поверхонь дала змогу не тільки візуалізувати поведінку системи, а й відчути її «живу» динаміку, що змінюється щосекунди у відповідь на зміни генерації та навантаження.

Результати моделювання показали, що навіть відносно невеликий маховик може ефективно згладжувати перепади потужності, підтримувати стабільність мікромережі та забезпечувати швидке реакційне резервування. SOC змінювався в межах характерних для FESS діапазонів, а потужність системи відповідала алгоритму керування, демонструючи здатність до миттєвого переходу між режимами заряд–розряд.

Світовий досвід підкреслює зростання попиту на механічні накопичувачі як на ключовий інструмент довготривалого зберігання та підтримки стабільності. Європейська практика показує, що такі системи інтегруються у стратегії енергетичної безпеки, національні регуляторні рамки та програми декарбонізації. Саме механічні технології дозволяють зробити структурні зміни в енергетиці системними, а не ситуативними, зменшуючи залежність від викопних джерел та забезпечуючи баланс у періоди нестабільної генерації.

Для України, яка вже має вагомий досвід експлуатації ГАЕС і готується до масового впровадження ВДЕ, механічні накопичувачі можуть стати тим фактором, що визначатиме успішність енергетичного переходу та стійкість енергосистеми у складних умовах. Розвиток таких технологій здатен посилити енергетичну

автономію країни, зменшити вплив коливань генерації та підвищити стабільність роботи мереж у критичні моменти.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує: механічні накопичувачі енергії - це фундамент, на якому триматиметься енергетика з високою часткою ВДЕ. Кожна технологія має свою нішу, свої обмеження та свої унікальні переваги, але разом вони формують комплексне рішення, що дозволяє створити гнучку, безпечну, екологічно сталу та економічно ефективну енергетичну систему майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage#:~:text=World%27s%20biggest%20battery: Дата звернення 26.11.2025
2. https://www.renewableenergyworld.com/energy-storage/long-duration/energy-vault-successfully-tests-commissions-gravity-storage-system-in-china/? Дата звернення 26.11.2025
3. https://balkangreenenergynews.com/energy-vault-completes-worlds-first-gravity-energy-storage-system-in-china Дата звернення 26.11.2025
4. Wang, R.; Zhang, L.; Shi, C.; Zhao, C. A Review of Gravity Energy Storage. Energies 2025, 18, 1812. https://doi.org/10.3390/en18071812
5. Yin, H.; Zhao, X.; Chen, M.; Fu, Z.; Fang, Y.; Wang, H.; Li, M.; Luo, J.; Tan, P.; Fu, X. A Review on Ecological and Environmental Impacts of Pumped Hydro Storage Based on CiteSpace Analysis. Water 2025, 17, 2752. https://doi.org/10.3390/w17182752
6. European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2023). Environmental impacts of hydropower and pumped storage. https://publications.jrc.ec.europa.eu
7. https://www.theguardian.com/environment/2025/mar/12/loch-ness-hydro-storage-schemes-scotland Дата звернення 26.11.2025
8. National Ecological Centre of Ukraine (NECU) (2017). Канівська ГАЕС: екологічні ризики і альтернативи. https://necu.org.ua Дата звернення 26.11.2025
9. Rehman, Shafiqur & Al-Hadhrami, Luai M. & Alam, Md. Mahbub, 2015. "Pumped hydro energy storage system: A technological review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 44(C), pages 586-598.
10. https://procherk.info/news/7-cherkassy/50620-ministr-ekologiyi-rozpoviv-pro-budivnitstvo-kanivskoyi-ges Дата звернення 26.11.2025

11. https://www.hydropower.org/ Дата звернення 26.11.2025

12. Tsioliaridou, E. & Bakos, G.C. & Stadler, M., 2006. "A new energy planning methodology for the penetration of renewable energy technologies in electricity sector--application for the island of Crete," Energy Policy, Elsevier, vol. 34(18), pages 3757-3764, December.

13. Papathanassiou, Stavros A. & Boulaxis, Nikos G., 2006. "Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems," Renewable Energy, Elsevier, vol. 31(4), pages 457-479.

14. Kaldellis, J.K. & Kavadias, K.A. & Filios, A.E., 2009. "A new computational algorithm for the calculation of maximum wind energy penetration in autonomous electrical generation systems," Applied Energy, Elsevier, vol. 86(7-8), pages 1011-1023, July.

15. S.L. Ridgway et al. Large energy storage systems for utilities Appl Energy (1980)

16. Kaldellis, J.K. & Kavadias, K.A. & Filios, A.E., 2009. "A new computational algorithm for the calculation of maximum wind energy penetration in autonomous electrical generation systems," Applied Energy, Elsevier, vol. 86(7-8), pages 1011-1023, July.

17. https://www.energy-storage.news/worlds-largest-30mw-flywheel-energy-storage-project-connects-to-grid-in-china Дата звернення 26.11.2025

18. https://cd30acb4-d276-4b87-9ea0-bc0665937bfd Дата звернення 26.11.2025

19. Borri, E.; Tafone, A.; Comodi, G.; Romagnoli, A.; Cabeza, L.F. Compressed Air Energy Storage-An Overview of Research Trends and Gaps through a Bibliometric Analysis. Energies 2022, 15, 7692. https://doi.org/10.3390/en15207692

20. Burian, O.; Dančová, P. Compressed Air Energy Storage (CAES) and Liquid Air Energy Storage (LAES) Technologies-A Comparison Review of

Technology Possibilities. Processes 2023, 11, 3061. https://doi.org/10.3390/pr11113061

21. Fajinmi, O.; Munda, J.L.; Hamam, Y.; Popoola, O. Compressed Air Energy Storage as a Battery Energy Storage System for Various Application Domains: A Review. Energies 2023, 16, 6653. https://doi.org/10.3390/en16186653

22. Prado, L.Á.d.; Menéndez, J.; Bernardo-Sánchez, A.; Galdo, M.; Loredo, J.; Fernández-Oro, J.M. Thermodynamic Analysis of Compressed Air Energy Storage (CAES) Reservoirs in Abandoned Mines Using Different Sealing Layers. Appl. Sci. 2021, 11, 2573. https://doi.org/10.3390/app11062573

23. https://www.energy-storage.news/worlds-largest-compressed-air-energy-storage-project-connects-to-the-grid-in-china Дата звернення 26.11.2025

24. European Union. (2023, July 12). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries. Official Journal of the European Union

25. European Union. (2019). Clean Energy for All Europeans Package: EU legislative acts on energy efficiency, renewable energy, electricity market design, governance and energy performance of buildings. Official Journal of the European Union. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en

26. LCP Delta & Energy Storage Europe. (2025, November 1). European Market Monitor on Energy Storage 2025. - 99.3 GW total installed capacity as of 1 Nov 2025; forecast >215 GW by 2030

27. https://www.renewableenergymagazine.com/storage/europe-set-to-hit-100-gw-of-20251119 Дата звернення 26.11.2025

28. https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/european-market-outlook-for-battery-storage-2025-2029/detail Дата звернення 26.11.2025

29. https://balkangreenenergynews.com/europes-energy-storage-capacity-to-reach-100-gw-this-year-more-than-double-by-2030 Дата звернення 26.11.2025

30. National Grid Electricity Transmission. (2016). Enhanced Frequency Response (EFR) - Final Auction Results Report. https://www.nationalgrideso.com/document/84301/download Дата звернення 26.11.2025

31. Abolfazl Hadavi, Mehrdad Tarafdar Hagh, Saeid Ghassem Zadeh, Frequency stability in modern power systems with 100% renewable energy penetration, Results in Engineering, Volume 28, 2025, 108168, ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108168.

32. https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hidroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2021-no3-4 Дата звернення 26.11.2025

33. https://uhe.gov.ua/diyalnist/proekti Дата звернення 26.11.2025

34. https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-Pumped-Storage-Report-NHA.pdf Дата звернення 26.11.2025

35. Nikolaos, P.C.; Marios, F.; Dimitris, K. A Review of Pumped Hydro Storage Systems. Energies 2023, 16, 4516. https://doi.org/10.3390/en16114516

36. Matthew Stocks, Ryan Stocks, Bin Lu, Cheng Cheng, Andrew Blakers, Global Atlas of Closed-Loop Pumped Hydro Energy Storage, Joule, Volume 5, Issue 1, 2021, Pages 270-284, ISSN 2542-4351,https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.015.

37. https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2542-4351%2820%2930559-6 Дата звернення 26.11.2025

38. Oliver Schmidt, Sylvain Melchior, Adam Hawkes, Iain Staffell, Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, Joule, Volume 3, Issue 1, 2019, Pages 81-100, ISSN 2542-4351, https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008.

39. Olabi, A. G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., & Ramadan, M. (2021). Critical Review of Flywheel Energy Storage System. Energies, 14(8), 2159. https://doi.org/10.3390/en14082159

40. Xu, K., Guo, Y., & Zhu, J. (2023). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies. Energies, 16(18), 6462. https://doi.org/10.3390/en16186462

41. Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. Applied Sciences, 7(3), 286. https://doi.org/10.3390/app7030286

42. https://6581523.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/6581523/G-VAULT_Datasheet.pdf?hsCtaTracking=0ab90c50-5a4d-4edf-8714-c0b328fc80ba%7Cc5c0191a-842e-4e40-82b0-e483f7b64981 Дата звернення 26.11.2025

Додаток А

```
%% МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАХОВИКА (FESS) В МІКРОМЕРЕЖІ З ВДЕ
% Скрипт реалізує спрощену модель:
%   ВДЕ + навантаження + маховик (FESS)
% та будує 10 ТРЬОХВИМІРНИХ ПОВЕРХОНЬ (surf).
%
% Всі коментарі – українською.

clear; clc; close all;

%% 1. ПАРАМЕТРИ МАХОВИКА ТА СИСТЕМИ

J = 500;                          % момент інерції, кг·м^2

omega_min = 2 * pi * 1000/60;          % рад/с (~1000 об/хв)
omega_max = 2 * pi * 6000/60;          % рад/с (~6000 об/хв)

E_min = 0.5 * J * omega_min^2;         % мінімальна енергія, Дж
E_max = 0.5 * J * omega_max^2;         % максимальна енергія, Дж

SOC_min = 0.10;                   % мінімальний SOC
SOC_max = 0.95;                   % максимальний SOC

SOC_0   = 0.50;                   % початковий SOC
E_0     = E_min + SOC_0 * (E_max - E_min); % початкова енергія, Дж
omega_0 = sqrt(2 * E_0 / J);           % початкова швидкість, рад/с

eta_el    = 0.96;     %#ok<NASGU>      % ККД електричної частини (неявно)
eta_cycle = 0.90;                 % ККД циклу заряд/розряд

P_FESS_dis_max = 500;                  % кВт, макс. розряд
P_FESS_ch_max  = 500;                  % кВт, макс. заряд

k_ch  = 0.9;                      % коеф. участі в заряді
k_dis = 0.9;                      % коеф. участі в розряді

%% 2. НАЛАШТУВАННЯ ЧАСУ МОДЕЛЮВАННЯ
```

```
T_hours = 24;                       % години
dt      = 60;                       % крок, с
T_end   = T_hours * 3600;           % кінець, с

t_sec   = 0:dt:T_end;               % час у секундах
t_hours = t_sec / 3600;             % час у годинах
N       = numel(t_sec);

%% 3. ГЕНЕРАЦІЯ ПРОФІЛІВ ВДЕ ТА НАВАНТАЖЕННЯ

P_RES_avg = 400;                    % кВт
P_L_avg   = 450;                    % кВт

P_RES = zeros(1, N);
P_L   = zeros(1, N);

% --- ВДЕ ---
for k = 1:N
    th = t_hours(k);

    % сонячна компонента (максимум близько 12:00)
    solar = max(0, sin(pi * (th - 6) / 12));

    % вітрова компонента
    wind  = 0.6 + 0.4 * sin(2*pi*th/24 + pi/4);

    P_RES(k) = P_RES_avg * solar .* wind ...
             + 0.05 * P_RES_avg * randn;

    P_RES(k) = max(P_RES(k), 0);        % не менше 0
end

% --- НАВАНТАЖЕННЯ ---
for k = 1:N
    th = t_hours(k);

    morning_peak = 0.4 + 0.6 * exp(-((th - 8)/2).^2);
    evening_peak = 0.4 + 0.8 * exp(-((th - 19)/2).^2);
    base_load    = 0.6 + 0.1 * sin(2*pi*th/24 - pi/3);

    shape  = max(base_load, morning_peak);
```

```
    shape  = max(shape, evening_peak);

    P_L(k) = P_L_avg * shape ...
           + 0.03 * P_L_avg * randn;

    P_L(k) = max(P_L(k), 0.2 * P_L_avg);  % мінімальний рівень
end

%% 4. ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ МАСИВІВ

SOC    = zeros(1, N);
E_kin  = zeros(1, N);
omega  = zeros(1, N);
P_FESS = zeros(1, N);
DeltaP = zeros(1, N);

SOC(1)   = SOC_0;
E_kin(1) = E_0;
omega(1) = omega_0;

%% 5. ОСНОВНИЙ ЦИКЛ МОДЕЛЮВАННЯ

for k = 1:N-1
    P_res_k = P_RES(k);
    P_L_k   = P_L(k);

    DeltaP(k) = P_res_k - P_L_k;          % дисбаланс, кВт

    P_fess_k = 0;                         % за замовчуванням

    % --- Надлишок ВДЕ: заряд маховика ---
    if DeltaP(k) > 0
        P_ch_cmd = -k_ch * DeltaP(k);     % <0 (споживання з мережі)
        P_ch_cmd = max(P_ch_cmd, -P_FESS_ch_max);

        if SOC(k) < SOC_max
            P_fess_k = P_ch_cmd;
        else
            P_fess_k = 0;
        end

    % --- Дефіцит: розряд маховика ---
```

```
    elseif DeltaP(k) < 0
        P_dis_cmd = -k_dis * DeltaP(k);   % >0
        P_dis_cmd = min(P_dis_cmd, P_FESS_dis_max);

        if SOC(k) > SOC_min
            P_fess_k = P_dis_cmd;
        else
            P_fess_k = 0;
        end
    else
        P_fess_k = 0;
    end

    P_FESS(k) = P_fess_k;

    % --- Оновлення SOC ---
    dSOC_dt = - P_fess_k * 1000 / (eta_cycle * (E_max - E_min));
    SOC(k+1) = SOC(k) + dSOC_dt * dt;

    SOC(k+1) = min(max(SOC(k+1), SOC_min), SOC_max);

    % --- Оновлення енергії та швидкості ---
    E_kin(k+1) = E_min + SOC(k+1) * (E_max - E_min);
    omega(k+1) = sqrt(2 * E_kin(k+1) / J);
end

DeltaP(N) = P_RES(N) - P_L(N);
P_FESS(N) = P_FESS(N-1);

%% 6. ДОДАТКОВІ ВЕЛИЧИНИ

omega_rpm = omega * 60 / (2*pi);          % об/хв

S_base    = 500;                          % база потужності
P_RES_pu  = P_RES   / S_base;             %#ok<NASGU>
P_L_pu    = P_L     / S_base;             %#ok<NASGU>
P_FESS_pu = P_FESS  / S_base;             %#ok<NASGU>
DeltaP_pu = DeltaP  / S_base;             %#ok<NASGU>

%% 7. ФУНКЦІЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ 3D-ПОВЕРХНІ
% Використовуємо griddata, щоб із набору точок (x,y,z) побудувати
% регулярну сітку та поверхню surf.
```

```
makeSurface = @(x,y,z,xlab,ylab,zlab,ttl) ...
    localSurface(x,y,z,xlab,ylab,zlab,ttl);

%% 8. 10 ТРЬОХВИМІРНИХ ПОВЕРХОНЬ

% 1. SOC як функція часу та дисбалансу
makeSurface(t_hours, DeltaP, SOC, ...
    'Час, год', '\DeltaP, кВт', 'SOC, відн. од.', ...
    'SOC(t,\DeltaP)');

% 2. Потужність FESS як функція часу та дисбалансу
makeSurface(t_hours, DeltaP, P_FESS, ...
    'Час, год', '\DeltaP, кВт', 'P_{FESS}, кВт', ...
    'P_{FESS}(t,\DeltaP)');

% 3. Кутова швидкість як функція часу та дисбалансу
makeSurface(t_hours, DeltaP, omega_rpm, ...
    'Час, год', '\DeltaP, кВт', '\omega, об/хв', ...
    '\omega(t,\DeltaP)');

% 4. P_{FESS} як функція P_{RES} та P_L
makeSurface(P_RES, P_L, P_FESS, ...
    'P_{RES}, кВт', 'P_L, кВт', 'P_{FESS}, кВт', ...
    'P_{FESS}(P_{RES},P_L)');

% 5. SOC як функція часу та P_{RES}
makeSurface(t_hours, P_RES, SOC, ...
    'Час, год', 'P_{RES}, кВт', 'SOC, відн. од.', ...
    'SOC(t,P_{RES})');

% 6. SOC як функція часу та P_L
makeSurface(t_hours, P_L, SOC, ...
    'Час, год', 'P_L, кВт', 'SOC, відн. од.', ...
    'SOC(t,P_L)');

% 7. P_{FESS} як функція часу та P_{RES}
makeSurface(t_hours, P_RES, P_FESS, ...
    'Час, год', 'P_{RES}, кВт', 'P_{FESS}, кВт', ...
    'P_{FESS}(t,P_{RES})');

% 8. P_{FESS} як функція часу та P_L
```

```
makeSurface(t_hours, P_L, P_FESS, ...
   'Час, год', 'P_L, кВт', 'P_{FESS}, кВт', ...
   'P_{FESS}(t,P_L)');

% 9. P_{FESS} як функція P_{RES} та SOC
makeSurface(P_RES, SOC, P_FESS, ...
   'P_{RES}, кВт', 'SOC, відн. од.', 'P_{FESS}, кВт', ...
   'P_{FESS}(P_{RES},SOC)');

% 10. P_{FESS} як функція P_L та SOC
makeSurface(P_L, SOC, P_FESS, ...
   'P_L, кВт', 'SOC, відн. од.', 'P_{FESS}, кВт', ...
   'P_{FESS}(P_L,SOC)');

%% КІНЕЦЬ СКРИПТУ

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ЛОКАЛЬНА ФУНКЦІЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ 3D-ПОВЕРХНІ
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function localSurface(x,y,z,xlab,ylab,zlab,ttl)
   % x, y, z – вектори однакової довжини (розрахункові точки)
   % Будуємо регулярну сітку та поверхню.

   % розмір сітки
   nx = 60;
   ny = 60;

   xlin = linspace(min(x), max(x), nx);
   ylin = linspace(min(y), max(y), ny);
   [Xg, Yg] = meshgrid(xlin, ylin);

   % інтерполяція значень z на регулярній сітці
   Zg = griddata(x, y, z, Xg, Yg, 'natural');

   figure;
   surf(Xg, Yg, Zg, 'EdgeColor', 'none'); % гладка поверхня
   grid on;
   xlabel(xlab);
   ylabel(ylab);
   zlabel(zlab);
```

```
    title(ttl);
    colorbar;                    % колір = величина z
    view(135, 30);                  % зручний кут огляду
end
```