

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“___” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Оцінювання ефективності роботи
електроенергетичних систем з ВДЕ шляхом
використання технології CAES для акумулювання
електроенергії”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Ростислав ЧОРНОЩОКОВ
«___» _____2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
«___» _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛІШКОВ.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Чорнощоківу Ростиславу Костянтинівичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оцінювання ефективності роботи

електроенергетичних систем з ВДЕ шляхом використання технології CAES
для акумулювання електроенергії

Evaluation of the efficiency of electricity systems with RES by using CAES
technology for electricity storage

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук, доц.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
проведення оцінки технічних та енергетичних показників ефективності
застосування систем акумулювання електричної енергії відновлюваних
джерел енергії у вигляді стиснутого повітря. Завдання роботи: виконати
огляд можливості використання для акумулювання енергії виробленої
відновлюваними джерелами енергії систем на базі використання стиснутого
повітря; розглянути технологічні аспекти побудови систем накопичення
енергії стисненого повітря; обрати математичний апарат для опису
процесів перетворення енергії в системі з акумулювання енергії стисненим
повітрям та вирішення відповідних рівнянь; виконати моделювання
динамічних процесів роботи елементів системи генерації електричної
енергії; розробити заходи із охорони праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>11.10.2024 р.</i>	
<i>2</i>	<i>Огляд можливості використання для акумулювання енергії виробленої відновлюваними джерелами енергії систем на базі використання стиснутого повітря</i>	<i>18.10.2024 р.</i>	
<i>3</i>	<i>Технологічні аспекти побудови систем накопичення енергії стисненого повітря</i>	<i>29.10.2024 р.</i>	
<i>4</i>	<i>Вибір математичного апарату для опису процесів перетворення енергії в системі з акумулювання енергії стисненим повітрям та вирішення відповідних рівнянь</i>	<i>08.11.2024 р.</i>	
<i>5</i>	<i>Моделювання динамічних процесів роботи елементів системи генерації електричної енергії</i>	<i>15.11.2024 р.</i>	
<i>6</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>22.11.2024 р.</i>	
<i>7</i>	<i>Загальні висновки</i>	<i>25.11.2024 р.</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>27.11.2024 р.</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11.2024 р.</i>	

Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання: « ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Ростислав ЧОРНОЩОКОВ

АНОТАЦІЯ

Чорнощоків Р.К. Оцінювання ефективності роботи електроенергетичних систем з ВДЕ шляхом використання технології CAES для акумулювання електроенергії.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024р.

Метою роботи є проведення оцінки технічних та енергетичних показників ефективності застосування систем акумулювання електричної енергії відновлюваних джерел енергії у вигляді стиснутого повітря.

Наукова робота присвячена актуальній проблемі акумулювання електричної енергії в електроенергетичних системах з використанням відновлюваних джерел енергії.

В дослідженні показано, що технологія акумулювання електричної енергії за рахунок використання стисненого повітря для енергетичних комплексів з відновлюваними джерелами енергії залишається перспективною. Такі установки дозволяють утилізувати надлишок електроенергії під час мінімального споживання, перетворюючи її в енергію стисненого атмосферного газу, що зберігається в спеціальних ємностях під високим тиском для подальшої генерації електричної енергії.

Запропоновано конфігурацію системи накопичення енергії, основними елементами якої є малогабаритний резервуар для зберігання стисненого повітря та мікротурбіна. Проведено оцінку технічних та енергетичних показників для системи при зміні конструктивних та робочих параметрів системи акумулювання.

Ключові слова: акумулювання електричної енергії, відновлювані джерела енергії, система акумулювання стисненим повітрям

THE SUMMARY

Chornoshchokov R. Evaluation of the efficiency of electricity systems with RES by using CAES technology for electricity storage

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024

The purpose of the work is to assess the technical and energy performance indicators of the use of electrical energy storage systems from renewable energy sources in the form of compressed air.

The scientific work is devoted to the current problem of electrical energy accumulation in power systems using renewable energy sources.

The study shows that the technology of accumulating electrical energy through the use of compressed air for energy complexes with renewable energy sources remains promising. Such installations allow to utilize excess electricity during minimum consumption, converting it into the energy of compressed atmospheric gas, which is stored in special tanks under high pressure for further generation of electrical energy.

A configuration of an energy storage system is proposed, the main elements of which are a small-sized compressed air storage tank and a microturbine. An assessment of the technical and energy performance of the system is carried out when changing the design and operating parameters of the storage system.

Key words: electrical energy storage, renewable energy sources, compressed air energy storage system

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ	12
1.1 Аналіз перспектив використання технології акумулювання електричної енергії на базі стисненого повітря в контексті розвитку відновлюваної енергетики.....	12
1.2 Порівняльний аналіз технологій розподіленого виробництва електроенергії.....	19
1.3 Науково-технічні пошуки в удосконаленні технологій акумулювання електроенергії на базі систем стисненого повітря	21
1.4 Огляд результатів експериментальних досліджень ефективності малопотужних систем накопичення енергії на базі технології стисненого повітря	24
Висновки до першого розділу.....	
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ	26
2.1 Порівняльний аналіз сучасних технологій накопичення енергії для локальних електроенергетичних комплексів.....	28
2.2 Дослідження технологічних підходів до накопичення та генерації електроенергії в системах із стисненим повітрям CAES	32

2.3 Конструктивні рішення розширювальних пристроїв для систем розподіленого акумулювання енергії.....	39
2.4 Розробка розподіленої системи акумулювання енергії стисненого повітря для підвищення ефективності локальних енергетичних комплексів	43
Висновки до другого розділу	46
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ КОМПРЕСІЙНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ.....	47
3.1 Розробка математичної моделі системи компресійного накопичення енергії.....	47
3.2 Теоретичні основи формування математичного опису процесів компресії в термодинамічних системах.....	49
3.3 Чисельні методи рішення звичайних диференціальних рівнянь	52
3.4 Термодинамічна модель	58
Висновки до третього розділу.....	64
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	65
4.1 Моделювання динаміки заряджання ємності з акумулюючим агентом	65
4.2 Моделювання динаміки розряджання ємності з акумулюючим агентом....	69
4.3 Моделювання динаміки генерації електричної енергії	74
4.4 Аналіз результатів моделювання впливу режимних та конструктивних параметрів на її енергетичні характеристики	76
Висновки до четвертого розділу.....	84
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	86
5.1 Механізми утворення статичної електрики та заходи по її подоланню і зниженню негативного впливу	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CAES – система акумулювання електричної енергії у вигляді стисненого повітря

A-CAES – технологія адіабатичного накопичення енергії стисненого повітря

D-CAES – технологія розподіленого накопичення енергії стисненого повітря

I-CAES – ізотермічна технологія накопичення енергії стисненого повітря

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

РСГ – розподілена система генерації

ЦСГ – централізована система генерації

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність використання систем акумулювання електричної енергії у вигляді стисненого повітря (CAES) в складі електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) обумовлена сучасними глобальними викликами у сфері енергетики та необхідністю забезпечення стабільного та ефективного функціонування електричних мереж.

Сьогодні світова енергетична система перебуває в стані активної трансформації, що спричинено посиленням уваги до питань екологічності та сталого розвитку. Відновлювані джерела енергії набувають дедалі більшого значення, проте мають суттєвий недолік – нестабільність генерації електроенергії. Саме тому технології акумулювання, зокрема CAES, набувають критичного значення для забезпечення надійності та безперервності енергопостачання.

Технологія акумулювання електроенергії шляхом стиснення повітря являє собою інноваційне інженерне рішення, яке дозволяє ефективно накопичувати надлишкову електричну енергію, вироблену ВДЕ, та використовувати її в періоди максимального навантаження або дефіциту генерації. Принцип роботи CAES полягає в перетворенні електричної енергії на потенційну енергію стисненого повітря, яке може зберігатися у підземних порожнинах, спеціальних резервуарах або інших акумулюючих структурах, а потім перетворюватися на електричну енергію у зворотному циклі.

Економічна доцільність використання технології CAES підтверджується її порівняно низькою вартістю експлуатації, тривалим терміном служби та здатністю накопичувати значні обсяги енергії. На відміну від хімічних акумуляторних систем, CAES має менші експлуатаційні витрати, не потребує частой заміни елементів, може впроваджуватись в різних географічних умовах.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є проведення оцінки технічних та енергетичних показників ефективності застосування систем акумулювання електричної енергії відновлюваних джерел енергії у вигляді стиснутого повітря.*

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

- виконати огляд можливості використання для акумулювання енергії виробленої відновлюваними джерелами енергії систем на базі використання стиснутого повітря;
- розглянути технологічні аспекти побудови систем накопичення енергії стисненого повітря;
- обрати математичний апарат для опису процесів перетворення енергії в системі з акумулювання енергії стисненим повітрям та вирішення відповідних рівнянь;
- виконати моделювання динамічних процесів роботи елементів системи генерації електричної енергії;
- розробити заходи із охорони праці.

Об'єкт дослідження – процеси взаємного перетворення енергії стисненого повітря в електричну енергію та електричної енергії на стиснення повітря в системах акумулювання енергії.

Предмет дослідження – установка для накопичення енергії шляхом стиснення повітря в системі акумулювання енергії відновлюваних джерел.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень були застосовані метод математичного моделювання, методи розв'язку диференціальних рівнянь.

Наукова цінність роботи полягає в подальшому розвитку методів визначення ефективності роботи систем розосередженої генерації з установки акумулювання енергії у вигляді стисненого повітря.

Практична цінність роботи полягає в запропонованому рішенні побудови електроенергетичного комплексу з акумулюванням енергії відновлюваних джерел енергії, отриманих числових даних розрахунків

питомого значення густини запасеної енергії, проведенні оцінок рівня запасу енергії в акумуляторі, впливу параметрів системи на її енергетичні показники.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 94 сторінки. Основна частина викладена на 83 сторінках друкованого тексту, містить 25 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 20 джерел та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

1.1 Аналіз перспектив використання технології акумулювання електричної енергії на базі стисненого повітря в контексті розвитку відновлюваної енергетики

Світова динаміка глобальних енергетичних змін ілюструє до трансформації у структурі споживання та генерації електроенергії. Згідно з прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), відображеними на рис. 1.1, світовий попит на енергію до 2040 року зазнає істотного зростання, сягнувши показника у 40% від поточного рівня.



Рисунок 1.1 – Ілюстрація передбачення зміни попиту на енергетичне споживання енергії до 2040 року.

Ця динаміка зумовлена кількома ключовими факторами. Передусім спостерігається стрімкий розвиток технологій чистої енергетики та супутнє зниження їхньої вартості. Водночас відбувається активна електрифікація енергетичного сектору, причому частка електроенергії як кінцевого енергоносія прогнозовано зросте з 12% до 34% за період 2010-2025 роки.

Така динаміка енергоспоживання, спричинена зростанням світового населення, створює додатковий тиск на традиційні викопні енергоресурси та призводить до збільшення викидів вуглекислого газу, що підкреслює необхідність розвитку альтернативних джерел енергії.

Сучасні тенденції розвитку енергетичного сектору демонструють зростаючу роль відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у контексті створення екологічно збалансованої системи електрогенерації. Міжнародне енергетичне агентство спрямовує зусилля на розвиток розподіленої системи генерації (РСГ), яка має суттєві переваги порівняно з традиційною централізованою системою генерації (ЦСГ).

Ключовим недоліком централізованої системи є значні втрати електроенергії під час передачі та розподілу, які сягають понад 20%. Натомість інтеграція розподіленої генерації з відновлюваними джерелами, зокрема сонячними фотоелектричними установками та вітровими електростанціями, демонструє високу ефективність у проектах електрогенерації.

Такий підхід забезпечує не лише економічну ефективність через зниження фінансових витрат та енергозбереження, але й сприяє зменшенню шкідливих викидів у атмосферу. Додатковим перспективним напрямком розвитку стає концепція портативності енергетичних систем. Розробка компактних джерел живлення для портативних електронних пристроїв набуває особливого значення у військовій сфері застосування.

Розподілені системи генерації, незважаючи на їхні переваги, мають суттєві обмеження щодо забезпечення стабільного енергопостачання. Основною проблемою виступає залежність від погодних умов, характер яких важко передбачити з високою точністю.

Нестабільність генерації електроенергії, зумовлена природними факторами, створює серйозні виклики для енергосистеми. Зокрема, виникає складність у підтримці балансу між виробництвом та споживанням електроенергії, особливо враховуючи значні коливання попиту протягом доби.

Така ситуація призводить до того, що розподілені системи генерації самостійно не здатні гарантувати безперервне та надійне енергозабезпечення споживачів. Непередбачуваність погодних умов додатково ускладнює процес стабілізації енергосистеми, створюючи потребу в додаткових технічних рішеннях для компенсації природної мінливості ВДЕ.

Сучасна енергетика потребує інноваційних рішень для ефективної інтеграції відновлюваних джерел генерації. Особливо гостро постає питання балансування енергосистеми через непостійний характер роботи таких джерел. Щоб вирішити цю проблему, критично важливим є впровадження передових систем акумулювання енергії, які здатні згладжувати коливання між генерацією та споживанням електроенергії. Найбільш перспективним підходом вважається конверсія електричної енергії в альтернативні форми її накопичення з подальшою реконверсією назад в електрику в періоди підвищеного попиту. Такий механізм дозволяє досягти оптимального рівня керованості енергосистеми та забезпечити надійне електропостачання споживачів. При цьому важливо враховувати, що кожен метод накопичення енергії має свої особливості застосування та техніко-економічні показники, які визначають доцільність його використання в конкретних умовах експлуатації.

Серед наявних технологій накопичення енергії акумуляторні системи залишаються найбільш поширеними, проте їх застосування супроводжується низкою суттєвих обмежень. Ключовою проблемою є відносно низька питома енергоемність акумуляторів – показник у 0,5 МДж/кг значно поступається енергетичній щільності вуглеводневого палива, яка сягає 40 МДж/кг як проілюстровано на рис. 1.2. Це створює значні обмеження для мобільного використання акумуляторних систем через їх надмірну масу. Додатковим недоліком є тривалий час заряджання батарей порівняно зі швидкістю

заправки традиційних паливних систем. Зазначені фактори стимулюють пошук та розробку альтернативних технологій накопичення енергії, які б могли подолати наявні обмеження акумуляторних систем.

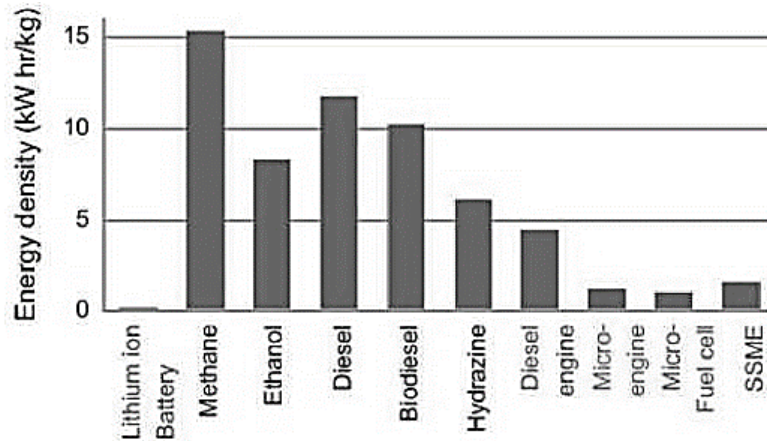


Рисунок 1.2 – Енергоємність накопичувачів енергії та вуглецевого палива.

В контексті розвитку екологічно безпечних технологій накопичення енергії особливу увагу привертають системи на основі стисненого повітря, що англійською мовою має назву Compressed Air Energy Storage, або у вигляді аббревіатури – CAES. Зазначена технологія демонструє значний потенціал для масштабного довготривалого зберігання енергетичних ресурсів. Принцип роботи таких установок базується на використанні надлишкової електроенергії, що генерується в періоди зниженого споживання, для роботи потужних компресорних агрегатів. За допомогою цього обладнання відбувається стиснення атмосферного повітря та його подальше закачування у спеціально підготовлені резервуари високого тиску. Такий підхід дозволяє ефективно балансувати енергосистему, накопичуючи надлишкову енергію під час пікової генерації для її подальшого використання в періоди підвищеного попиту, що робить цю технологію перспективною альтернативою традиційним акумуляторним системам.

Науково-технічні дослідження останніх років підтвердили значний потенціал технології накопичення енергії стисненого повітря для децентралізованих енергетичних систем невеликої потужності. Експериментальні та практичні результати демонструють здатність CAES-установок забезпечувати накопичення енергії в діапазоні від 10 кВт·год із можливістю генерації вихідної потужності, що перевищує 10 кВт як це можна побачити на рис. 1.3 у порівнянні з іншими технологіями. Саме такі енергетичні характеристики роблять системи стисненого повітря особливо привабливими для створення компактних мобільних енергетичних установок. Важливо відзначити, що ці показники досягаються без використання екологічно небезпечних матеріалів, що властиві традиційним акумуляторним системам, а також забезпечується більша гнучкість у масштабуванні потужності відповідно до конкретних потреб споживачів.

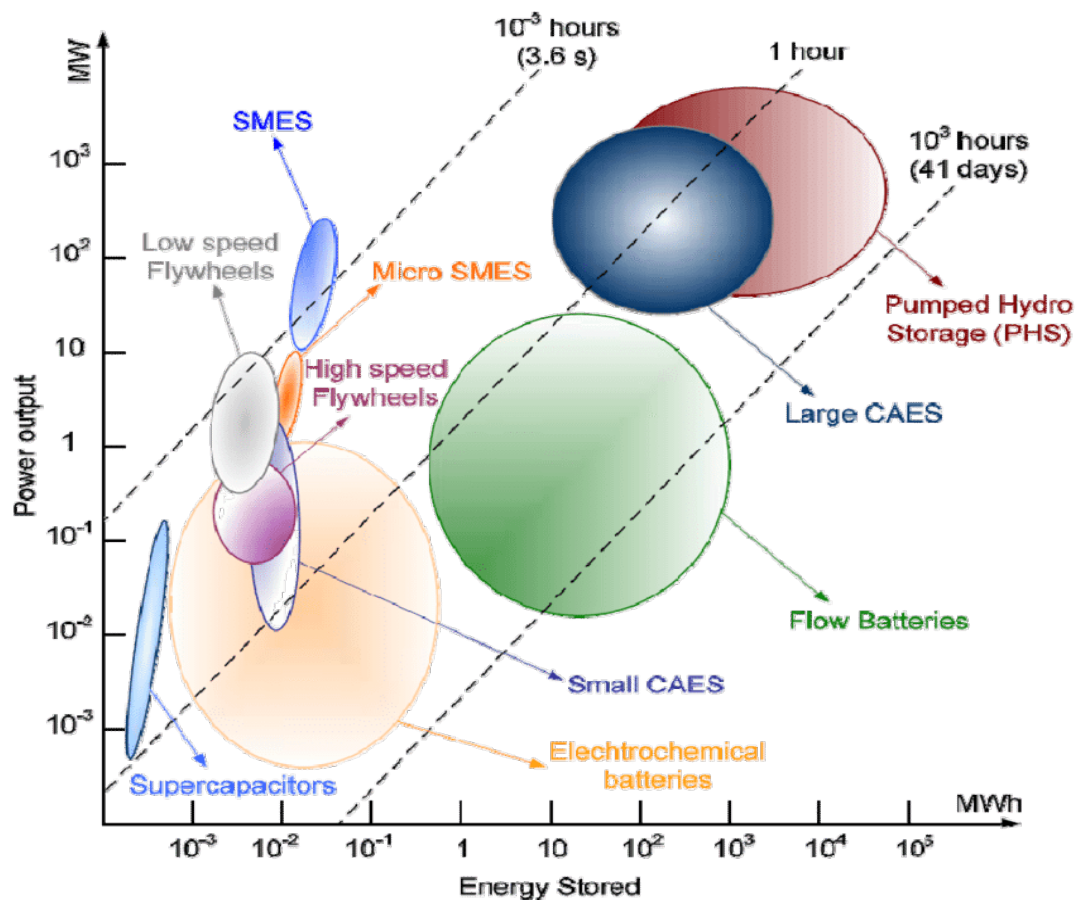


Рисунок 1.3 – Енергетичні можливості технологій накопичення енергії

При оцінці доцільності впровадження систем накопичення енергії економічний аспект відіграє визначальну роль у прийнятті інвестиційних рішень. Рентабельність таких проєктів визначається співвідношенням між очікуваними фінансовими вигодами та сукупними витратами протягом всього життєвого циклу установки. Для об'єктивного аналізу економічної ефективності застосовується комплексний підхід до розрахунку загальних витрат, який враховує як початкові капітальні інвестиції, так і сумарні експлуатаційні видатки, розподілені на весь прогнозований період функціонування системи. Тільки за умови, коли сумарний економічний ефект від впровадження технології перевищує або щонайменше дорівнює загальним витратам, можна говорити про фінансову привабливість такого енергетичного проєкту та доцільність його реалізації.

У дослідницьких джерелах представлено математичне обґрунтування структури витрат для систем накопичення енергії, яке демонструє пряму залежність економічних показників від двох ключових параметрів: сумарного обсягу виробленої енергії W_{ut} та номінальної встановленої потужності системи P_d . Примітно, що існує чітка кореляція між експлуатаційними та інвестиційними витратами, при цьому перші можуть складати до 40% від величини капітальних вкладень. Така залежність дозволяє сформулювати комплексне рівняння для розрахунку загальної вартості проєкту, що враховує всі складові витрат протягом життєвого циклу системи. Важливо зазначити, що використання такого підходу дозволяє проводити більш точний економічний аналіз та прогнозування фінансових показників при плануванні впровадження систем накопичення енергії різного масштабу.

Базуючись на результатах наукових досліджень, економічна модель для оцінки загальної вартості систем накопичення енергії демонструє залежність від двох основних технічних параметрів: сукупного обсягу генерованої енергії W_{ut} та величини встановленої потужності обладнання P_d . Аналіз фінансових показників виявляє характерну особливість – експлуатаційні видатки мають пропорційну залежність від початкових інвестицій, причому їх величина може

досягати 40% від капітальних витрат. Взаємозв'язок між цими економічними складовими можна математично описати за допомогою спеціального рівняння, яке враховує як масштаб енергетичної установки, так і інтенсивність її використання протягом всього терміну експлуатації. Таке рівняння стає потужним інструментом для попередньої оцінки економічної доцільності впровадження подібних систем та оптимізації їхніх технічних параметрів з урахуванням фінансових обмежень.

$$C_t = ac_1 + c_2 P_d \quad (1.1)$$

Математична модель включає важливий параметр автономності системи a , який розраховується як відношення між енергетичною ємністю накопичувача W_{ut} та його розрядною потужністю P_d . Для повноцінного економічного аналізу в рівнянні використовуються спеціальні коефіцієнти кореляції: c_1 встановлює взаємозв'язок між загальними витратами та кількістю виробленої енергії W_{ut} , тоді як c_2 відображає залежність витрат від показника встановленої потужності системи P_d . Використання цих коефіцієнтів дозволяє врахувати різні аспекти експлуатаційних характеристик та створити точну модель прогнозування економічної ефективності енергетичної установки. Така деталізація розрахунків забезпечує можливість оптимізації технічних параметрів системи з урахуванням як енергетичних потреб, так і фінансових можливостей при реалізації проєкту.

Порівняльний економічний аналіз різних технологій накопичення енергії, результати якого приведені на рис. 1.4, демонструє суттєві переваги систем стисненого повітря з точки зору питомих витрат. Технологія CAES вирізняється винятково привабливими фінансовими показниками, демонструючи одні з найменших значень як за вартістю одиниці встановленої потужності у доларах на кіловат, так і за ціною накопиченої енергії у доларах на кіловат-годину. Така економічна ефективність робить системи стисненого повітря особливо конкурентоспроможними порівняно з іншими методами

акумуляції енергії. Поєднання низької капіталомісткості та невисоких експлуатаційних витрат створює сприятливі передумови для широкого впровадження CAES-технології у різних галузях енергетики, особливо в умовах зростаючої потреби в економічно ефективних рішеннях для накопичення енергії.

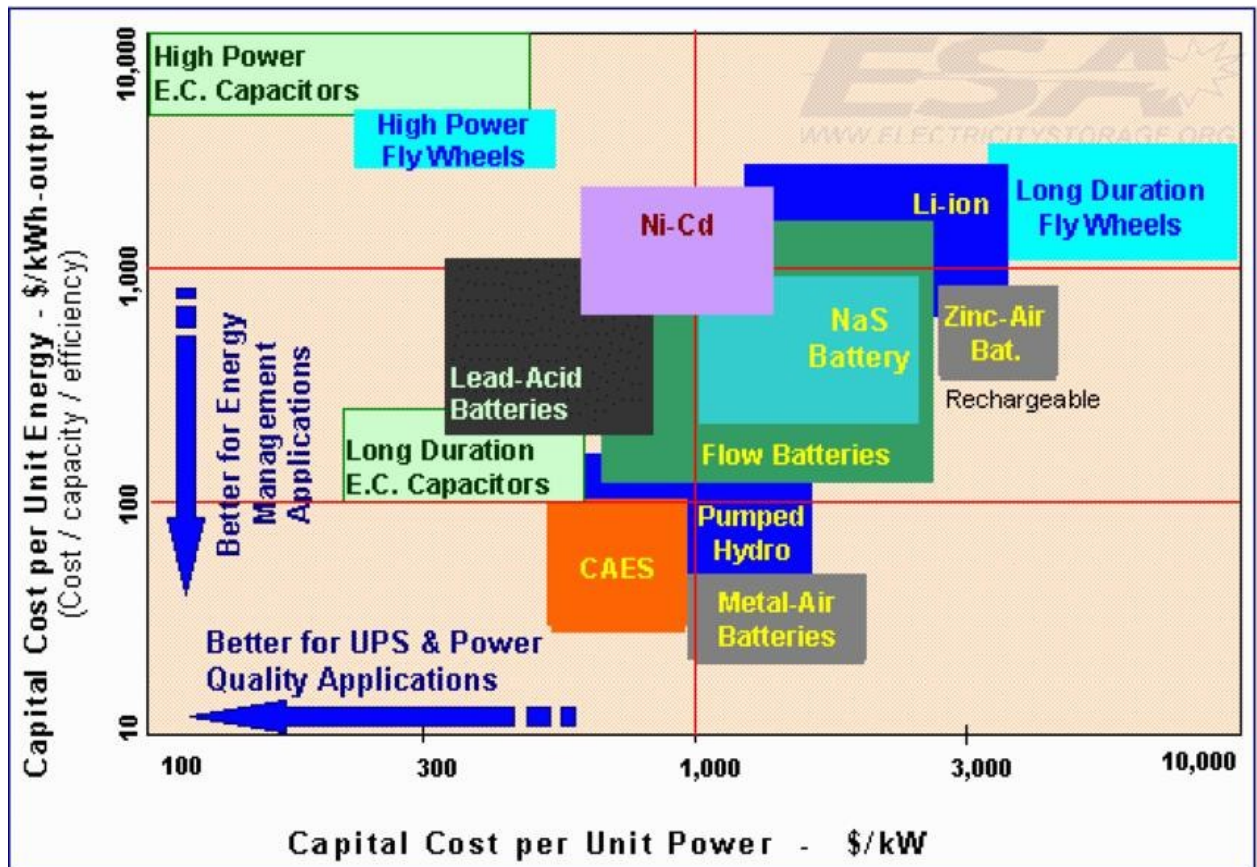


Рисунок 1.4 – Ілюстрація до порівняння питомих значень вартості та енергоемності технологій акумуляції енергії

1.2 Порівняльний аналіз технологій розподіленого виробництва електроенергії

Розподілена система генерації представляє собою інноваційну концепцію енергопостачання, де джерела електричної енергії безпосередньо інтегруються в розподільчу мережу або встановлюються на стороні споживача

до точки обліку. Дослідження демонструють суттєві переваги такого підходу до організації енергопостачання. Насамперед, це істотне скорочення втрат при передачі електроенергії: якщо в магістральних мережах втрати становлять 4-5%, а в розподільчих досягають 10-15%, то локальна генерація дозволяє майже повністю їх уникнути.

Впровадження розподіленої системи генерації також сприяє підвищенню стабільності роботи енергосистеми завдяки можливості оперативного реагування на пікові навантаження та розширенню діапазону регулювання потужності. Особливу цінність такі системи представляють для об'єктів, які потребують безперебійного електропостачання та готові сплачувати додаткову вартість за гарантовану надійність.

З економічної точки зору, використання систем розподіленої генерації для покриття пікових навантажень виявляється більш рентабельним порівняно з введенням в експлуатацію додаткових потужностей на традиційних теплових електростанціях. Важливою перевагою є також мобільність таких систем, що робить їх незамінними для електрозабезпечення віддалених об'єктів, де відсутній доступ до централізованої електромережі. Така універсальність та адаптивність розподіленої системи генерації відкриває широкі перспективи для їх застосування в різноманітних сценаріях енергопостачання.

Класифікація систем розподіленої генерації базується на двох фундаментально різних підходах до виробництва електроенергії. Невідновлювані технології спираються на традиційні методи генерації, але реалізовані у зменшеному масштабі. До таких систем належать установки з двигунами внутрішнього згоряння, агрегати на основі циклу Стірлінга, а також компактні парові та газотурбінні установки.

З іншого боку, все більшої актуальності набувають системи на базі відновлюваних джерел енергії, які включають широкий спектр технологій: від паливних елементів та малих гідроелектростанцій до сонячних фотоелектричних установок і вітрогенераторів. Особливістю цих джерел є їх залежність від природних факторів, що ускладнює контроль генерації з боку

споживача. Саме тому критичного значення набуває інтеграція систем накопичення енергії, які забезпечують безперервність та надійність електропостачання від відновлюваних джерел.

Комплексний аналіз технічних характеристик різних технологій розподіленої генерації, результати якого приведені у таблиці. 1.1, дозволяє оцінити їх потенціал та обрати оптимальне рішення для конкретних умов застосування, враховуючи специфічні вимоги до надійності, економічності та екологічності енергопостачання.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристики систем розподіленої генерації

Технологія	Діапазон потужності, кВт	Коефіцієнт корисної дії, в.о.	Капітальні витрати (\$/Вт)
Мікро гідравлічні турбіни	20 – 500	0,2 – 0,8	0,6 – 2,6
Установки з використанням двигуна Стірлінга	2 – 10	до 0,3	-
Паливні елементи	до 10^6	0,35 – 0,8	-
Сонячні фотоелектричні елементи фотоелементи	0,02 – 100	0,1 – 0,2	2,5 – 7,0
Малі гідроелектростанції	$(5-10) \cdot 10^6$	0,6 – 0,8	3,4 – 10
Вітрові турбіни	$1 - 3 \cdot 10^6$	0,2 – 0,5	0,8 – 3,5

1.3 Науково-технічні пошуки в удосконаленні технологій акумулювання електроенергії на базі систем стисненого повітря

У контексті теоретичних досліджень систем накопичення електроенергії у формі стисненого повітря CAES науковці зосередили увагу на кількох ключових напрямках наукового пошуку.

Перш за все, теоретичні розвідки спрямовані на вдосконалення термодинамічних циклів перетворення електричної енергії в потенційну енергію стисненого повітря та зворотного процесу генерації електроенергії. Дослідники активно розробляють математичні моделі, які враховують складні

фізичні процеси стиснення, акумулювання та наступного розширення повітря з максимальною ефективністю перетворення енергії.

Важливим напрямком теоретичних пошуків є оптимізація конструктивних параметрів CAES-установок. Наукові колективи зосереджені на вивченні впливу геологічних характеристик підземних порожнин, геометрії резервуарів високого тиску та експлуатаційних режимів на загальну ефективність систем накопичення.

Суттєва увага приділяється розробці методів підвищення термічної ефективності CAES-технології. Теоретичні дослідження спрямовані на пошук інноваційних рішень з акумулювання та використання теплової енергії, що утворюється в процесі стиснення та розширення повітря. Зокрема, науковці пропонують комбіновані схеми з використанням додаткових теплоакумуючих елементів та інтеграцією теплових насосів.

Окремий напрямок теоретичних досліджень пов'язаний з економіко-математичним моделюванням систем CAES. Науковці розробляють комплексні методики оцінки економічної ефективності, які враховують капітальні витрати, експлуатаційні витрати, потенційну вартість електроенергії та терміни окупності проєктів.

Значна частина теоретичних пошуків присвячена порівняльному аналізу різних технологічних схем CAES. Дослідники вивчають переваги адіабатичних, ізотермічних та інших модифікацій технології, оцінюючи їх придатність для різних сценаріїв застосування – від локальних енергетичних систем до масштабних регіональних мереж.

Важливим науковим напрямком є дослідження впливу CAES-технологій на загальну стійкість та керованість електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами генерації. Теоретичні моделі покликані довести здатність таких систем накопичення забезпечувати необхідний резерв потужності та виконувати функції стабілізації при значних коливаннях генерації.

Перспективним вектором теоретичних досліджень є розробка комп'ютерних симуляційних моделей, здатних з високою точністю

прогнозувати поведінку CAES-установок в різних експлуатаційних режимах. Такі моделі дозволяють вивчати складні термодинамічні процеси, мінімізувати ризики, оптимізувати технічні рішення на стадії проектування.

Сучасні теоретичні пошуки в галузі CAES-технологій характеризуються міждисциплінарним підходом, поєднуючи здобутки термодинаміки, електроенергетики, економіки та комп'ютерного моделювання з метою створення максимально ефективних систем акумулювання електроенергії.

Наукові дослідження в галузі малогабаритних систем накопичення енергії стисненого повітря (D-CAES) зосереджені на вирішенні ключових технологічних викликів. Дослідники виявили, що основним фактором, який обмежує ефективність таких систем, є відносно низький коефіцієнт корисної дії турбінного обладнання малої потужності. Це зумовлює необхідність подальших розробок у напрямку створення компактних турбін з покращеними енергетичними характеристиками.

Комплексні дослідження енергетичних та ексергетичних параметрів малих CAES-систем продемонстрували можливість досягнення високої ефективності - до 60% при використанні квазіізотермічних процесів як при стисненні, так і при розширенні повітря в установках з резервуарами постійного тиску. Ще більш оптимістичні результати отримані при дослідженні комбінованих систем на базі відновлюваних джерел енергії потужністю 500 кВт. Така установка здатна накопичувати 14 400 МДж енергії у вигляді стисненого повітря під тиском 200 бар протягом восьмигодинного циклу заряджання, демонструючи теоретичну ефективність до 72%, хоча це значення потребує уточнення через певні спрощення, прийняті в матмоделі.

Інноваційні дослідження у сфері вдосконалення систем накопичення енергії стисненого повітря призвели до створення модифікованої системи E-CAES, особливістю якої є впровадження додаткового ежектора. Глибокий термодинамічний аналіз цієї конфігурації продемонстрував суттєві переваги порівняно з традиційними системами A-CAES: оптимізація процесу дроселювання дозволила підвищити загальний коефіцієнт корисної дії

приблизно на 2%, що трансформувалося у значне зростання економічної ефективності - прибутковість зросла більш ніж на 21%.

Важливим відкриттям стало виявлення оптимального значення тиску на вході розширювача, яке забезпечує максимальні показники як продуктивності системи, так і густини накопиченої енергії. Додатково встановлено позитивний вплив підвищеного коефіцієнта теплопередачі між накопичувальним резервуаром та навколишнім середовищем. Такий теплообмін сприяє підтриманню майже постійної температури повітря в резервуарі під час процесу нагнітання, наближаючи його до квазіізотермічного режиму, що суттєво покращує енергетичні характеристики всього термодинамічного циклу та підвищує загальну ефективність системи.

1.4 Огляд результатів експериментальних досліджень ефективності малопотужних систем накопичення енергії на базі технології стисненого повітря

Аналіз наукових джерел демонструє існування різноманітних гібридних установок компресійного зберігання енергії малого масштабу, діапазон потужностей яких варіюється від двох кіловат до одного мегавата. Характерною особливістю таких децентралізованих систем є застосування спіральних експандерів, проте їхня енергоефективність значно поступається турбінним агрегатам.

Важливі експериментальні дослідження робочого циклу мініатюрної пневмоакумулюючої станції були проведені та описані в публікаціях. Дослідна установка включала резервуар місткістю 270 літрів для зберігання стисненого повітря під тиском 11 бар, а також компактну турбіну з частотою обертання 800 обертів на хвилину, що генерувала електричну напругу 8 вольт. Отримані результати випробувань переконливо засвідчили гостру потребу у створенні та впровадженні більш продуктивних розширювальних механізмів для подібних енергетичних систем.

Додатково варто відзначити, що сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення конструкції експандерів та підвищення їх коефіцієнта корисної дії, що дозволить суттєво покращити загальну ефективність малих пневмоакумуючих систем накопичення енергії.

У контексті розвитку відновлюваної енергетики значний науковий інтерес становить інтеграція вітроенергетичних установок із компактними системами акумулювання енергії стисненого повітря. Деякі дослідження зосереджувалося на оптимізації процесу конвертації енергії вітрового потоку в пневматичну енергію за допомогою спеціально розробленого адаптивного контролера, який забезпечував регулювання передавального механізму відповідно до поточної швидкості вітру.

Експериментальні дані засвідчили істотну залежність обсягу накопиченої енергії від граничного тиску в акумулюючому резервуарі, який визначається робочими параметрами вітрового потоку. Паралельно з цим дослідженням, у британському місті Ворвік реалізується перспективний проект зі створення експериментального гібридного комплексу, що поєднує вітрогенератор та пневмоакумуючу станцію. Головною метою цієї інноваційної розробки є максимізація виробництва електричної енергії за умов низької вітрової активності. Варто підкреслити, що такі комбіновані системи відкривають нові можливості для підвищення стабільності енергопостачання та ефективного використання вітроенергетичного потенціалу навіть у періоди з несприятливими метеорологічними умовами.

В контексті розвитку технологій акумулювання енергії значний інтерес становить нещодавно реалізований експериментальний проект адіабатичної пневмоакумуючої електростанції (AA-CAES). Головними завданнями цієї інноваційної установки стало дослідження можливостей використання підземних порожнин для зберігання стисненого повітря під навантаженням та визначення ефективності теплового акумулятора, який базується на застосуванні спресованого шару гірських порід всередині порожнин. За

результатами випробувань, загальний коефіцієнт корисної дії системи коливався у межах 0,63-0,74.

Паралельно розвивається напрямок створення малогабаритних розширювальних пристроїв. Бельгійські науковці сконструювали компактну турбіну діаметром лише десять міліметрів, яка при роботі на стисненому повітрі забезпечила механічну потужність близько тридцяти ват із коефіцієнтом корисної дії 0,185 відсотків. Подальші дослідження у 2017 році призвели до розробки вдосконаленої конструкції повітряної турбіни дещо більших розмірів. При вхідному тиску від 1,2 до 1,6 бар цей агрегат продемонстрував суттєво кращі характеристики – максимальну вихідну потужність 700 ват та енергоефективність близько 0,6.

Такі результати відкривають перспективи подальшого вдосконалення технологій компресійного зберігання енергії як у промисловому масштабі, так і в сегменті малопотужних децентралізованих систем.

Висновки до першого розділу

1. Сучасний розвиток енергетичного сектору характеризується фундаментальним переходом від традиційної централізованої генерації до розподілених систем виробництва електроенергії, що зумовлено прагненням до підвищення екологічності та надійності енергозабезпечення. Така трансформація обґрунтована значними втратами електроенергії у системах передачі та розподілу при централізованому підході, які сягають п'ятої частини від загального обсягу виробництва.

2. Впровадження розподілених систем генерації стикається з серйозними викликами, пов'язаними з нестабільністю виробництва електроенергії через залежність від мінливих погодних умов, що ускладнює забезпечення безперервного та надійного енергопостачання. Ситуація додатково ускладнюється варіативністю енергоспоживання протягом доби, що створює суттєвий дисбаланс між генерацією та споживанням електроенергії.

3. Вирішення зазначених проблем потребує масштабного впровадження сучасних технологій акумулювання енергії, які здатні забезпечити ефективну синхронізацію процесів виробництва та споживання електроенергії, що дозволяє досягти контрольованої роботи енергосистеми та оптимального використання потенціалу розподіленої генерації, створюючи надійну основу для подальшого розвитку екологічно чистої енергетики.

4. Серед перспективних напрямків розвитку технологій накопичення енергії особливу увагу привертають системи компресійного зберігання енергії CAES на основі стисненого повітря. Ця технологія екологічна і має значний потенціал для довготривалого зберігання великих обсягів енергії, що робить її особливо привабливою для масштабних енергетичних проєктів.

5. В контексті економічної ефективності технологій накопичення енергії системи компресійного зберігання демонструють виняткову привабливість, характеризуючись одночасно конкурентною собівартістю як встановленої потужності, так і одиниці накопиченої енергії. Така економічна перевага CAES-систем зумовлена використанням відносно простих технічних рішень та доступних матеріалів при їх конструюванні, а також тривалим терміном експлуатації без суттєвої деградації робочих характеристик.

6. Низька питома вартість зберігання енергії у поєднанні з мінімальними експлуатаційними витратами створює сприятливі передумови для широкомасштабного впровадження цієї технології як у промисловому секторі, так і в системах розподіленої генерації. Економічна доцільність застосування CAES-установок додатково підсилюється їхньою здатністю ефективно працювати в різних масштабах потужності, що забезпечує гнучкість при проєктуванні систем енергозабезпечення різного призначення. Таке поєднання низької капітальної вартості та експлуатаційних витрат робить технологію компресійного зберігання енергії одним із найперспективніших напрямків розвитку систем акумулювання енергії для майбутньої енергетики.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

2.1 Порівняльний аналіз сучасних технологій накопичення енергії для локальних електроенергетичних комплексів

Розвиток відновлюваної енергетики на локальному рівні потребує впровадження надійних технологій акумулювання енергії, здатних ефективно компенсувати природні флуктуації потужності та гарантувати стабільне енергозабезпечення споживачів. Сучасні системи накопичення енергії представлені трьома основними технологічними напрямками, що включають механічні, теплові та хімічні принципи зберігання енергетичного потенціалу.

З точки зору практичного застосування доцільно розглядати дві ключові категорії таких систем. Перша охоплює установки малої потужності, орієнтовані переважно на забезпечення енергопостачання ізольованих об'єктів та створення резервних джерел живлення для надзвичайних ситуацій. Друга категорія представлена системами середньої потужності, призначеними для організації автономного виробництва електроенергії у промисловому та комерційному секторах.

Вибір конкретної технології акумулювання енергії визначається специфічними вимогами конкретного застосування, включаючи необхідну потужність, тривалість зберігання енергії, швидкість реагування системи та економічні показники. При цьому інтеграція систем накопичення енергії з відновлюваними джерелами створює основу для формування надійних та екологічно чистих локальних енергетичних комплексів.

У сфері розподіленої генерації малої потужності найбільшого поширення набули чотири основні технології накопичення енергії: паливні

елементи, кінетичні накопичувачі на базі маховиків, електрохімічні акумулятори та системи компресійного зберігання енергії. При цьому важливо відзначити, що для завдань довготривалого зберігання енергії з потребою у тривалому розряді технології CAES та паливних елементів демонструють суттєві переваги порівняно з акумуляторними батареями.

Для малопотужних генеруючих систем оптимальними рішеннями виступають суперконденсатори, різні типи акумуляторних батарей та компактні установки компресійного зберігання енергії. Кожна з цих технологій має свої специфічні характеристики, що визначають їхню ефективність у конкретних умовах застосування.

Порівняльний аналіз технологій накопичення енергії, систематизований у таблиці 2.1, демонструє суттєві відмінності у характеристиках та сферах застосування систем різного масштабу – від локальних установок малої потужності до потужних промислових комплексів. Такий підхід до класифікації дозволяє оптимально підбирати технологію накопичення енергії відповідно до конкретних вимог проекту, враховуючи технічні, економічні та експлуатаційні фактор.

Варто зазначити, що сучасні тенденції в галузі акумуляування електроенергії характеризуються постійним пошуком інноваційних рішень, здатних подолати обмеження існуючих технологій. Особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на підвищення енергетичної незалежності та зниження вартості систем накопичення.

Принципово важливим аспектом є диверсифікація технологічних підходів до акумуляування енергії. Зокрема, перспективними напрямками вважаються комбіновані системи, які поєднують декілька принципів накопичення енергії. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих технологій та створити більш універсальні та ефективні рішення для локальних енергетичних комплексів.

Таблиця 2.1 – Показники технологій накопичення енергії

Технологія	PHS (ГАЕС)	Потужна CAES	Мала CAES	Свинцево- кислотний акумулятор	Нікель- кадмієвий акумулятор	Літієва батарея	Конденсатор	Обертний маховик	НТ TES	Паливні елементи
Потужність, МВт	100- 5000	5-300	0,003-3	0-20	0-40	0-0.1	0-0.05	0-0,250	0 – 60	0 – 50
Енергоємність, кВт-год/м³	0,5-1,5	3-6	0,5-2,5	15-70	20-80	200-500	10-30	20-80	120 – 300	500 – 3000
Ефективність, %	70-80	40-55	до 40	75-85	60-85	85-95	60-75	90-95	30 – 60	20 – 50
Час розвантаження, год.	1-24	1-24	1	години	години	години	година	хвилина	доба	доба
Тривалість зберігання	місяці	місяці	місяці	дні	дні	дні	хвилини	хвилини	дні	місяці
Капітальні витрати, \$/кВт	600- 2000	400 – 800	200- 250	300-800	500-1500	1500- 4000	200-750	250-750	200- 300	10

Серед перспективних напрямків досліджень особливо виділяються технології, що базуються на використанні нових фізико-технічних принципів. Науковці приділяють значну увагу розробці накопичувачів на базі надпровідних магнітних систем, які теоретично здатні забезпечити надвисоку густину енергії та мінімальні втрати при зберіганні. Попередні експериментальні дослідження демонструють потенційну можливість досягнення коефіцієнта корисної дії понад 90% у таких системах.

Важливим трендом у розвитку технологій акумулювання електроенергії є їх адаптація до вимог розподіленої енергетики. Сучасні системи накопичення повинні забезпечувати не лише тривале зберігання енергії, але й можливість швидкого реагування на зміни навантаження в локальних електричних мережах. Це особливо актуально для систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії, де генерація має переривчастий характер.

Економічна складова впровадження систем акумулювання електроенергії набуває дедалі більшого значення. Аналіз світового досвіду свідчить, що вартість технологій накопичення енергії за останні десять років знизилась приблизно на 60-70%, що робить їх дедалі більш конкурентоспроможними порівняно з традиційними рішеннями в енергетиці.

Суттєвим викликом для впровадження систем акумулювання електроенергії залишаються питання екологічної безпеки та утилізації обладнання. Особливо гостро це стосується хімічних акумуляторних систем, які містять значну кількість шкідливих хімічних елементів. Саме тому дослідження у напрямку створення більш екологічно чистих технологій накопичення енергії стають дедалі більш пріоритетними.

Перспективним напрямком вважається інтеграція систем акумулювання з інтелектуальними системами управління на базі штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє оптимізувати процеси накопичення та розподілу електроенергії, забезпечуючи максимальну ефективність використання наявних енергетичних ресурсів.

2.2 Дослідження технологічних підходів до накопичення та генерації електроенергії в системах із стисненим повітрям CAES

Технологія компресійного зберігання енергії, попри свою тривалу історію розвитку, що бере початок у другій половині двадцятого століття, досі не отримала широкомасштабного практичного застосування у світовій енергетиці. Водночас накопичений досвід досліджень та експериментальних розробок дозволив сформувати різноманітні підходи до використання стисненого повітря для генерації електричної енергії.

Можна виокремити чотири категорії систем, які відрізняються специфікою використання стисненого повітря в процесі енерговиробництва. Така класифікація відображає еволюцію технічних рішень та пошук оптимальних конфігурацій систем CAES для різних умов експлуатації.

Важливо підкреслити, що кожна з цих категорій характеризується власними технологічними особливостями, перевагами та обмеженнями, що визначає їхню придатність для конкретних застосувань у сучасній енергетиці. Розуміння специфіки різних типів CAES-систем є ключовим фактором для їх ефективного впровадження та подальшого вдосконалення.

Категорія I. Традиційні системи компресійного зберігання енергії базуються на модифікованому циклі Брейтона, особливістю якого є часове розділення процесів стиснення та розширення. Такий підхід дозволяє використовувати надлишкову електроенергію в періоди низького споживання для компресії повітря, яке накопичується у великих підземних резервуарах, створених у соляних або скельних породах.

Принципова відмінність від класичного циклу Брейтона полягає у часовому розмежуванні роботи компресора та турбіни, що суттєво підвищує енергетичну ефективність системи. За рахунок такого розділення процесів установка CAES здатна генерувати втричі більше енергії з однакової кількості палива порівняно зі стандартним циклом, незважаючи на те, що процес стиснення споживає близько двох третин доступної потужності.

Проте дана технологія має певні обмеження, пов'язані з необхідністю спалювання палива при використанні стисненого повітря, що призводить до додаткових викидів вуглекислого газу. До того ж, істотні втрати тепла під час фази компресії негативно впливають на загальний коефіцієнт корисної дії системи. Водночас важливою перевагою залишається те, що енергія, використана для стиснення повітря, фактично є надлишковою та доступною без додаткових витрат у періоди низького споживання.

Історія розвитку технології накопичення енергії за допомогою стисненого повітря CAES розпочалася у другій половині XX століття. Першопрохідцем у впровадженні цієї інноваційної технології стала Німеччина, де в 1978 році у місті Huntorf була введена в експлуатацію піонерна установка. Це підприємство, використовуючи потужності природної підземної порожнини як сховища, забезпечувало генерацію електроенергії потужністю 290 МВт із тривалістю роботи до чотирьох годин (рис. 2.1).

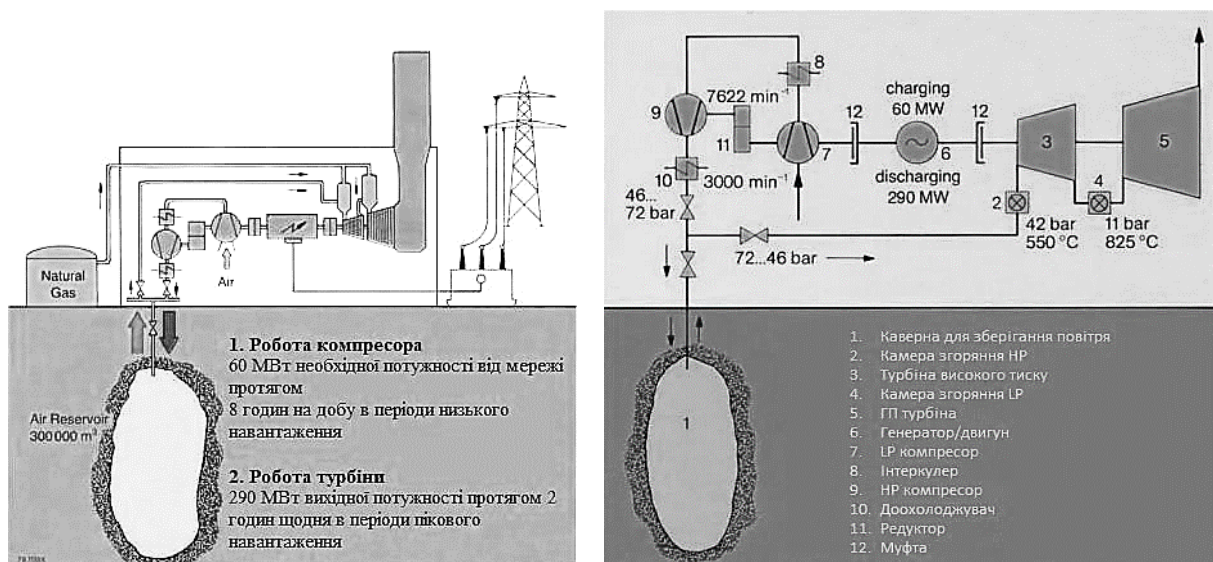


Рисунок 2.1 – Ілюстрація до принципу роботи системи акумулювання стисненим повітрям установки в м. Huntorf

Вагомим кроком розвитку технології CAES є будівництво енергетичної установки в американському місті McIntosh. Ця станція продемонструвала

вражаючі показники витривалості, підтримуючи безперервну генерацію на рівні 110 МВт тривалістю 26 годин (рис. 2.2). Таким чином, обидві установки стали яскравими прикладами успішного впровадження технології накопичення енергії за допомогою стисненого повітря та заклали фундамент для подальшого розвитку цього напрямку енергетики.

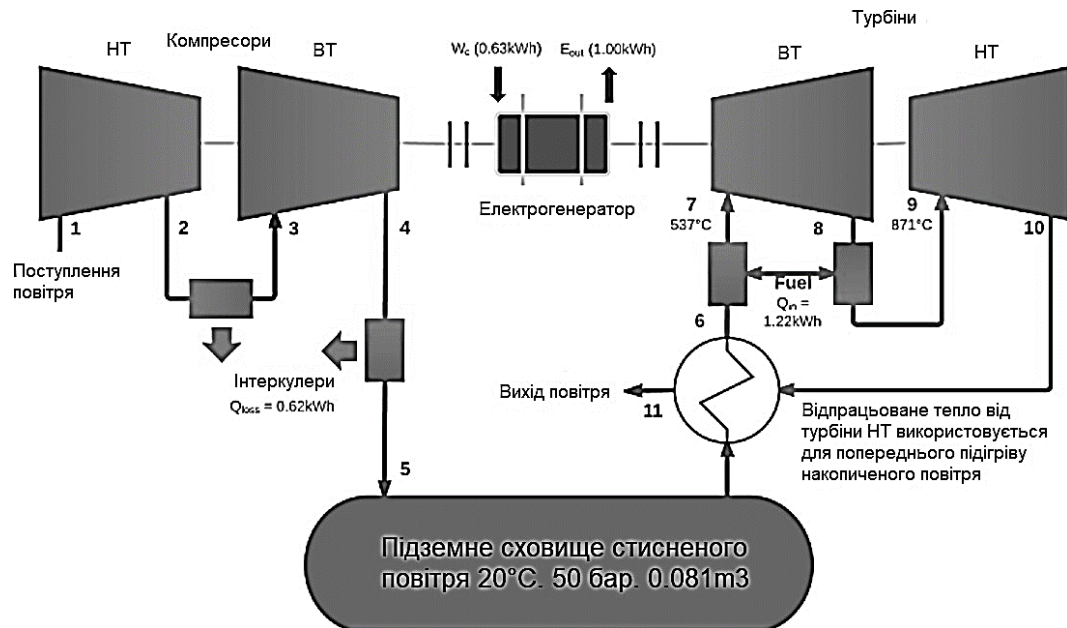


Рисунок 2.2 – Технологічна схема станції McIntosh в Алабамі із системою акумулювання стисненим повітрям

Зображення на рис. 2.2 представляє схему системи накопичення енергії стисненого повітря (CAES – Compressed Air Energy Storage) з детальним відображенням усіх ключових компонентів та енергетичних потоків.

Основні складові системи включають: компресорний блок, що складається з компресорів низького (НТ) та високого тиску (ВТ) з проміжними інтеркулерами для охолодження повітря під час стиснення. Зазначено, що тепловіддача при охолодженні становить $0.62 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Підземне сховище стисненого повітря з параметрами: температура 20°C , тиск 50 бар та об'єм $0,081 \text{ м}^3$. Це сховище служить для накопичення стисненого повітря. Турбінний блок, що містить турбіни високого (ВТ) та низького тиску (НТ). Перед

розширенням у турбінах повітря підігрівається до температур 537°C та 871°C відповідно. Для підігріву використовується паливо з тепловою потужністю 1,22 кВт·год. Електрогенератор, який перетворює механічну енергію турбін в електричну. На схемі показано, що споживана потужність при стисненні становить 0,63 кВт·год, а вихідна електрична потужність – 1,00 кВт·год. Система рекуперації тепла, де відпрацьоване тепло від турбіни низького тиску використовується для попереднього підігріву накопиченого повітря, що підвищує загальну ефективність системи.

Принцип роботи системи наступний. У періоди низького споживання електроенергії повітря стискається компресорами та закачується в підземне сховище. При необхідності виробництва електроенергії стиснене повітря проходить через підігрівачі та розширюється в турбінах. Механічна енергія турбін перетворюється в електричну за допомогою генератора. Використання рекуперації тепла та проміжного охолодження при стисненні оптимізує енергоефективність системи. Схема демонструє всі енергетичні потоки та термодинамічні параметри в ключових точках системи, що дозволяє оцінити її ефективність та характеристики роботи.

Категорія II. Технологія адіабатичного накопичення енергії стисненого повітря (A-CAES) представляє собою вдосконалену версію традиційної системи CAES, спрямовану на суттєве скорочення витрат паливних ресурсів. Ключовою особливістю цієї інноваційної конфігурації є забезпечення підтримки високотемпературного режиму повітря перед етапом його розширення. Досягнення цієї мети стало можливим завдяки впровадженню передової технології термального енергонакопичення (TES), що дозволяє ефективно зберігати теплову енергію, яка виділяється під час компресії повітря, для подальшого використання у процесі його попереднього нагрівання перед подачею до турбінного агрегату. Проведені термодинамічні дослідження системи A-CAES продемонстрували значний потенціал підвищення продуктивності порівняно з класичними установками,

забезпечуючи приріст загального коефіцієнта корисної дії на рівні 30%. У ході експериментальних досліджень було також проаналізовано ефективність застосування теплоізовльованого резервуара, схематично зображеного на рис. 2.3. Результати випробувань показали, що таке технічне рішення демонструє оптимальні показники при короткотерміновому використанні, що робить його особливо привабливим для малопотужних енергетичних систем з потребою у нетривалому зберіганні енергії.

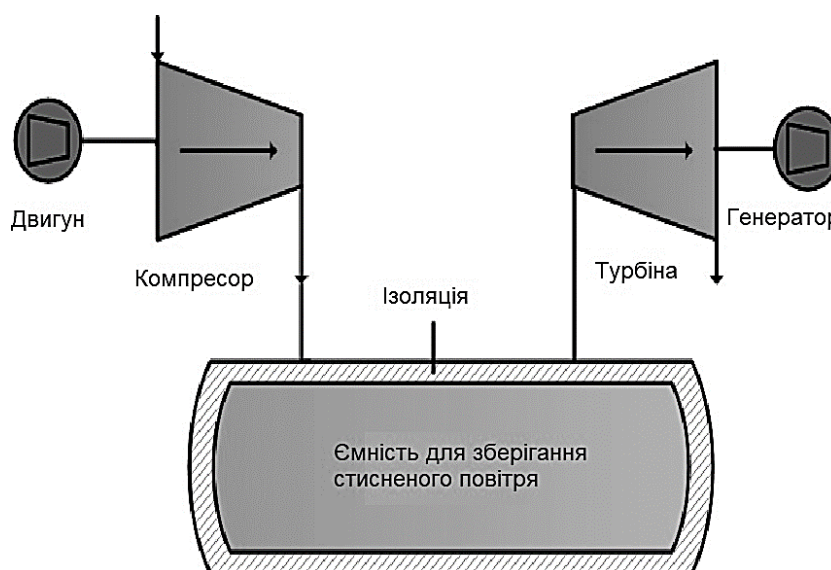


Рисунок 2.3 – Технологічна схема установки із системою акумулювання стисненим повітрям з теплоізовльованим повітряним баком

Категорія III. Ізотермічна технологія накопичення енергії стисненого повітря (I-CAES) розроблена для контролю температурного режиму робочого середовища протягом усього циклу роботи установки. Основною метою цієї системи є запобігання температурним коливанням як під час процесу компресії повітря на етапі заряджання, так і при його розширенні в процесі розряджання енергоустановки. Такий температурний режим досягається завдяки реалізації повільних процесів стиснення та розширення, що забезпечує інтенсивний теплообмін між повітряним середовищем та навколишнім простором, підтримуючи температуру на практично незмінному рівні. Принципова схема функціонування цієї системи, представлена на

рис. 2.4, базується на технології впорскування рідких теплоносіїв (вода, масло) під час фази стиснення з подальшим їх повторним використанням для підігріву повітря перед його надходженням до турбінного агрегату на етапі розширення. Наразі технологія I-CAES знаходиться у стадії активного розвитку, причому основні зусилля дослідників спрямовані на вдосконалення процесів теплопередачі для досягнення вищих показників енергетичної ефективності системи.

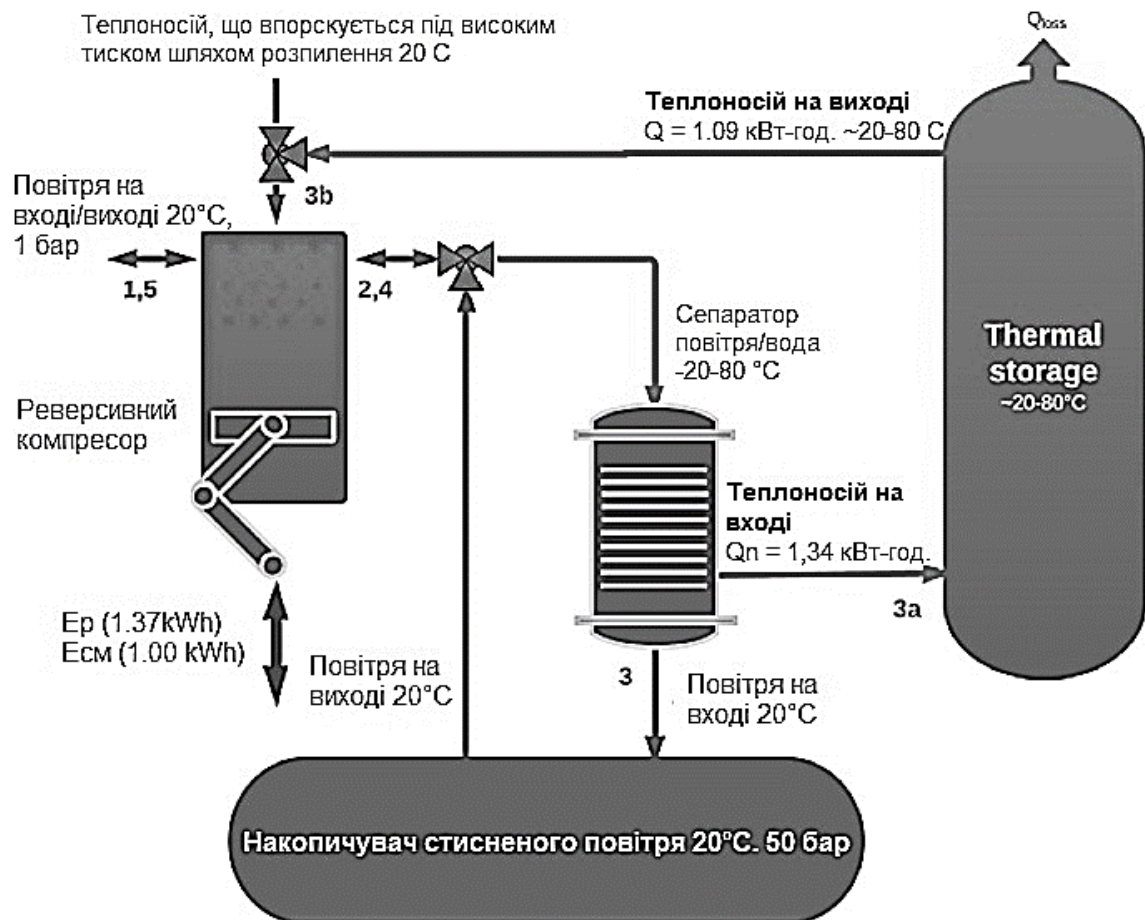


Рисунок 2.4 – Технологічна схема прототипу ізотермічної установки із системою акумулювання стисненим повітрям

Категорія IV. Технологія розподіленого накопичення енергії стисненого повітря (D-CAES) зарекомендувала себе як перспективне рішення для систем розподіленої генерації енергії, використовуючи резервуари високого тиску, що схематично зображено на рис. 2.5. Процес накопичення

енергії може здійснюватися шляхом компресії повітря під час пікового енергопостачання або із залученням відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової. Технологія передбачає зберігання стисненого повітря в спеціальних балонах при тискові до 300 бар, що забезпечує досягнення коефіцієнта корисної дії близько 50%.

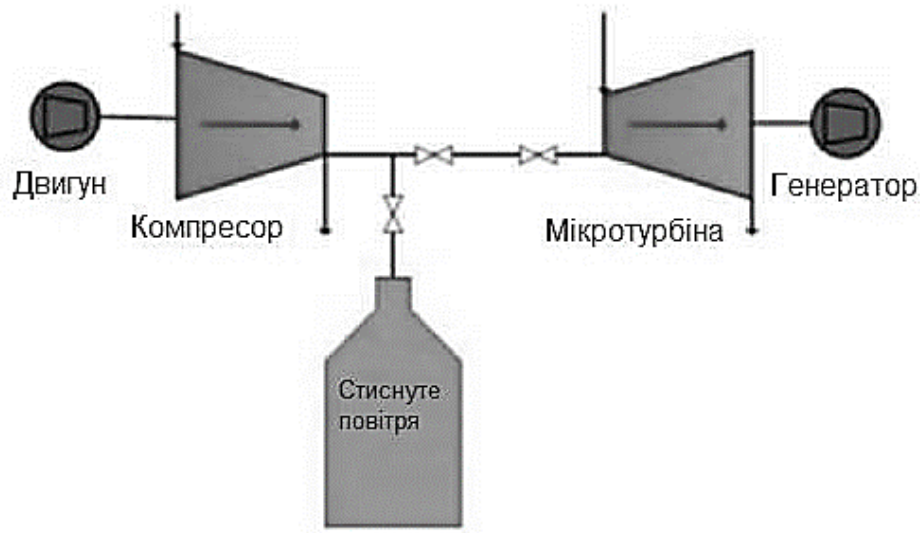


Рисунок 2.5 – Ілюстрація побудови розподіленої системи із системою акумулювання стисненим повітрям (D-CAES)

Система D-CAES відрізняється від інших технологій розподіленої генерації низкою істотних переваг, серед яких варто відзначити високий рівень безпеки експлуатації та екологічність, можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії для забезпечення економічно ефективного електропостачання, мінімальні обмеження щодо розміщення установок та відносну простоту виробництва обладнання. Водночас, технологія має певні обмеження, пов'язані з її недостатнім поширенням у промисловому масштабі, що призводить до невисокої ефективності процесів компресії та розширення повітря, результатом чого є відносно низький загальний коефіцієнт корисної дії системи.

2.3 Конструктивні рішення розширювальних пристроїв для систем розподіленого акумулювання енергії

Ключовим компонентом будь-якої системи розподіленого накопичення енергії стисненого повітря виступає пристрій розширення, функціональне призначення якого полягає у вилученні енергетичного потенціалу робочого середовища та його трансформації в механічну енергію. Малогабаритний розширювач відіграє критично важливу роль у забезпеченні ефективного функціонування системи D-CAES, суттєво впливаючи як на загальну продуктивність установки, так і на економічні показники виробництва електричної енергії. З огляду на це, процес вибору оптимальної конструкції розширювача набуває першочергового значення на етапі проектування енергетичної системи. При визначенні найбільш доцільного типу розширювача необхідно враховувати комплекс технологічних параметрів, включаючи експлуатаційні характеристики термодинамічного циклу, масштаб енергетичної установки та фізико-хімічні властивості робочої речовини. У сфері малопотужних енергетичних систем застосовуються дві категорії розширювачів: швидкісні або динамічні пристрої та об'ємні агрегати, кожен з яких має свої специфічні особливості та сфери оптимального застосування.

Турбінні розширювачі, які також називають турбокомпресорами, реалізують принцип перетворення кінетичної енергії потоку робочого середовища в механічну роботу за допомогою ротора, оснащеного спеціальною системою лопатей. В енергетичному машинобудуванні використовуються два основні конструктивні типи турбін: осьові та радіальні, причому принципи їх функціонування залишаються незмінними незалежно від габаритних розмірів установок. Осьові турбінні агрегати демонструють найвищу ефективність у системах з високими показниками об'ємної витрати робочого тіла при відносно невеликому перепаді тиску. Особливістю їхньої конструкції є осьовий напрямок руху потоку через лопатевий апарат, що забезпечує мінімізацію аеродинамічних втрат та підвищення загального

коефіцієнта корисної дії. Натомість радіальні турбіни знаходять оптимальне застосування в умовах, що характеризуються низькими значеннями масової витрати при значному відношенні тисків. У діапазоні малих потужностей радіальні турбінні установки мають суттєві переваги завдяки зниженим механічним навантаженням, що дозволяє спростити їхню конструкцію, підвищити надійність та досягти вищих показників ефективності порівняно з осьовими аналогами аналогічної потужності.

В сфері малої теплоенергетики, зокрема в мікро-теплоелектроцентралях, широкого поширення набули об'ємні детандери. Ці пристрої найкраще підходять для експлуатації в умовах, які характеризуються низькими показниками масової витрати робочого середовища, помірними швидкостями обертання та високими значеннями вхідного тиску. Технологія об'ємного розширення реалізується у чотирьох основних конструктивних виконаннях, кожне з яких має свої унікальні характеристики та особливості застосування у відповідних експлуатаційних умовах. Завдяки своїм специфічним характеристикам, об'ємні детандери забезпечують ефективне перетворення енергії стисненого середовища в механічну роботу при заданих технологічних параметрах, що робить їх незамінними компонентами сучасних енергетичних установок малої потужності.

1. Серед різноманітних конструкцій об'ємних детандерів спіральний тип розширювача характеризується специфічною особливістю, притаманною всім пристроям об'ємного принципу дії – наявністю фіксованого співвідношення об'ємів. За своїми експлуатаційними характеристиками спіральні розширювачі дещо поступаються турбінним агрегатам у показниках загальної ефективності, що обумовлено підвищеними втратами на тертя рухомих елементів конструкції та значним падінням тиску робочого середовища при проходженні через проточну частину пристрою. Однак, незважаючи на певні обмеження щодо енергетичної ефективності, спіральні розширювачі залишаються затребуваними в специфічних умовах експлуатації, де їхні

конструктивні особливості забезпечують оптимальне співвідношення технічних та економічних показників.

2. У конструкції гвинтового розширювача основним робочим елементом виступає система спарених гвинтових роторів, розміщених в єдиному корпусному елементі. Принцип енергетичного перетворення в такому пристрої базується на динамічній зміні робочого об'єму, що утворюється між взаємодіючими поверхнями роторів під час їхнього обертання. Незважаючи на потенційні переваги такої конструкції, сегмент малопотужних гвинтових розширювачів наразі перебуває на етапі активного технологічного розвитку, що обумовлює їхню обмежену доступність на промисловому ринку енергетичного обладнання. Подальше вдосконалення технології виробництва та оптимізація конструктивних параметрів цих пристроїв спрямовані на підвищення їхньої конкурентоспроможності та розширення сфери практичного застосування в енергетичних системах малої потужності.

3. Серед об'ємних розширювачів поршнева конструкція вирізняється підвищеною конструктивною складністю, що обумовлено необхідністю використання комплексної системи впускних та випускних клапанів для регулювання потоку робочого середовища. Характерною особливістю цього типу розширювачів є наявність зворотно-поступального руху поршня в циліндрі, що супроводжується виникненням значних сил тертя між контактуючими поверхнями цих елементів. Ці фрикційні взаємодії призводять до додаткових енергетичних втрат, які негативно впливають на загальну ефективність термодинамічного циклу енергетичної установки. Проте, незважаючи на зазначені технічні обмеження, поршневі розширювачі знаходять своє застосування в специфічних умовах експлуатації, де їхні унікальні характеристики забезпечують оптимальне співвідношення технологічних та експлуатаційних параметрів.

4. При розробці пневматичних систем особливе місце посідає роторно-лопатевий розширювач, який часто називають пневмодвигунним розширювачем через його принцип роботи на основі стисненого повітря.

Конструктивно цей механізм реалізований таким чином, що енергія стиснутого повітря перетворюється на механічну роботу завдяки системі рухомих лопатей. Важливою перевагою даного технічного рішення є його економічна доцільність – завдяки відносно простій конструкції та нескладному технологічному процесу виготовлення вдається досягти суттєвого зниження виробничих витрат у порівнянні з альтернативними розширювальними пристроями. Така особливість робить роторно-лопатевий розширювач привабливим вибором для багатьох промислових застосувань, де важливе оптимальне співвідношення ціни та функціональності.

Детальну характеристику різних модифікацій розширювачів та їх експлуатаційних показників представлено у табл. 2.2, яка містить вичерпну інформацію щодо ключових параметрів роботи цих пристроїв.

Таблиця 2.2 – Зведені результати огляду основних розширювальних пристроїв

Технологія	Потужність, кВт	Відношення вхідного і вихідного тисків	Коефіцієнт ефективності	Швидкість обертання, об/с
розширювач поршневого типу	0,2...20	2,1...2,4	10,5...65	6...12
розширювач роторно-лопатєвого типу	0,8...2,2	2...24	17,5...55	18...2700
розширювач гвинтового типу	0,5...15,5	2...10	25...70	24...2100
розширювач спірального типу	0,5...3,5	1,5...10,5	10...80	30...300
турбіна радіального типу	0,15...30	1,5...5	30...85	до 6000

Особливу увагу в даному аналітичному огляді приділено такому важливому показнику як потужність, а також іншим технічним характеристикам, що дозволяють оцінити ефективність роботи кожного типу розширювачів у різних умовах експлуатації. Завдяки систематизованим даним можна легко порівняти переваги та обмеження різних конструктивних рішень при виборі оптимального варіанту для конкретного застосування.

2.4 Розробка розподіленої системи акумулювання енергії стисненого повітря для підвищення ефективності локальних енергетичних комплексів

На основі проведеного аналізу, головним завданням дослідження визначено розробку інноваційної системи розподіленої системи генерації РСГ із застосуванням технології акумулювання енергії стисненого повітря CAES, схематичне зображення якої представлено на рис. 2.6.

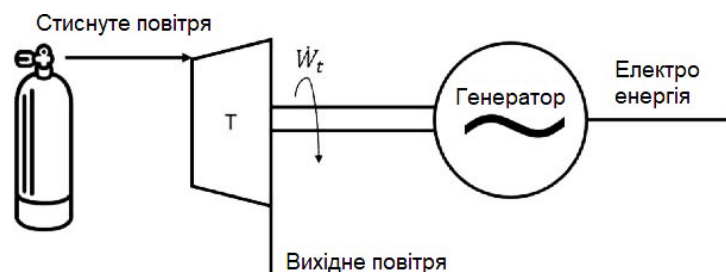


Рисунок 2.6 – Ілюстрація до конфігурації системи розподіленої генерації з використанням стисненого повітря

Враховуючи взаємопроникнення та синергію цих технологічних концепцій, таку комбіновану систему доречно класифікувати як розподілену систему акумулювання енергії стисненого повітря (D-CAES), про що йшлося у попередніх розділах. Технічне рішення передбачає встановлення компактного резервуара для зберігання стисненого повітря, наповнення якого здійснюватиметься за рахунок надлишкової електроенергії від відновлюваних джерел енергії або в періоди перевиробництва. Цей резервуар інтегрується з

малою турбіною для генерації електричної енергії в обмежених обсягах протягом визначених часових проміжків відповідно до потреб споживача.

Як було обґрунтовано в попередньому аналізі, процес накопичення енергії в резервуарі реалізується шляхом використання надлишкової потужності електромережі під час періодів зниженого споживання, а також завдяки інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, зокрема сонячними панелями та вітровими установками, що схематично відображено на рис. 2.7.

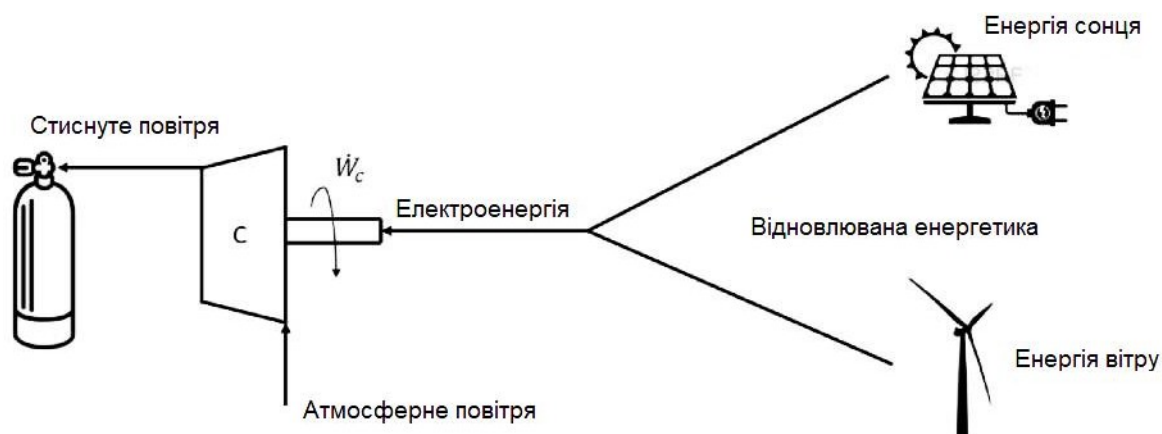


Рисунок 2.7 – Схема заряджання системи

Рішення забезпечує максимально ефективне використання доступних енергетичних ресурсів та дозволяє здійснювати заряджання акумулюючої системи практично без додаткових експлуатаційних витрат. Подібний підхід не лише оптимізує економічні показники системи, але й сприяє підвищенню загальної енергоефективності та екологічності енергетичного комплексу.

З-поміж розглянутого спектру експандерних пристроїв, саме мікротурбінна технологія виявилася оптимальним рішенням завдяки її визначним технічним характеристикам. Головною перевагою малих турбін є їх виняткове співвідношення генерованої потужності до масогабаритних показників, а також високий коефіцієнт корисної дії. Мікротурбінні установки вирізняються компактністю конструкції, що суттєво спрощує їх монтаж та інтеграцію в існуючі енергетичні системи. Варто відзначити підвищену експлуатаційну надійність цих агрегатів, що в поєднанні з мінімальними

витратами на технічне обслуговування та експлуатацію робить їх економічно привабливими. Додатковими перевагами мікротурбін є знижений рівень акустичного навантаження на довкілля та універсальність щодо використання різних видів енергоносіїв, що розширює сферу їх практичного застосування.

Розподілена система акумулювання енергії стисненого повітря (D-CAES) демонструє широкий спектр практичного застосування. Насамперед, вона ефективно вирішує завдання згладжування пікових навантажень в електромережі, що дозволяє оптимізувати витрати на генерацію електроенергії та підвищити загальну енергоефективність системи, одночасно зменшуючи капітальні вкладення в розширення передавальних потужностей.

Важливою сферою застосування D-CAES є забезпечення безперебійного електроживлення критично важливих об'єктів, де система виконує функції джерела безперебійного живлення. При цьому технологія може успішно використовуватися як резервне джерело енергії, що активується за необхідності для підтримки стабільного енергопостачання.

Особливо перспективним напрямком впровадження даної технології є створення портативних енергетичних установок, попит на які стрімко зростає, зокрема у військовій галузі. D-CAES відкриває нові можливості для енергозабезпечення віддалених територій, де будівництво традиційних електричних мереж технічно неможливе або економічно недоцільне через високу вартість порівняно з встановленням розподіленої системи генерації.

Суттєвою перевагою використання мікротурбінних технологій у складі D-CAES є їх паливна гнучкість, що набуває особливого значення при експлуатації у віддалених локаціях. Така універсальність не лише розширює можливості застосування системи, але й забезпечує істотне скорочення інвестиційних витрат на її впровадження.

Висновки до другого розділу

1. Організація довготривалого накопичення енергії з швидким її вивільненням найбільш доцільно реалізується через впровадження технології акумулювання енергії стисненого повітря CAES та використання паливних елементів. Такий підхід демонструє суттєві переваги порівняно з традиційними акумуляторними системами. Подібне технічне рішення забезпечує оптимальний баланс між тривалістю зберігання енергетичного потенціалу та здатністю швидко перетворювати накопичену енергію в електричну при виникненні потреби в додатковій потужності. При цьому досягається вища економічна ефективність та надійність порівняно з батарейними системами зберігання енергії.

2. У результаті інженерних вишукувань запропоновано компактну систему акумулювання енергії на основі стисненого повітря. Конструктивно система складається з малогабаритного резервуара-накопичувача, який інтегрований з компактною мікротурбіною для генерації електричної енергії. Наповнення резервуара здійснюється двома шляхами: за рахунок використання енергії від відновлюваних джерел, таких як сонячні панелі та вітрогенератори, або шляхом акумулювання надлишкової потужності під час періодів зниженого споживання в електромережі. Така конфігурація забезпечує можливість автономного виробництва електроенергії в обмежених обсягах протягом заданих часових інтервалів, що робить систему особливо ефективною для локального енергозабезпечення та згладжування пікових навантажень.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ КОМПРЕСІЙНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1 Розробка математичної моделі системи компресійного накопичення енергії

У представленому розділі розгорнуто математичний опис моделі заснованої на конфігураційних параметрах, детально охарактеризованих у другому розділі дослідження. Першочерговим завданням розробленої моделі є створення доступного інструментарію для комплексної оцінки експлуатаційних характеристик енергетичної установки. Особлива увага приділяється аналізу таких ключових показників як енергетична ефективність системи, сумарний енергетичний вихід та загальна тривалість робочого циклу. Практичну верифікацію запропонованої методології оцінювання продемонстровано на прикладі експериментальної установки, схематичне зображення якої наведено на рис. 3.1. Такий підхід дозволяє не лише теоретично обґрунтувати працездатність системи, але й отримати кількісні характеристики її функціонування в реальних умовах експлуатації.

Методологічний підхід до моделювання системи базується на застосуванні фундаментальних одновимірних рівнянь термодинаміки та механіки рідини із використанням спрощеної моделі ідеального газу. Такий підхід дозволяє сформулювати систему звичайних диференціальних рівнянь, що описують динаміку процесів компресії та експансії повітря в часовому вимірі. Для отримання числових розв'язків складеної системи звичайних диференціальних рівнянь застосовується обчислювальне середовище MATLAB, що забезпечує можливість детального аналізу часової еволюції тиску в накопичувальному резервуарі. Отримані результати розрахунку тиску

служать основою для подальшого визначення інших експлуатаційних параметрів системи, що характеризують її енергетичну ефективність та продуктивність. Такий комплексний підхід до математичного моделювання дозволяє всебічно оцінити характеристики досліджуваної енергетичної установки.

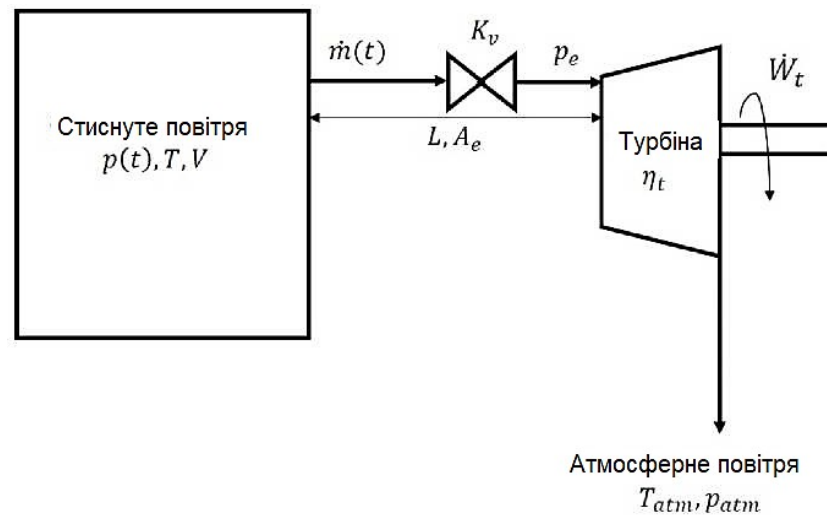


Рисунок 3.1 – Структурна схема енергетичної установки для побудови математичної моделі

В першу чергу необхідно виконати огляд ключових термодинамічних концепцій та базових принципів чисельного моделювання, що закладають теоретичний фундамент для розуміння процесу побудови математичної моделі та методології отримання результатів. Після детального розгляду процедури розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь та їх безпосереднього розв'язку можливим є аналіз отриманих результатів моделювання. Особливу увагу слід приділити обґрунтуванню доцільності вибору конкретних конструктивних параметрів системи та дослідженню їхнього впливу на інтегральні показники ефективності енергетичної установки. Така послідовність викладу матеріалу забезпечує комплексне розуміння взаємозв'язку між проектними рішеннями та експлуатаційними характеристиками розробленої системи.

3.2 Теоретичні основи формування математичного опису процесів компресії в термодинамічних системах

Фундаментальні закони термодинаміки та гідромеханіки формують теоретичне підґрунтя для математичного опису фізичних процесів, досліджуваних у даному розділі. Особливу увагу варто приділити фундаментальним законам збереження – від закону збереження маси до принципів збереження енергії, імпульсу та ентропії системи. Математичне представлення балансу маси в диференціальній формі відображається через рівняння, де розглядаються потоки речовини крізь межі контрольного об'єму, причому вхідні та вихідні параметри позначаються індексами i та e відповідно:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i t - \sum_e \dot{m}_e t. \quad (3.1)$$

Такий підхід дозволяє точно описати динаміку масообміну в досліджуваній системі з урахуванням усіх значущих факторів впливу.

Серед фундаментальних фізичних принципів особливе місце посідає закон збереження імпульсу, який математично виражається рівнянням Нав'є-Стокса. При розгляді одновимірного випадку руху середовища вздовж осі x суттєво спрощується математичний опис процесу. За умови відсутності поперечних складових швидкості та за умови нехтування гравітаційними ефектами, рівняння набуває більш компактної форми. У такому спрощеному представленні основними параметрами виступають поздовжня швидкість потоку U та кінематична в'язкість рідини ν , яка характеризує внутрішнє тертя між шарами середовища:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 U. \quad (3.2)$$

Таке спрощення дозволяє ефективно моделювати широкий спектр практично важливих гідродинамічних процесів, зберігаючи при цьому фізичну достовірність опису явища.

У системі фундаментальних термодинамічних принципів баланс енергії посідає визначальне місце, знаходячи своє відображення у першому законі термодинаміки. Цей універсальний закон природи встановлює кількісні співвідношення між різними формами передачі енергії в системі, враховуючи як теплообмін, так і механічну роботу. Математичне формулювання цього закону через диференціальні рівняння дозволяє точно описати динаміку енергетичних перетворень у кожній точці досліджуваного середовища в довільний момент часу:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{U^2}{2} + gz \right)_i - \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{U^2}{2} + gz \right)_e. \quad (3.3)$$

Такий підхід забезпечує можливість детального аналізу енергетичних процесів, що має критичне значення для практичних інженерних розрахунків та теоретичних досліджень термодинамічних систем різної природи.

В аналізі енергетичного балансу термодинамічної системи ключову роль відіграють два фундаментальні процеси взаємодії з довкіллям. З одного боку, відбувається теплообмін, що характеризується величиною $\dot{Q}$ та відображає передачу теплової енергії між системою та навколишнім середовищем через температурний градієнт. Паралельно система може здійснювати механічну роботу $\dot{W}$ або зазнавати її впливу ззовні, що також впливає на загальний енергетичний стан. Взаємозв'язок між цими величинами визначає напрямок та інтенсивність енергетичних перетворень, дозволяючи прогнозувати зміну стану термодинамічної системи та оцінювати ефективність енергетичних процесів у реальних технічних пристроях та природних явищах.

В ієрархії термодинамічних законів друге начало займає особливе місце, оскільки встановлює фундаментальні обмеження на напрямок природних процесів через принцип збереження ентропії. Математичне формулювання цього закону через диференціальне рівняння дозволяє кількісно описати незворотність реальних термодинамічних процесів та визначити межі їх можливого протікання:

$$\frac{dS}{dt} = \int_A \left(\frac{\dot{q}}{T} \right) dA + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{\sigma}_{cv} \quad (3.4)$$

Цей принцип має глибокий фізичний зміст, вказуючи на тенденцію ізольованих систем до досягнення стану максимальної ентропії, що відповідає термодинамічній рівновазі. В практичному застосуванні розуміння закону збереження ентропії допомагає інженерам та науковцям оптимізувати технологічні процеси, підвищувати ефективність теплових машин та прогнозувати поведінку складних термодинамічних систем.

Дослідження процесів генерації та перенесення ентропії у термодинамічних системах вимагає врахування кількох важливих компонентів. Часова швидкість утворення ентропії, що позначається через $\dot{\sigma}_{cv}$, відображає інтенсивність незворотних процесів, які відбуваються всередині контрольного об'єму системи. Особливу увагу варто приділити механізму теплопередачі, адже саме він визначає перший компонент у правій частині рівняння, характеризуючи динаміку перенесення ентропії внаслідок теплообміну. Такий математичний опис дозволяє кількісно оцінити вплив різноманітних термодинамічних процесів на загальний баланс ентропії системи та визначити ступінь незворотності досліджуваних явищ, що має принципове значення для оптимізації реальних теплових процесів та вдосконалення енергетичних установок.

Для побудови адекватної математичної моделі досліджуваних процесів особливу увагу приділено вибору та опису робочого середовища. В даному випадку розглядається повітря, термодинамічна поведінка якого за умов експлуатації значно нижче критичних параметрів температури та тиску може бути з високою точністю апроксимована моделлю ідеального газу. Такий підхід суттєво спрощує математичний опис системи, оскільки дозволяє використовувати класичне рівняння стану ідеального газу, припускаючи сталість теплофізичних властивостей середовища:

$$pV = mRT. \quad (3.5)$$

де $R = R_0 / M_{\text{пов}} = 287 \text{ Дж/кг*К}$ – повітряна стала

Обґрунтованість такого наближення підтверджується численними експериментальними дослідженнями та теоретичними розрахунками, представленими у фундаментальних працях з термодинаміки газових середовищ. Цей підхід забезпечує достатню точність розрахунків при збереженні відносної простоти математичного апарату.

3.3 Чисельні методи рішення звичайних диференціальних рівнянь

При моделюванні процесів у різноманітних сферах науки і техніки архіважливу роль відіграють звичайні диференціальні рівняння. Характерною особливістю більшості практично значущих ЗДР є неможливість отримання точних аналітичних розв'язків, що зумовлює необхідність застосування чисельних методів для пошуку наближених рішень. Особливий інтерес представляють диференціальні рівняння першого порядку, де основною метою є визначення функції u , що задовольняє певним математичним умовам:

$$\frac{du}{dt} = f(t, u) \quad \text{при } t \in \Omega \subset \mathbb{R} \quad (3.6)$$

Такі рівняння дозволяють описувати динаміку багатьох природних та технологічних процесів, враховуючи взаємозв'язок між швидкістю зміни досліджуваної величини та її поточним значенням.

При дослідженні звичайних диференціальних рівнянь принципового значення набуває питання єдиності розв'язку. Додатковою математичною умовою, що забезпечує унікальність шуканої функції, виступає задання її значення u_0 у конкретній точці t_0 досліджуваної області. Саме від цієї опорної точки починається побудова розв'язку для всього діапазону змінної t . Оскільки в більшості практичних застосувань незалежна змінна t інтерпретується як часова координата, такий клас математичних проблем отримав назву задач з початковими умовами або задач Коші. Цей підхід

дозволяє моделювати еволюцію динамічних систем, починаючи з деякого відомого початкового стану, що має фундаментальне значення для прогнозування поведінки різноманітних природних та технічних об'єктів.

Розв'язання диференціальних рівнянь у більшості практичних випадків здійснюється шляхом дискретизації неперервного часового проміжку. Такий підхід передбачає розділення часової області на окремі точки, відстань між якими визначається часовим кроком Δt_i , що представляє різницю між послідовними моментами часу t_{i+1} та t_i . Для спрощення математичних обчислень зазвичай приймається припущення про сталість часового кроку, позначеного як $\Delta t = h$. Подальший математичний аналіз базується на інтегруванні обох частин вихідного рівняння в межах часового інтервалу від t до $t+h$. Такий метод дискретизації дозволяє перетворити диференціальне рівняння у форму, придатну для чисельного розв'язання, що особливо важливо при моделюванні складних фізичних процесів та інженерних систем:

$$u(t+h) = u(t) + \int_t^{t+h} f(\xi, u(\xi)) d\xi. \quad (3.7)$$

У процесі математичного аналізу диференціальних рівнянь виникає характерна проблема, пов'язана з наявністю шуканої функції u під знаком інтеграла. Ця особливість створює суттєві труднощі при спробах безпосереднього обчислення інтегралу, оскільки сама функція u є невідомою величиною, яку потрібно визначити. Для подолання цієї математичної складності вводиться спеціальне позначення $F_h(t, u)$, що представляє наближене значення відповідного інтегралу. Такий підхід відкриває можливість побудови апроксимаційної схеми для знаходження значень функції u в дискретних точках часової області. Використання подібної апроксимації дозволяє трансформувати початкову неперервну задачу у послідовність обчислювальних кроків, що робить можливим її практичне розв'язання за допомогою комп'ютерних алгоритмів.

$$u_{i+1} = u_i + h F_h(t_i, u_i). \quad (3.8)$$

При розв'язанні чисельних інтегралів та обчисленні значень функції u у різних точках заданої області можна застосувати один із найбільш фундаментальних підходів – методологію Ейлера. Сутність цього математичного прийому полягає в розподілі досліджуваної області на N дискретних точок, розташованих на однаковій відстані h одна від одної. Процес обчислення інтегралу реалізується шляхом застосування принципу прямокутного інтегрування, який передбачає два можливі варіанти реалізації. Такий метод дозволяє отримати наближені значення шуканої функції з достатньою для багатьох практичних застосувань точністю. Важливо зазначити, що точність результатів безпосередньо залежить від обраного кроку дискретизації h та кількості точок розбиття N , що дає можливість контролювати похибку обчислень шляхом їх коригування.

1. Чисельне інтегрування за допомогою явної схеми Ейлера базується на апроксимації шуканої величини з використанням попередньо обчисленого значення функції у точці n :

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(\xi, u(\xi)) d\xi \approx hf(t_n, u(t_n)). \quad (3.9)$$

2. Неявна схема чисельного інтегрування Ейлера, відома також як метод формул зворотного диференціювання, характеризується принципово іншим підходом до апроксимації інтегралу. У цьому випадку обчислення базується на використанні значення функції у майбутній точці з індексом $n+1$, що надає методу особливі властивості стійкості при розв'язанні жорстких систем диференціальних рівнянь:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(\xi, u(\xi)) d\xi \approx hf(t_{n+1}, u(t_{n+1})). \quad (3.10)$$

Особлива цінність неявного методу Ейлера полягає в його безумовній стійкості, яка не залежить від обраного часового кроку інтегрування. Проте суттєвим ускладненням виступає необхідність розв'язання рівняння на кожному кроці ітерації, що при нелінійності системи може значно підвищити обчислювальну складність процесу.

Методи Ейлера, незважаючи на їхню поширеність, забезпечують точність лише першого порядку. Для розв'язання нежорстких звичайних диференціальних рівнянь більш доцільним є застосування методів Рунге-Кутта. Ці математичні інструменти, хоча й належать до категорії покрокових методів, відрізняються необхідністю виконання декількох проміжних обчислень протягом кожної ітерації. Підвищена точність результатів досягається певною втратою обчислювальної ефективності порівняно з методами Ейлера. Найбільш широко використовуваний варіант - метод Рунге-Кутта четвертого порядку - потребує чотириразового обчислення функції f на кожному часовому кроці. Подальше підвищення порядку точності, наприклад до п'ятого, виявляється малоефективним через необхідність шестиразового обчислення функції f на кожній ітерації. Таким чином, вибір конкретного чисельного методу інтегрування має базуватися на збалансуванні вимог до точності розв'язку та доступних обчислювальних ресурсів.

Вирішення звичайних диференціальних рівнянь порядку вищого за перший потребує особливого підходу до їх чисельного розв'язання. Найбільш ефективною та широко застосовуваною методикою у таких випадках є трансформація звичайного диференціального рівняння підвищеного порядку в еквівалентну систему звичайних лінійних рівнянь першого порядку.

Такий математичний прийом дозволяє звести складну задачу до послідовності простіших обчислень, що значно спрощує процес знаходження розв'язку. Цей метод редукції порядку має особливу цінність у практичних застосуваннях, оскільки дозволяє використовувати вже розроблені та добре вивчені алгоритми для систем першого порядку. Варто відзначити, що при такому перетворенні зберігаються всі ключові характеристики початкової задачі, включаючи фізичний зміст шуканих величин.

Розглянемо задачу у вигляді:

$$\frac{d^n u}{dt^n} = f\left(t, u, \frac{du}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}}\right). \quad (3.11)$$

за наступних початкових умовах:

$$\begin{cases} u(t_0) = u_0 \\ u'(t_0) = u'_0 \\ \dots \\ u^{(n-1)}(t_0) = u_0^{(n-1)} \end{cases} \quad (3.12)$$

Приймаючи $u_1 = u$ застосовується слідує перетворення:

$$\begin{cases} u' t = u_2 t \\ u_2' t = u_3 t \\ \dots \\ u_{n-1}' t = u_n t \\ u_n' t = f(t, u_1 t, u_2 t, \dots, u_{n-1} t) \end{cases} \quad (3.13)$$

Вивчення систем звичайних диференціальних рівнянь розкриває цікаву особливість: компоненти розв'язку часто демонструють суттєво відмінну динаміку, де стрімкі перехідні процеси співіснують з повільнішими еволюційними змінами. Це явище породжує феномен жорсткості системи, коли парадоксальним чином саме швидкоплинні, часом менш значущі компоненти розв'язку, диктують необхідний розмір часового кроку інтегрування. Математична задача класифікується як жорстка у випадках, коли шуканий розв'язок характеризується повільною зміною, проте в безпосередній близькості існують розв'язки зі швидкою динамікою. За таких умов чисельний метод змушений оперувати малими кроками для досягнення прийнятної точності результатів. Важливо розуміти, що жорсткість насамперед впливає на ефективність обчислень: хоча нежорсткий алгоритм теоретично здатний розв'язати жорстку задачу, практична реалізація такого підходу потребуватиме значних часових витрат.

При розв'язанні жорстких систем диференціальних рівнянь найбільшого поширення набули формули зворотного диференціювання. Їхня привабливість

полягає у надзвичайно простій структурі при використанні фіксованого кроку та зворотних різниць, що робить їх зручними для практичного застосування.

Формули Розенброка представляють альтернативний підхід до розв'язання жорстких систем. Їх відносять до категорії лінійно неявних методів, оскільки знаходження значення u_{n+1} потребує рішення системи лінійних рівнянь. Специфічною особливістю цього методу є необхідність обчислення похідної функції f на початковому етапі кожного кроку. Саме ця вимога щодо обчислення якобіана стимулювала розробку модифікованих формул Розенброка, ключовою перевагою яких стала незалежність від наявності точного якобіана. Значущість цих математичних інструментів полягає у їхній здатності ефективно долати проблеми жорсткості, забезпечуючи прийнятний баланс між точністю та обчислювальними витратами. Розвиток методів у напрямку зменшення залежності від точного якобіана дав нові можливості для чисельного моделювання складних систем.

В середовищі MATLAB для розв'язання окремих диференціальних задач було обрано спеціалізований розв'язувач `ode23s`, який базується на модифікованих формулах Розенброка. Цей вибір обґрунтований його підвищеною ефективністю та стабільністю при роботі з жорсткими системами порівняно з методами, заснованими на формулах зворотного диференціювання.

Особлива цінність `ode23s` проявляється при розв'язанні задач, де якобіани характеризуються власними значеннями, розташованими поблизу уявної осі. Результати всебічного тестування різноманітних чисельних методів підтвердили його виняткову ефективність серед доступних розв'язувачів. Практичне застосування цього інструменту продемонструвало оптимальне поєднання швидкодії, точності та стійкості обчислень, що робить його ідеальним вибором для розв'язання специфічних жорстких диференціальних рівнянь.

3.4 Термодинамічна модель

При дослідженні динаміки заряджання та розряджання резервуарів стисненого повітря виділяють два принципово різних режими процесу: адіабатичний та ізотермічний. Адіабатичний режим характерний для швидкоплинних процесів, коли теплообмін з навколишнім середовищем не встигає реалізуватися повною мірою. Натомість ізотермічний режим спостерігається при довготривалих процесах, де відбувається достатній теплообмін, що призводить до встановлення температурної рівноваги між повітрям у резервуарі та навколишнім середовищем.

Для обґрунтованого вибору математичної моделі було проведено спеціальне дослідження особливостей теплопередачі в резервуарі. Ключовим параметром виступає характерний час теплопередачі, який порівнюється з планованою тривалістю роботи системи. У випадках, коли характерний час теплопередачі перевищує час функціонування системи, процес класифікується як швидкий, що обґрунтовує застосування адіабатичного наближення. Протилежна ситуація, коли характерний час теплопередачі менший за робочий період системи, вказує на доцільність використання ізотермічного наближення. Такий підхід до моделювання дозволяє адекватно відображати фізичну сутність процесів та отримувати надійні результати розрахунків.

При аналізі термодинамічної системи, зображеної на рис. 3.2, розглядається резервуар неадіабатичного типу, заповнений стисненим повітрям, де спостерігається процес теплообміну з навколишнім середовищем. Початковий стан системи характеризується температурою T_0 всередині резервуара, а кінцевою метою є визначення закономірності зміни температури до досягнення рівноважного стану з температурою навколишнього середовища T_{amb} .

Особливістю даного процесу є напрямок теплового потоку від резервуара до навколишнього середовища, що математично виражається від'ємним значенням теплового потоку Q . Цей теплообмін призводить до

поступового охолодження стисненого повітря в резервуарі. Важливо відзначити, що швидкість зміни температури залежить від різниці температур між вмістом резервуара та навколишнім середовищем, а також від теплофізичних характеристик системи.



Рисунок 3.2 – Схема термодинамічної системи з неізолюваним резервуаром

Якщо розглянути основне термодинамічне співвідношення, абстрагуючись від впливу кінетичної складової та гравітаційного потенціалу системи, математичне перетворення виразу 3.3 приводить до такого рівняння енергетичного балансу:

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} um = mc_v \frac{dT}{dt} . \quad (3.14)$$

При розгляді процесу теплообміну варто зазначити, що інтенсивність передачі теплової енергії безпосередньо корелює із загальним коефіцієнтом теплопередачі U_c . Математична залежність цих величин визначає фундаментальний характер теплового потоку через поверхню теплообміну. Такий взаємозв'язок є ключовим для розуміння механізмів теплопередачі та дозволяє кількісно описати процес перенесення теплової енергії між середовищами з різними температурами. Цей коефіцієнт враховує всі види теплообміну та особливості конструкції теплообмінного обладнання, що робить його універсальним параметром для інженерних розрахунків.

$$\dot{Q} = -AU_c (T - T_{atm}) . \quad (3.15)$$

- величина A представляє собою загальну площу поверхні теплообмінного резервуару, через яку відбувається передача теплової енергії. Комплексний параметр U_c , який називають глобальним коефіцієнтом тепловіддачі, охоплює всі механізми теплопередачі: внутрішній конвективний теплообмін між рідиною та стінкою, теплопровідність крізь матеріал стінки резервуару, а також зовнішню конвекцію. При розрахунку цього коефіцієнта приймається припущення про рівність площ внутрішньої та зовнішньої поверхонь теплообміну, що виправдано для тонкостінних конструкцій та дозволяє спростити математичний апарат без значної втрати точності обчислень.

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{out}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{in}} . \quad (3.16)$$

Враховуючи всі вищезазначені співвідношення та залежності, маємо можливість сформулювати диференціальне рівняння, що описує динаміку зміни температури всередині досліджуваного резервуару. Шляхом відповідних математичних перетворень та алгебраїчних маніпуляцій з членами рівняння, здійснюючи їх перегруповування відносно шуканої величини температури, отримуємо остаточну форму диференціального рівняння. Це рівняння слугує математичною моделлю теплового стану системи та дозволяє прогнозувати температурні зміни в резервуарі за заданих граничних умов:

$$-\frac{AU_c}{mc_v} dt = \frac{dT}{T - T_{amb}} . \quad (3.17)$$

Застосовуючи метод інтегрування до обох частин отриманого диференціального рівняння температурного режиму, вдається визначити аналітичний розв'язок, який демонструє експоненціальний характер температурних змін у системі. Математичне вираження цієї залежності відображає фундаментальну природу процесу теплообміну, де швидкість зміни температури пропорційна різниці температур між середовищами. Такий експоненціальний закон є типовим для процесів теплової релаксації та часто

зустрічається в задачах нестационарного теплообміну, дозволяючи передбачити температуру в будь-який момент часу за відомих початкових умов.

$$T(t) = T_{amb} + (T_o - T_{amb}) e^{\left(-\frac{AU_c t}{mc_v}\right)}. \quad (3.18)$$

Ретельний аналіз отриманого експоненціального виразу виявляє важливий множник $AU_c/(mc_v)$, що міститься в показнику експоненти. Цей параметр має особливе фізичне значення, оскільки представляє величину, обернену до характерного часу розпаду t_{dec} . Саме цей час характеризує швидкість температурного спаду системи, показуючи період, за який температура досягає приблизно 36,8% (що відповідає математичній константі $1/e$) від початкового значення. Практичне значення цього параметра стає визначальним при виборі відповідної термодинамічної моделі для подальших розрахунків. У випадках, коли характерний час розпаду вимірюється секундами, доцільно застосовувати ізотермічну модель, особливо якщо пріоритетом є досягнення тривалого часу функціонування системи. Натомість при значних величинах часу розпаду більш адекватним стає використання адіабатичного наближення, яке краще описує поведінку системи.

Для практичної оцінки характерного часу розпаду розглянемо конкретний приклад з резервуаром кубічної форми. При заданому об'ємі один кубічний метр такий резервуар матиме загальну площу теплообмінної поверхні шість квадратних метрів. Враховуючи відносно малу товщину стінок резервуара, приблизно один сантиметр, припущення про рівність площ внутрішньої та зовнішньої поверхонь є цілком обґрунтованим. Для розрахунків використовуємо типові теплофізичні параметри: коефіцієнт конвективної тепловіддачі приймається рівним $25 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, що відповідає умовам природної конвекції повітря згідно з літературними даними. Теплопровідність матеріалу резервуара береться 20 Вт/мК , що є характерним показником для нержавіючої сталі. Використовуючи ці вихідні дані можна кількісно оцінити характерний час температурного розпаду системи:

$$t_{dec} = \frac{mc_v}{AU_c} = \frac{\rho V c_v}{AU_c} . \quad (3.19)$$

рівняння дає характерне значення часу десятки секунд.

На підставі проведених обчислень та з урахуванням необхідності забезпечення тривалої роботи системи протягом мінімум 0,5 години, найбільш доцільним виявляється застосування ізотермічної моделі для опису термодинамічних процесів. Така модель адекватно відображає реальні умови функціонування системи, оскільки тривалий період роботи створює можливість для ефективного теплообміну з навколишнім середовищем, що природним чином стабілізує температуру повітря на майже сталому рівні. Експериментальні дослідження надають переконливе підтвердження правильності такого вибору, демонструючи, що при тривалій експлуатації як процеси заряду, так і розряду системи характеризуються поведінкою, значно ближчою до ізотермічної, ніж до адіабатичної. Це пояснюється достатністю часу для встановлення теплової рівноваги з навколишнім середовищем.

Розглядаючи практичні аспекти реалізації системи, важливо відзначити технічні обмеження щодо створення повністю адіабатичних умов у резервуарі. Навіть за умови теоретичної можливості моделювання процесів як адіабатичних, реальна експлуатація системи, яка передбачає довготривале зберігання стисненого повітря впродовж кількох тижнів чи місяців, неминуче супроводжується теплообміном із навколишнім середовищем. Цей природний процес призводить до поступового зниження як температурних показників, так і тиску робочого середовища. Також в першому розділі роботи наведено результати досліджень систем накопичення енергії стисненим повітрям (CAES), які демонструють найвищу ефективність саме за умови забезпечення значних коефіцієнтів теплопередачі, що наближає термодинамічні процеси до ізотермічного режиму функціонування.

Досягнення квазіізотермічного режиму роботи системи може відбуватися як природним шляхом, так і через примусове охолодження

повітря теплообмінним обладнанням. Підтримання температури стисненого повітря на рівні навколишнього середовища в режимі квазіізотермічного процесу надає суттєві переваги з точки зору енергоефективності. Такий підхід дозволяє уникнути небажаних теплових втрат під час зберігання енергії та оптимізувати енергетичні затрати на стиснення одиниці маси повітря, що наочно продемонстровано на рис. 3.3, а. Додатковою перевагою, яку ілюструє рис. 3.3, б, є можливість акумулювання більшої маси повітря при однаковому кінцевому тиску завдяки підтриманню нижчої температури. Проте необхідно враховувати, що ізотермічне зберігання має певний недолік: при розширенні повітря через турбіну його нижча температура призводить до зменшення генерованої потужності, що потенційно може негативно вплинути на загальну енергетичну щільність акумулюючої системи.

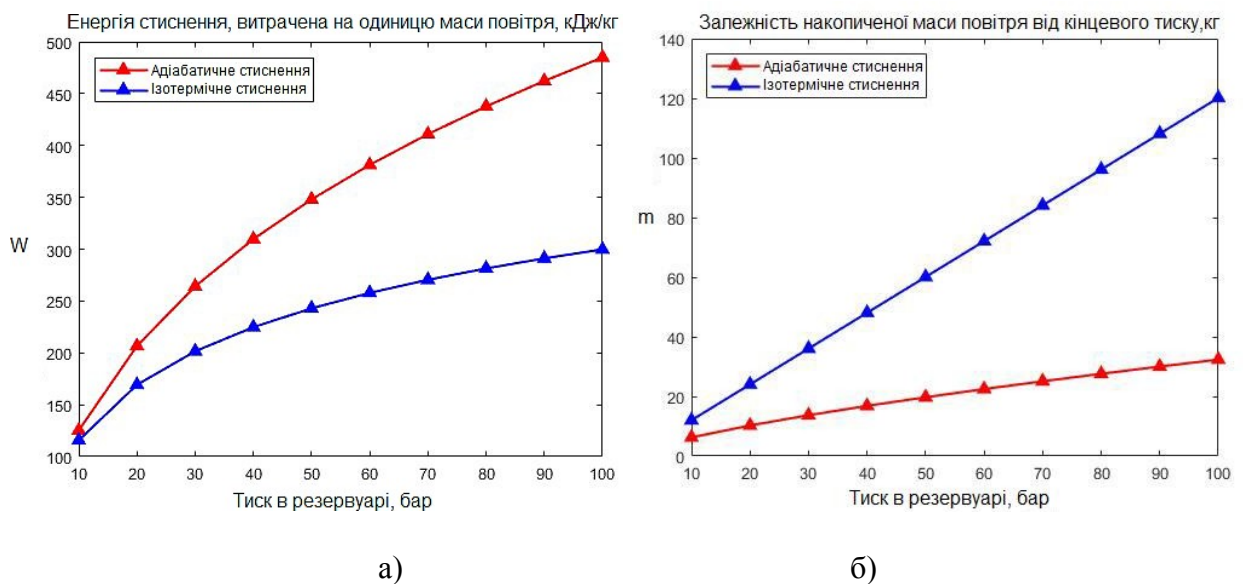


Рисунок 3.3 – Графіки залежності питомого значення енергії стиснення повітря (а) та маси накопиченого повітря (б) від тиску в резервуарі при адіабатичному та ізотермічному процесах

Висновки до третього розділу

1. Розроблено та практично верифіковано математичну модель системи компресійного накопичення енергії, що базується на рівняннях термодинаміки та реалізована в MATLAB. Модель дозволяє оцінити ефективність системи та обґрунтувати вибір її конструктивних параметрів в реальних умовах експлуатації.

2. Представлено теоретичні основи математичного моделювання процесів компресії через фундаментальні закони термодинаміки та гідромеханіки. Модель базується на рівняннях збереження маси, імпульсу, енергії та ентропії, а робоче середовище (повітря) описується рівнянням стану ідеального газу. Це забезпечує точний опис термодинамічних процесів при збереженні відносної простоти математичного апарату.

3. Розглянуто методи чисельного розв'язання звичайних диференціальних рівнянь, включаючи явний та неявний методи Ейлера та методи Рунге-Кутта. Для вирішення жорстких систем рівнянь обрано розв'язувач ode23s в середовищі MATLAB, що базується на модифікованих формулах Розенброка, який забезпечує оптимальний баланс між точністю, швидкодією та стійкістю обчислень.

4. Досліджено термодинамічні процеси в системі накопичення енергії стисненим повітрям. На основі розрахунку характерного часу теплопередачі (десятки секунд) та необхідності тривалої роботи системи (понад 0,5 години) обґрунтовано вибір ізотермічної моделі. Показано, що ізотермічний режим забезпечує нижчі енергетичні затрати на стиснення та більшу масу накопиченого повітря порівняно з адіабатичним процесом, хоча й характеризується меншою потужністю при розширенні через нижчу температуру.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1 Моделювання динаміки заряджання ємності з акумулюючим агентом

Для кількісного визначення енергетичних затрат на процес стиснення повітря та його подачу в напірний резервуар необхідно розробити математичну модель цього процесу. Першочерговим завданням цього підрозділу є виведення рівняння, що дозволить обчислити сумарну роботу, витрачену під час компресії. Розглядаючи конфігурацію системи, схематично зображену на рис. 4.1, початкові параметри в резервуарі відповідають атмосферним умовам, тобто температурі T_{atm} та тиску p_{atm} .

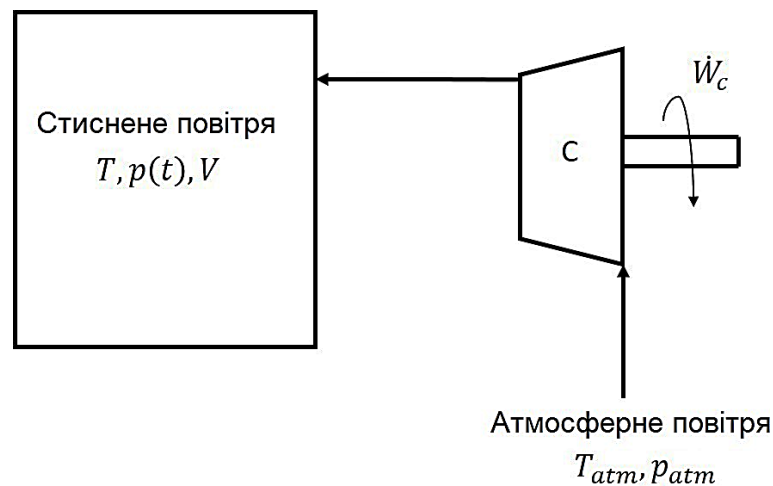


Рисунок 4.1 – Схема термодинамічної системи для опису динаміки накопичення агента в резервуарі

Для отримання шуканого рівняння застосовується методика послідовного аналізу перехідних балансів маси та енергії системи з подальшим інтегруванням отриманих виразів в межах від початкових умов до

кінцевого стану, який характеризується досягненням заданого рівня тиску в резервуарі. Для приведеної на рис. 4.1 схеми рівняння балансу маси виглядає:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i . \quad (4.1)$$

Якщо знехтувати вплив кінетичної та потенціальної енергій, то рівняння балансу потужності виражатиметься наступним чином:

$$\frac{d}{dt} um = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i . \quad (4.2)$$

де значення величини ентальпії h_i стосується до повітря, що береться з атмосфери оточуючого середовища.

Підставивши вираз (4.2) та з урахуванням моделі ідеального газу ($du = c_v dT$ і $dh = c_p dT$) приходимо до наступного виразу:

$$\frac{d}{dt} mc_v T = \dot{Q} - \dot{W} + \frac{dm}{dt} c_p T_{atm} . \quad (4.3)$$

Вираз 4.3 можливо спростити, якщо зауважити сталість теплоємностей та температури акумулюючого агента в резервуарі, тоді отримаємо:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dm}{dt} c_v T - c_p T_{atm} . \quad (4.4)$$

Будемо в подальших розрахунках вважати наближену рівність між температурами повітря оточуючого середовища та в резервуарі та їхню сталість $T = T_{atm}$, з урахуванням рівняння стану ідеального газу 3.5, та використовуючи рівність $c_p - c_v = R$ отримаємо:

$$-\dot{W} = V \frac{dp}{dt} - \dot{Q} . \quad (4.5)$$

Значення повної роботи витраченої на стиснення акумулюючого агента можна отримати шляхом інтегрування рівняння 4.5:

$$-W_c = -V p_2 - p_1 - Q . \quad (4.6)$$

Оскільки в процесі стиснення виконана робота буде від'ємною, то робота стиснення повинна бути виражена через її абсолютне значення.

Слідуючим етапом треба визначити величину переданої від системи теплоти. Для цього використовуючи вираз 3.4 для балансу ентропії в припущенні оборотності процесу, що дозволяє спростити вираз:

$$\frac{d}{dt} sm = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m}_i s_i. \quad (4.7)$$

Застосувавши до виразу 4.7 інтегрування в припущенні що початкові умови стану агента в резервуарі співпадають з атмосферними ($s_1 = s_2$) маємо:

$$\frac{Q}{T} = m_2 s_2 - s_i = \frac{p_2 V}{RT} \left[c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_{atm}} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_{atm}} \right) \right] \Rightarrow Q = -p_2 V \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right). \quad (4.8)$$

Виконавши підстановку отриманого виразу в рівняння Підставивши цей результат у рівняння (4.6) маємо значення повної роботи стиснення:

$$W_c = V \left[p_2 - p_1 + p_2 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right]. \quad (4.9)$$

Необхідно розглянути питання про зворотність даного процесу, адже це не завжди очевидно з першого погляду. Теплопередача може вважатися зворотною лише за умови, що відбувається при мінімальних відмінностях у показниках температури та тиску. Враховуючи необхідність підтримки сталої температури резервуару на рівні довкілля, виникнення ентропії через температурні перепади практично не відбувається. Проте зростання тиску всередині резервуару протягом процесу потенційно спричиняє генерацію ентропії. Незважаючи на це, процес можна класифікувати як зворотний за умови його достатньої повільності – коли підвищення тиску відбувається настільки поступово, що запобігає значним флуктуаціям, здатним породжувати ентропію. Таким чином, аналізуючи стан квазі-рівноваги між системою та середовищем при поступовому нарощуванні тиску, допустимо застосовувати модель зворотного процесу. Хоча такий підхід не є абсолютно точним відображенням дійсності, він надає можливість оцінити загальну роботу компресії, потрібну для заповнення резервуару.

На основі математичної залежності 4.9 проведено параметричне дослідження процесу стиснення повітря при варіюванні кінцевого тиску в діапазоні 10...100 бар та об'єму резервуара від 0,2 м³ до 1,0 м³. Графічна візуалізація залежності сумарної роботи стиснення від цих параметрів представлена на рис. 4.2.

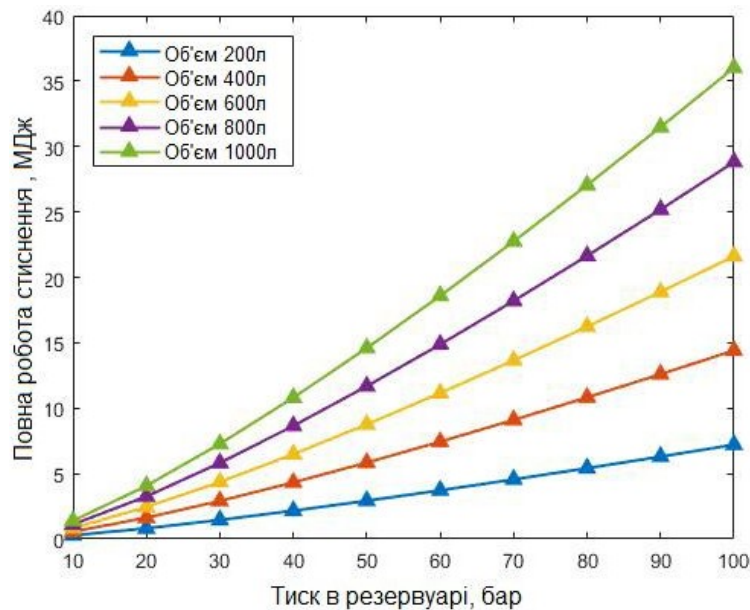


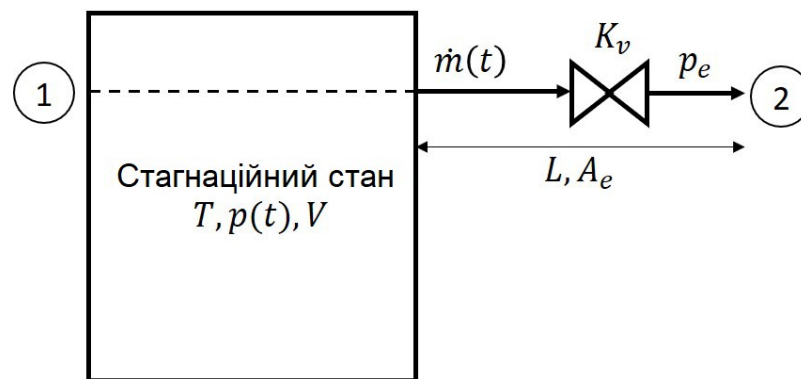
Рисунок 4.2 – Залежність повної роботи стиснення від тиску в резервуарі

Проведений аналіз дозволяє зробити важливий висновок щодо часових характеристик процесу: при використанні компресорного обладнання з відносно невеликою потужністю (10 кВт), тривалість заповнення резервуара може сягати години. При цьому загальна енергія стиснення досягає значень порядку мегаджоулів. Такий тривалий період заповнення значно перевищує характерний час теплового розсіювання, розрахований у попередньому розділі, що підтверджує правомірність припущення про ізотермічний характер процесу при використанні компресорів малої потужності.

Отримані результати мають особливе значення в контексті розробки портативних систем, оскільки застосування компресорів малої потужності повністю відповідає концепції мобільності та компактності обладнання, що є ключовою вимогою для таких систем.

4.2 Моделювання динаміки розрядження ємності з акумулюючим агентом

Після етапу акумулювання стисненого повітря в резервуарі починається процес його подачі під сталим тиском до турбіни для генерації механічної потужності на валу сполученого з електрогенератором. Структура системи для складання математичної моделі процесу нагнітання схематично зображена на рис. 4.3, базується на кількох фундаментальних припущеннях, що дозволяють спростити розрахунки без суттєвої втрати точності результатів.



T – абсолютна температура в резервуарі; p(t) – тиск повітря в резервуарі в момент часу t, V – об'єм резервуару; $\dot{m}(t)$ – масова витрата акумулюючого агента; L – довжина вихідного трубопроводу, A_e – площа поперечного перерізу випускного каналу, K_v – коефіцієнт редукції, p_e – вихідний тиск, 1 – початковий стан параметрів, 2 – кінцевий стан параметрів

Рисунок 4.3 – Схема термодинамічної системи для опису динаміки спрацювання акумулюючого агента та роботи регулятора тиску

Першим ключовим припущенням для моделювання є умова термодинамічної рівноваги повітря в резервуарі з навколишнім середовищем, при якій температура підтримується на постійному рівні 290 Кельвінів.

Другою важливою умовою моделювання є нехтування швидкістю руху повітря всередині резервуара, що дозволяє розглядати його як середовище в стані стагнації.

В якості третього спрощення прийнято одновимірний характер течії робочого тіла, що передбачає відсутність значущих змін параметрів потоку в напрямках, перпендикулярних основному руху, тобто вздовж координат y, z .

Починаючи з рівняння Нав'є-Стокса вздовж напрямку x , рівняння 3.2 та зауваживши рівність $U \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial U^2}{\partial x}$, виконуючи інтегрування рівняння Нав'є-Стокса в напрямку осі x (від позиції 1 до позиції 2 відповідно до рис. 4.3) маємо:

$$\int \frac{\partial U}{\partial t} dx + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = \int \nu \nabla^2 U dx. \quad (4.10)$$

Останній вираз еквівалентний нестационарному рівнянню Бернуллі за умов нев'язкої течії (права частина рівняння рівна нулю). Його можливо виразити через втрату напору та має розмірність квадрата швидкості:

$$\int \nu \nabla^2 U dx = -K_v \frac{U^2}{2}. \quad (4.11)$$

Характер гідравлічних втрат у клапанному механізмі фактично визначається перепадом тиску між його входом та виходом. Проте з метою спрощення математичного опису та полегшення розв'язання системи нелінійних параметричних рівнянь приймається припущення про сталість значення втрати напору протягом всього періоду експлуатації системи (фази розряджання ємності з акумулюючим агентом).

Враховуючи прийняте раніше припущення про незначну швидкість руху середовища в резервуарі та геометричну особливість вихідного трубопроводу довжиною L , а саме його постійний поперечний переріз, можна прийняти незмінність швидкості потоку як вздовж довжини труби, так і в часі. Такий підхід до моделювання гідродинамічних процесів дозволяє суттєво спростити математичний апарат без критичної втрати точності кінцевих результатів розрахунку. Відповідний вираз матиме вигляд:

$$\int_1^2 \frac{\partial U}{\partial t} dx \approx L \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (4.12)$$

Врахувавши рівняння стану для ідеального газу та сталість температури агента в резервуарі вираз 4.12 можна подати у формі:

$$\int_p^{p_e} \frac{dp}{\rho} = RT \int_p^{p_e} \frac{d\rho}{\rho} = RT \ln\left(\frac{p_e}{p}\right) = RT \ln\left(\frac{\rho_e}{\rho}\right). \quad (4.13)$$

Після підстановки 4.13 у вираз 4.10 та відповідних спрощень маємо:

$$L \frac{dU}{dt} + RT \ln\left(\frac{\rho_e}{\rho}\right) + \left(\frac{1+K_v}{2}\right) U^2 = 0. \quad (4.14)$$

Застосовуючи до системи рівняння балансу маси отримаємо вираз, що пов'язує тиск в резервуарі із швидкістю витоку акумулюючого агента:

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{m} \Rightarrow V \frac{d\rho}{dt} + \rho_e A_e U = 0. \quad (4.15)$$

Виконавши відповідні математичні перетворення із виразу (4.15) можна отримати математичні вирази для швидкості потоку та її першої похідної:

$$U = -\frac{V}{p_e A_e} \frac{dp}{dt} \Rightarrow \frac{dU}{dt} = -\frac{V}{p_e A_e} \frac{d^2 p}{dt^2}. \quad (4.16)$$

Підкладаючи отримані результати в 4.14 остаточний вигляд рівняння динамічного стану системи, що описує процес розрядження резервуару:

$$\frac{d^2 p}{dt^2} - \frac{RT p_e A_e}{LV} \ln\left(\frac{p_e}{p}\right) + \frac{1+K_v}{2L p_e A_e} V \left(\frac{dp}{dt}\right)^2 = 0. \quad (4.17)$$

Останнє рівняння є диференціальним рівнянням другого порядку і для його вирішення необхідно задання двох початкових умов. Одна умова – це тиск p_0 в резервуарі на початку процесу розрядження $t = 0$. Друга умова – це значення першої похідної тиску по часу в початковий момент. Оскільки на початку розрядження швидкість витоку рівна нулю, то відповідно і значення похідної першої похідної в початковий момент $dp/dt = 0$.

При аналізі структури отриманого рівняння привертає увагу наявність логарифмічного компонента, що надає йому нелінійного характеру, суттєво ускладнюючи процес знаходження аналітичного розв'язку. Саме ця

математична особливість обумовила використання спеціального числового розв'язувача ode23s, про що детально йшлося в третьому розділі дослідження.

З метою верифікації розробленої моделі було створено додаткову обчислювальну процедуру в середовищі MATLAB. Для проведення тестових розрахунків використано набір конкретних числових значень змінних параметрів системи, які систематизовано та представлено в табл. 4.1. Такий підхід забезпечує можливість практичної перевірки адекватності розробленої математичної моделі та оцінки точності отриманих результатів.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів системи для тестового моделювання

Величина	Значення
Об'єм накопичувальної ємності, м ³	1 м ³
Початкове значення тиску повітря в резервуарі, бар	100 бар
Значення тиску на виході після дроселюючого клапана, бар	2,5 бар
Коефіцієнт зниження напору клапана, в.о.	20
Діаметр отвору вихідного каналу, м	0,5 м
Довжина трубопроводу випускного тракту, м	0,01 м

При виконанні обчислювального експерименту за допомогою розробленої процедури в середовищі MATLAB було досліджено динаміку процесу розвантаження резервуара зі стисненим повітрям. Моделювання тривало до моменту досягнення рівноважного стану, коли внутрішній тиск у резервуарі знижувався до рівня вихідного тиску p_e . Графік зміни тиску в резервуарі представлено на рис. 4.4. Отримані результати дозволяють детально проаналізувати характер зміни тиску та інших термодинамічних параметрів системи протягом всього періоду розвантаження резервуару.

З аналізу отриманих результатів очевидним є те, що динаміка зниження тиску на початковому етапі має практично лінійний характер, однак при

наближенні до заданої величини тиску нагнітання, що контролюється регулятором, спостерігається поступове зменшення швидкості падіння тиску до нульового значення.

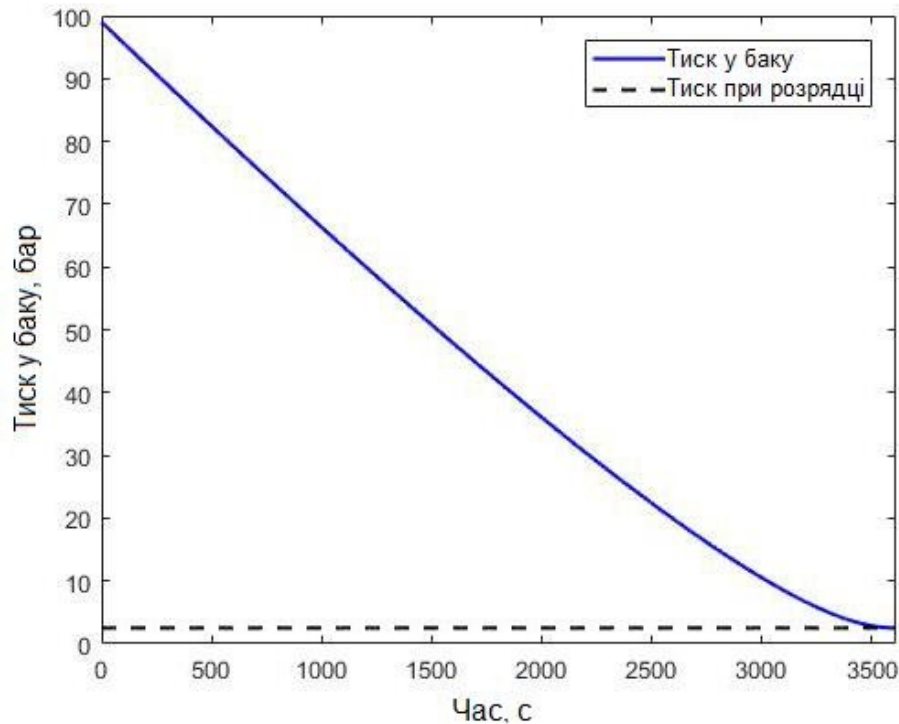


Рисунок 4.4 – Графік зміни тиску акумулюючого агента в резервуарі під час його розряджання

Особливу увагу привертає часова характеристика процесу розвантаження резервуара: при заданих параметрах системи тривалість повного циклу розвантаження сягає близько однієї години. Цей часовий інтервал на декілька порядків перевищує характерний період теплового розсіювання в системі. Такий значний розрив у часових масштабах процесів служить додатковим підтвердженням правомірності прийнятого раніше припущення про ізотермічний характер процесу розвантаження акумульованої енергії.

4.3 Моделювання динаміки генерації електричної енергії

В попередньому підрозділі було визначено графік зміни тиску в резервуарі, а за прийняття умови про сталість температури можна спираючись на рівняння стану ідеального газу, провести розрахунок зміни загальної маси повітря в резервуарі протягом всього процесу розвантаження резервуару.

На основі отриманих даних про поточне значення маси повітря в кожен момент часу розроблено методику визначення масової витрати повітря через вихідний переріз резервуара. Такий підхід забезпечує можливість детального аналізу динаміки витратних характеристик системи та їх взаємозв'язку з іншими термодинамічними параметрами процесу розрядження:

$$\dot{m} = \frac{m^{t+1} - m^t}{\Delta t} . \quad (4.18)$$

В останньому рівнянні часовий інтервал Δt відповідає кроку зміни часу інтегрування розв'язувала звичайних диференціальних рівнянь, що використовується для рішення задачі, а величини t та $t+1$ – суть сусідні моменти часу на початку та кінці кроку.

Значення потужності на виході турбіни можна визначити таким чином:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t c_p (T_1 - T_2) = \dot{m}_t c_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) . \quad (4.19)$$

де індекси 1 та 2 відповідно стосуються вхідних та вихідних параметрів.

На основі концепції ізоентропійного коефіцієнта корисної дії турбіни можна провести порівняльний аналіз між реальною потужністю, що генерується турбінною установкою, та її теоретично можливим максимальним значенням, яке досягалося б за умови абсолютно ізоентропійного процесу розширення робочого тіла. Застосування такого підходу дає можливість сформулювати математичну залежність вихідної потужності турбіни від ступеня розширення повітря в ній. Це співвідношення враховує реальні термодинамічні процеси та дозволяє оцінити ефективність перетворення

потенційної енергії стисненого повітря в механічну роботу на валу турбіни з електрогенератором.

$$\dot{W}_t t = \eta_t \dot{W}_{t,s} t = \eta_t \dot{m} t c_p \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]. \quad (4.20)$$

На основі виконаних обчислень, представлених у пункті 4.1, можливо простежити динаміку зміни потужності турбінного агрегату впродовж усього періоду скидання навантаження. Графічне відображення цього процесу продемонстровано на рис. 4.5, де експериментальні дані були отримані за аналогічних параметрів, що відповідають умовам, зафіксованим у табл. 4.1.

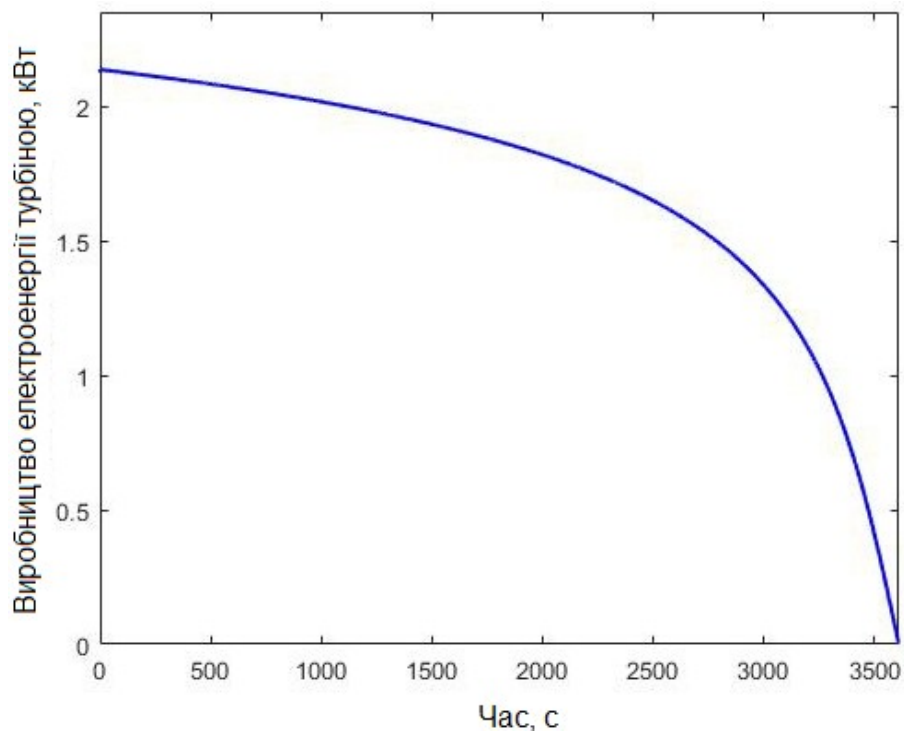


Рисунок 4.5 – Графік зміни вихідної потужності турбіни з генератором в процесі розряджання резервуару з акумулюючим агентом

Аналіз отриманих результатів свідчить про характерну особливість зміни потужності: спочатку спостерігається поступове, майже непомітне зниження енергетичних показників, після чого настає фаза стрімкого падіння до повного припинення роботи установки. Такий різкий спад потужності безпосередньо пов'язаний із моментом, коли часова похідна тиску

наближається до нульової позначки, що сигналізує про завершення робочого циклу турбіни.

Розрахунок сумарної енергетичної продуктивності турбінного агрегату в моделі здійснюється через математичну операцію інтегрування кривої потужності протягом всього робочого періоду. При цьому враховуються всі зміни енергетичних параметрів установки у часі, що дозволяє отримати точне значення згенерованої енергії. Метод обчислення забезпечує комплексну оцінку ефективності роботи турбіни, враховуючи як періоди стабільної роботи, так і фази зниження потужності до повного припинення генерації.

$$W_t = \int \dot{W}_t dt \quad (4.21)$$

Для забезпечення узгодженості обчислювальних методів важливо відзначити, що числовий розв'язувач ode23s базується на алгоритмі другого порядку точності. Саме тому для подальшого інтегрування енергетичних показників доцільно застосувати метод трапецій, який також характеризується другим порядком точності апроксимації:

$$W_t = \int \dot{W}_t dt \approx \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\dot{W}_t^{i+1} + \dot{W}_t^i}{2} \Delta t_i \quad (4.22)$$

Такий математичний підхід гарантує збалансовану точність розрахунків на всіх етапах моделювання процесу. Застосування трапецієподібного правила інтегрування у даному контексті забезпечує найбільш оптимальне співвідношення між обчислювальною складністю та досягнутою точністю результатів, що особливо важливо при аналізі енергетичних характеристик турбінної установки.

4.4 Аналіз результатів моделювання впливу режимних та конструктивних параметрів на її енергетичні характеристики

Виконана в попередньому матеріалі дослідження розробка повної математичної моделі функціонування системи дає можливість провести

параметричний аналізу для визначення ключових факторів впливу на її ефективність. В ході дослідження було виявлено суттєву різницю у значимості різних параметрів системи, причому деякі змінні демонструють визначальний вплив на загальну продуктивність.

Подальший аналіз зосереджується на найбільш вагомих результатах такого дослідження, де за основу беруться базові значення параметрів відповідно до табл. 4.1. Методологія дослідження передбачає варіювання лише однієї змінної при збереженні інших параметрів незмінними, що дозволяє ізольовано оцінити вплив кожного окремого фактора на характеристики системи та встановити відповідні залежності.

Аналіз експериментальних даних наочно демонструє взаємозв'язок між енергетичною продуктивністю системи та основними фізичними параметрами резервуара, що відображено у графічних залежностях на рис. 4.6. Результати дослідження підтверджують зв'язок між об'ємно-тисковими характеристиками накопичувача та кількістю згенерованої енергії. Зокрема, підвищення робочого тиску в резервуарі, так само як і збільшення його геометричного об'єму, призводить до пропорційного зростання енергетичного виходу системи. Така закономірність пояснюється фундаментальними принципами термодинаміки та дозволяє оптимізувати конструктивні параметри установки для досягнення бажаних показників енергоефективності.

Проектування енергетичної системи ставить перед інженерами важливу оптимізаційну задачу: необхідно досягти максимальної енергетичної ефективності при мінімально можливих габаритних розмірах установки. Пошук оптимального балансу між компактністю конструкції та її енергетичною продуктивністю стає ключовим викликом при розробці.

Додатковим фактором, що впливає на загальну енергетичну ефективність, виступає тиск нагнітання робочого агента на вхід турбіни з електрогенератором, вплив якого проілюстровано на рис. 4.7. Дані експерименту свідчать про пропорційність між тиском нагнітання і сумарним виробленням енергії, що аналогічно до впливу початкового тиску та об'єму

резервуара. Такі залежності формують комплексну картину взаємозв'язків між конструктивними параметрами та експлуатаційними характеристиками системи, що має враховуватися при її проектуванні.

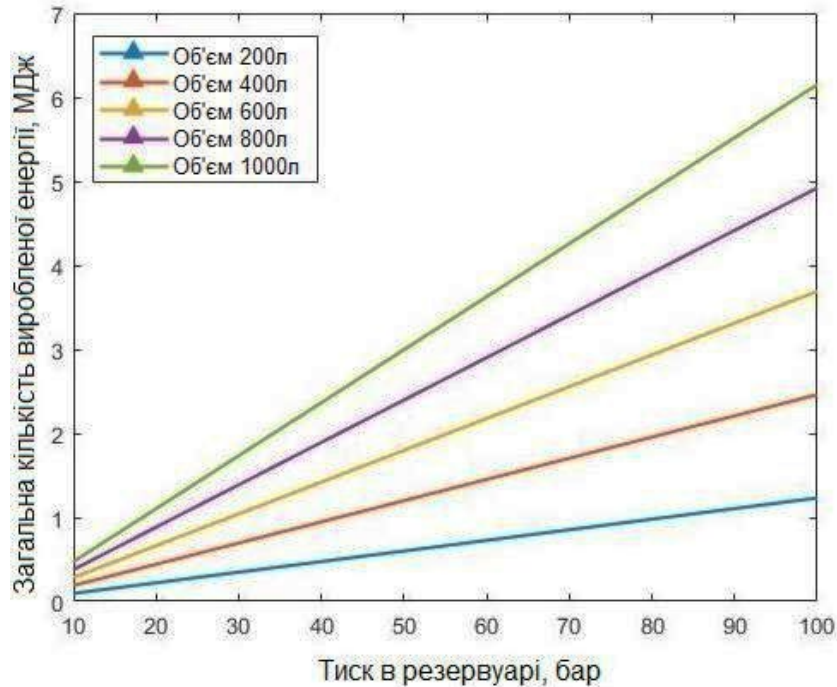


Рисунок 4.6 – Графіки залежності виробленої енергії від тиску в акумулюючому резервуарі при різних його об'ємах

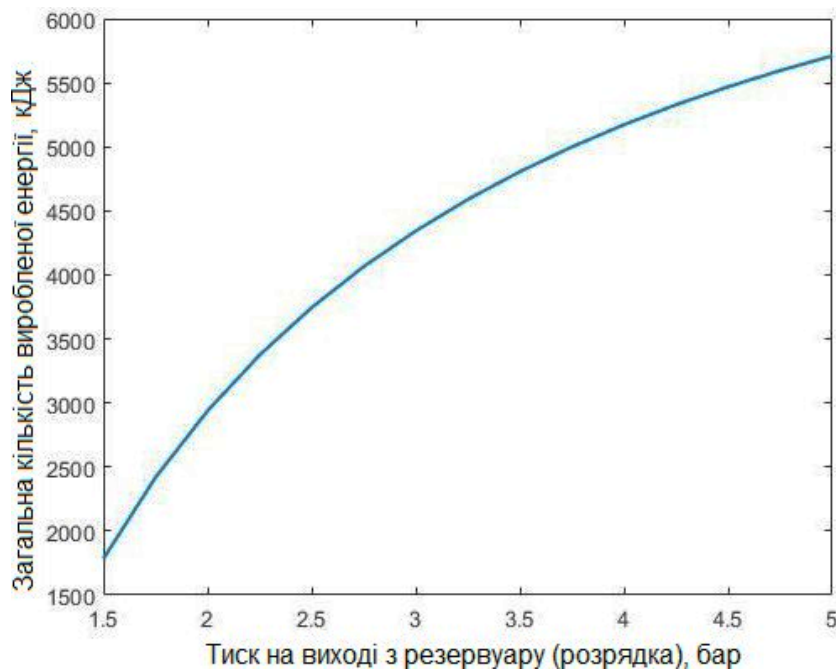


Рисунок 4.7 – Графік залежності виробленої енергії від тиску нагнітання повітря в турбіну при параметрах резервуару $p_0 = 100$ бар $V = 1$ м³

При дослідженні експлуатаційних характеристик системи особливу увагу необхідно приділити тривалості робочого циклу, оскільки саме цей параметр визначає здатність установки підтримувати стабільне енергозабезпечення. Графічні залежності рис. 4.8, розкривають важливу закономірність: підвищення тиску нагнітання призводить до скорочення загального часу функціонування системи. Така обернена залежність створює певний технологічний парадокс, адже прагнення збільшити миттєву потужність через підвищення тиску нагнітання одночасно зменшує період активної роботи установки, що в кінцевому підсумку негативно впливає на сумарний обсяг виробленої енергії. Цей взаємозв'язок підкреслює необхідність ретельного балансування параметрів системи для досягнення оптимального співвідношення між інтенсивністю енерговиробництва та тривалістю робочого циклу.

Оцінювання ефективності енергетичної системи вимагає комплексного аналізу не лише сумарної виробленої енергії, але й рівня доступної потужності, оскільки недостатня потужність може унеможливити належне функціонування електричних споживачів. Дослідження виявило визначальну роль тиску нагнітання у формуванні максимальних показників потужності турбінного агрегату. Підвищення цього параметра спричиняє одночасне зростання двох ключових характеристик: максимальної масової витрати робочого тіла та коефіцієнта розширення в турбіні, який визначається співвідношенням вхідного та вихідного тисків.

Експериментальні дані, візуалізовані на рис. 4.9, демонструють практично лінійну залежність між значенням тиску нагнітання та досяжною максимальною потужністю установки. Така закономірність надає важливі орієнтири для проектування систем із заданими енергетичними характеристиками, дозволяючи прогнозувати їхню здатність забезпечувати необхідний рівень електричної потужності для конкретних споживачів.

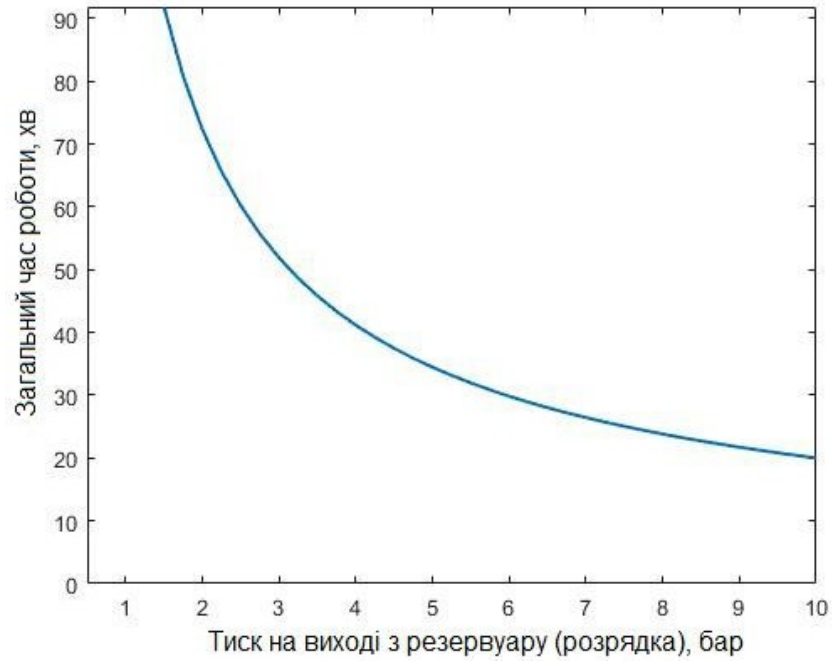


Рисунок 4.8 – Графік залежності часу роботи установки генерації електроенергії від тиску нагнітання повітря в турбіну при параметрах резервуару $p_0 = 100$ бар $V = 1$ м³

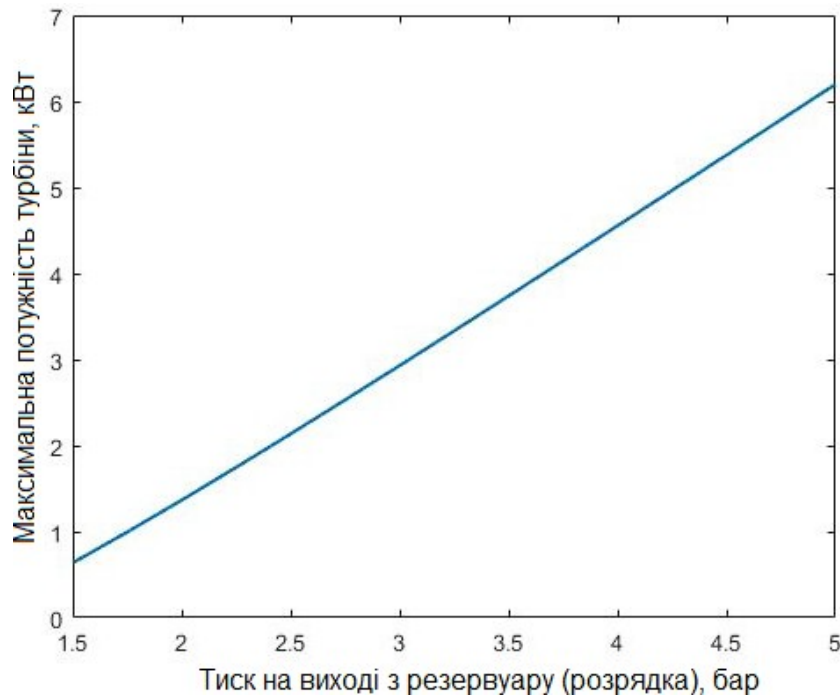


Рисунок 4.9 – Графік залежності пікової потужності турбіни з електрогенератором від тиску нагнітання повітря в турбіну при параметрах резервуару $p_0 = 100$ бар $V = 1$ м³

При розробці системи накопичення та генерації електричної енергії критично важливим є врахування двох фундаментальних характеристик, що визначають її практичну цінність.

Першою з них виступає загальний коефіцієнт корисної дії системи, позначений η , який відображає співвідношення між корисно використаною та загальною витраченою енергією в процесі перетворення:

$$\eta = \frac{W_t}{W_c} . \quad (4.23)$$

де W_t – корисна виконана робота, W_c – робота витрачена на наповнення резервуару з повітрям.

Другим ключовим параметром є енергетична щільність накопичення $\rho_{\text{energetic}}$, що характеризує кількість енергії, яку можна акумулювати в одиниці об'єму накопичувача:

$$\rho_{\text{energetic}} = \frac{W_t}{m_{\text{stored}}} = W_t \frac{RT}{p_0 V} . \quad (4.24)$$

Ці показники мають визначальне значення для оцінки ефективності використання ресурсів та компактності системи, дозволяючи порівнювати різні технологічні рішення та обирати оптимальну конфігурацію відповідно до конкретних вимог застосування.

Аналіз графічних залежностей, представлених на рис. 4.10, розкриває важливу закономірність щодо енергетичного балансу системи: зростання тиску в накопичувальному резервуарі супроводжується непропорційним збільшенням енергетичних витрат на стиснення порівняно з приростом генерованої енергії. Така диспропорція безпосередньо відображається на загальному коефіцієнті корисної дії установки, демонструючи його зниження при підвищенні робочого тиску. З точки зору оптимізації конструктивних параметрів, підвищення енергоефективності системи досягається через зменшення робочого тиску в резервуарі, що відповідно передбачає зниження маси акумульованого повітря. У контексті габаритних характеристик такий

підхід веде до зменшення фізичних розмірів установки, якщо розглядати масу накопиченого повітря як визначальний параметр масштабу системи. Таким чином, оптимізація енергетичної ефективності природньо узгоджується з вимогами щодо компактності конструкції.

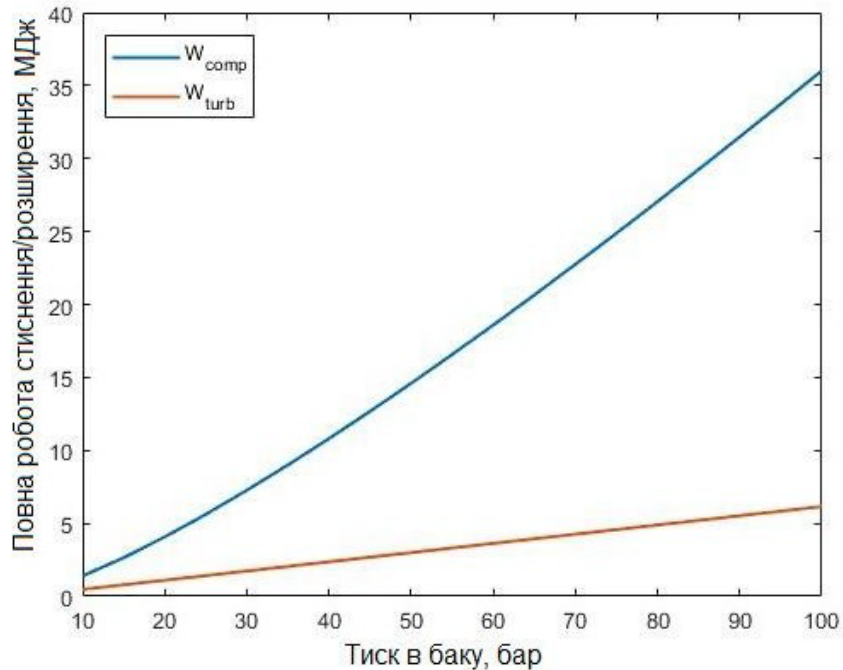


Рисунок 4.10 – Графіки залежностей повної роботи (компресора) та корисної роботи (турбіни) від початкового тиску в баці-акумуляторі p_0

Розглядаючи концепцію портативності енергетичних систем, важливо змістити фокус з загальної ефективності на питому енергоемність установки. Співвідношення виробленої енергії до масогабаритних показників системи, що характеризується параметром $\rho_{energetic}$, набуває першочергового значення при проєктуванні мобільних енергетичних установок.

Графічні залежності, наведені на рис. 4.11, відображають залежність між початковим тиском у резервуарі p_0 та питомою енергетичною щільністю системи. Така закономірність створює певний конструктивний парадокс: прагнення досягти максимальної питомої енергоемності вимагає збільшення робочого тиску в накопичувачі, що неминуче призводить до зростання габаритних розмірів конструкції через необхідність посилення міцності

резервуара. Це формує специфічний підхід до проєктування портативних систем, де компроміс між компактністю та енергетичною ємністю досягається через оптимізацію робочого тиску, навіть якщо це супроводжується деяким зниженням загального коефіцієнта корисної дії установки.

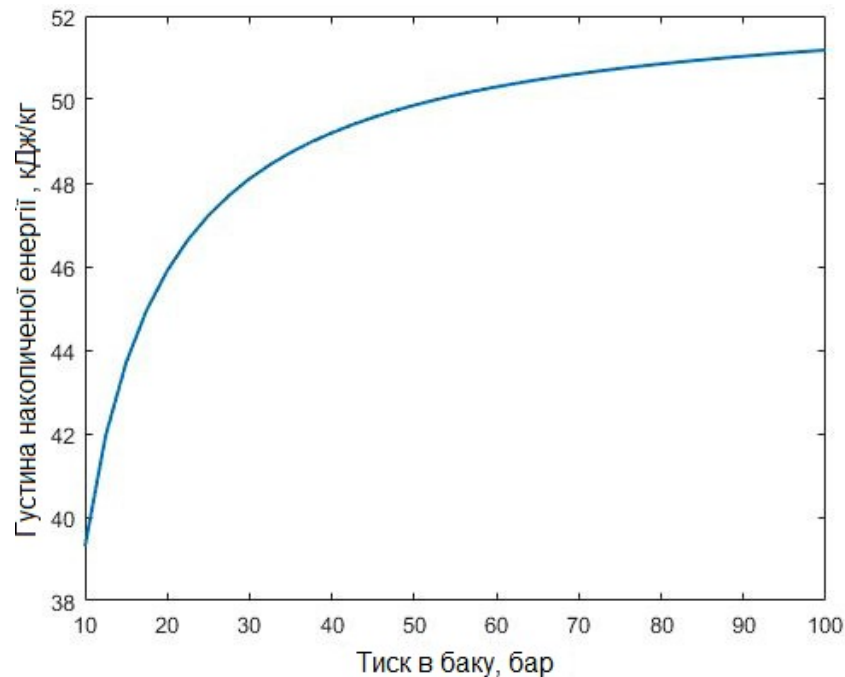


Рисунок 4.11 – Графік залежності густини акумулювання енергії) від початкового тиску в баці-акумуляторі p_0

На основі аналізу графічних даних можна спостерігати характерну залежність енергетичних показників від рівня тиску в системі. При цьому найбільш інтенсивне зростання параметра $\rho_{\text{energetic}}$ відзначається в діапазоні низьких тисків, тоді як при подальшому підвищенні тиску в накопичувальному резервуарі спостерігається тенденція до стабілізації цього показника. Хоча отримані значення енергетичної щільності поступаються аналогічним показникам альтернативних технологій накопичення енергії, важливо враховувати суттєві переваги даної системи, зокрема її здатність до утилізації надлишкової енергії та мінімальний вплив на екологічний стан довкілля. Проведене порівняння питомих показників енергогенерації, розрахованих на одиницю об'єму, з референтними даними, наведеними в

табл. 2.2, підтверджує, що досягнуті результати відповідають діапазону характеристик систем, описаних у літературі. Зокрема, при використанні накопичувального резервуара об'ємом 1 м^3 за умови робочого тиску 100 бар, досягається питома енергопродуктивність на рівні $1,7 \text{ кВт*год/м}^3$.

Аналіз характеристик системи виявляє цікаву закономірність у співвідношенні її ключових параметрів: при збільшенні масштабу установки спостерігається одночасно дві протилежні тенденції – зниження загального коефіцієнта корисної дії системи та підвищення енергетичної щільності робочого середовища. Така взаємозалежність параметрів створює необхідність пошуку оптимального балансу між цими конкуруючими характеристиками, оскільки їх одночасна максимізація виявляється технічно неможливою. Визначення раціонального співвідношення між ефективністю системи та її енергетичною щільністю стає ключовим завданням подальших досліджень та наукового пошуку. Це дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимальних конструктивних та експлуатаційних параметрів енергетичної установки.

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблено математичну модель процесу заряджання резервуара стисненим повітрям. На основі рівнянь балансу маси та енергії отримано вираз для розрахунку повної роботи стиснення. Проведене параметричне дослідження при різних значеннях тиску (10-100 бар) та об'єму резервуара ($0,2$ - $1,0 \text{ м}^3$) показало, що при використанні компресора потужністю 10 кВт час заряджання становить близько години, а енергія стиснення досягає мегаджоулів, що підтверджує правомірність застосування ізотермічної моделі.

2. На основі розробленої математичної моделі процесу розряджання резервуару зі стисненим повітрям, яка враховує термодинамічну рівновагу та одновимірний характер течії, встановлено нелінійну динаміку падіння тиску з майже лінійним характером на початковому етапі та поступовим

сповільненням при наближенні до заданого значення, при цьому значна тривалість процесу розвантаження (близько години) підтверджує коректність припущення про його ізотермічний характер.

3. Розроблено методику моделювання процесу генерації електричної енергії турбінною установкою при розрядці резервуару зі стисненим повітрям, яка включає розрахунок масової витрати повітря, визначення вихідної потужності з урахуванням ізоентропійного ККД турбіни, та обчислення сумарної енергетичної продуктивності методом трапецій, при цьому встановлено, що динаміка потужності характеризується спочатку поступовим, а потім різким падінням до повного припинення роботи установки.

4. В результаті параметричного аналізу системи акумулювання енергії встановлено, що збільшення об'єму та початкового тиску резервуара призводить до пропорційного зростання виробленої енергії, при цьому підвищення тиску нагнітання в турбіну збільшує пікову потужність, але скорочує час роботи установки; виявлено також, що зростання робочого тиску покращує питому енергоємність системи (до $1,7 \text{ кВт*год/м}^3$ при 100 бар), але одночасно знижує її загальний ККД, що створює необхідність пошуку оптимального балансу між цими параметрами при проектуванні установки.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Механізми утворення статичної електрики та заходи по її подоланню і зниженню негативного впливу

Дослідження впливу електростатичних явищ на здоров'я працівників демонструє критичну важливість впровадження профілактичних заходів для захисту людського організму від негативного впливу накопичених зарядів. Електростатичне поле виникає внаслідок фізичного контакту та подальшого розмежування різнорідних матеріалів, причому обов'язковою умовою цього процесу є наявність діелектричного матеріалу хоча б з однієї сторони. Це природне явище, що характеризується накопиченням і просторовим перерозподілом електричних зарядів, належить до категорії фізичних факторів виробничого середовища, які створюють потенційну загрозу безпеці та здоров'ю персоналу. Особливу небезпеку становить надмірна концентрація статичних зарядів у виробничому середовищі, що може призводити до небажаних наслідків різного ступеня тяжкості - від легкого дискомфорту до серйозних професійних захворювань.

Механізм електризації полягає у специфічній властивості діелектричних матеріалів накопичувати електричні заряди за конкретних фізичних умов. Важливо розуміти, що цей процес підпорядковується закону збереження заряду - електричні заряди не генеруються самовільно, а відбувається їх перерозподіл між контактуючими поверхнями або в межах одного об'єкта. Примітним є також явище електростатичної індукції, коли наелектризованість тіл виникає через дистанційну взаємодію без безпосереднього контакту.

У харчовій промисловості електростатичні явища найчастіше супроводжують технологічні процеси переробки сипких матеріалів та рідин. Зокрема, значні електростатичні поля формуються під час подрібнення

зернових культур, просіювання борошна, його транспортування пневматичними системами. Аналогічні явища спостерігаються при виготовленні цукрової пудри, переміщенні спиртовмісних продуктів, транспортуванні сухих дріжджів, а також при фільтрації різноманітних рідин.

Особливо інтенсивна електризація відбувається в системах механічної передачі руху, насамперед у пасових передачах та на транспортерних стрічках. При відриві паса від шківа порушується електричний баланс контактуючих поверхонь, внаслідок чого на них формуються протилежні за знаком заряди. За певних експлуатаційних умов різниця електричних потенціалів між цими елементами може сягати надзвичайно високих значень - до 80 кіловольт, що створює суттєву небезпеку для обслуговуючого персоналу та обладнання.

Електростатичні розряди виникають у момент, коли електричне поле досягає значень, що перевищують діелектричну міцність навколишнього середовища, зазвичай повітря. Фундаментальною характеристикою, яка визначає електропровідні властивості матеріалів та їхню схильність до накопичення статичних зарядів, виступає питомий електричний опір речовини. На основі експериментальних досліджень встановлено критичне значення питомого електричного опору - $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, нижче якого матеріали практично не здатні утримувати електростатичні заряди, що робить їх безпечними з точки зору електростатичних явищ. Натомість речовини з високим питомим опором демонструють значну здатність до збереження зарядів, особливо при швидкому роз'єднанні контактуючих поверхонь.

Кількісна характеристика накопичених зарядів суттєво залежить від двох ключових параметрів: природи матеріалу, що визначає його фізико-хімічні властивості, та динамічних характеристик технологічного процесу, зокрема швидкості розділення поверхонь. Таким чином, інтенсифікація виробничих процесів може призводити до посилення електризації матеріалів та підвищення ризиків, пов'язаних з електростатичними явищами.

Статичні електричні розряди становлять значну небезпеку у харчовій промисловості, виступаючи потенційним джерелом займань та вибухів.

Особливо гостро ця проблема постає при роботі з речовинами, що характеризуються підвищеною здатністю до електризації, такими як легкозаймисті рідини та органічний пил. Статистичні дослідження показують, що наелектризовані рідини створюють утричі вищий ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій порівняно з дрібнодисперсними матеріалами, оскільки для займання пилоповітряних сумішей потрібна енергія у десятки чи навіть сотні разів менша.

При транспортуванні рідин трубопроводами інтенсивність накопичення електростатичних зарядів визначається комплексом факторів: діелектричною проникністю рідини, наявністю домішок, текстурою внутрішньої поверхні труб, швидкісним режимом потоку та геометричними параметрами трубопроводу. Ці фактори у сукупності формують умови для потенційно небезпечного накопичення зарядів.

Забезпечення безпеки від негативного впливу статичної електрики потребує комплексного підходу, що реалізується за двома основними стратегічними напрямками: повна нейтралізація електростатичних зарядів або зниження їх рівня до безпечних значень, при яких виключається можливість виникнення аварійних ситуацій та негативного впливу на персонал.

У галузі харчового виробництва розроблено комплексну систему заходів для мінімізації ризиків, пов'язаних з електростатичними явищами. Першочерговим напрямком є заміна легкозаймистих речовин на пожежобезпечні альтернативи. Наприклад, замість традиційних нафтопродуктів для очищення технологічного обладнання застосовуються безпечні миючі засоби на основі їдкого натру, калію, рідкого скла чи спеціальних поверхнево-активних речовин типу ОП-7 або ОП-10.

Важливим технологічним аспектом є підтримання концентрації горючих компонентів поза межами вибухонебезпечних значень, що реалізується з урахуванням специфіки виробничих процесів. Підвищення електропровідності поверхонь досягається шляхом нанесення спеціальних провідних покриттів на діелектричне устаткування та збільшення об'ємної й

поверхневої провідності матеріалів, які використовуються для транспортування та зберігання рідин.

Ефективним методом боротьби з накопиченням статичних зарядів є регулювання вологості повітря. При можливості застосовується загальне зволоження приміщень, а в разі технологічних обмежень - локальне зволоження проблемних ділянок направленим розпиленням вологи. Додатково використовується іонізація повітря за допомогою різноманітних нейтралізаторів – індукційних, високовольтних, радіоактивних або комбінованих, вибір яких здійснюється відповідно до характеристик виробничого середовища.

Фундаментальним та обов'язковим заходом захисту залишається заземлення технологічного обладнання, що забезпечує ефективне відведення накопичених зарядів. Особлива увага приділяється захисту персоналу шляхом відведення зарядів від тіла людини у виробництвах, де існує ризик займання горючих сумішей від електростатичного розряду. Важливим аспектом є також оптимізація технологічних процесів з метою усунення факторів, що сприяють електризації, та забезпечення умов для безпечного розряду статичної електрики у зонах, віддалених від горючих та вибухонебезпечних середовищ.

У системі захисту впливу статичної електрики особлива роль відводиться правильному облаштуванню заземлення технологічного обладнання. Для устаткування, що може генерувати електростатичні заряди, передбачається обов'язкове подвійне заземлення, незалежно від наявності заземлення всієї технологічної лінії. При цьому раціональним вважається об'єднання захисних контурів заземлення дії статичної електрики із загальним заземленням електрообладнання.

Технічні вимоги регламентують паралельне підключення захисного обладнання до заземлювального контуру, причому максимально допустимий опір заземлювального захисного від статичної електрики пристрою не повинен перевищувати 100 Ом. Особливі вимоги висуваються до конструкції гнучких трубопроводів, призначених для транспортування електризуючих

рідин, таких як спирт чи нафтопродукти. Вони повинні бути оснащені заземленим металевим оплетенням, а їхні вихідні штуцери виготовлятися з кольорових металів та надійно з'єднуватися із захисним оплетенням.

Додаткові технічні рішення щодо мінімізації небезпечних проявів статичної електрики включають модернізацію конструктивних елементів обладнання, зокрема заміну плоских пасів на клинові текстурні. При операціях з рідинами важливо запобігати їх розбризкуванню, що досягається правильним позиціонуванням завантажувальних труб - їх кінці мають знаходитися на відстані не більше 20 сантиметрів від дна приймальної ємності. Суттєвим фактором впливу на інтенсивність електризації є також швидкість переміщення матеріалів, тому її оптимізація розглядається як один із ефективних заходів захисту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Дослідження актуального стану енергетичної галузі демонструє, що серед перспективних методів накопичення електричної енергії відновлюваних джерел енергії та мінімізації шкідливого екологічного впливу традиційних батарей виділяється технологія накопичення енергії шляхом компресії повітря. Такі установки, що функціонують за принципом стиснення повітря (CAES), являють собою ефективне рішення для довготривалого утримання значних обсягів енергетичних ресурсів.

2. За результатами дослідження функціонування установок CAES визначено, що застосування технології компресованого повітря демонструє вищу ефективність порівняно з традиційними електрохімічними накопичувачами енергії.

3. Запропоновано компактну версію системи накопичення енергії на базі компресії повітря. Конструкція включає компактний резервуар для зберігання стисненого газу, що заповнюється за рахунок енергії від відновлюваних джерел або надмірної генерації. Установка оснащена малопотужною турбіною, призначеною для періодичного виробництва обмежених обсягів електричної енергії.

4. Розроблено математичний опис процесів функціонування компактної установки накопичення енергії з використанням стисненого газу, що уможливило аналіз ключових параметрів ефективності роботи даної системи.

5. Встановлено перспективність розробки мобільних енергогенеруючих комплексів на основі акумулювання компресованого повітря. Такі установки здатні утилізувати надлишкову електроенергію під час мінімального споживання для компресії атмосферного газу та його утримання в спеціальних ємностях під високим тиском з подальшою конвертацією в електричну енергію.

6. За підсумками проведеного аналізу з'ясовано, що реалізація компактного формату системи становить значні технічні виклики. Експериментальні дані демонструють обернену залежність - зменшення габаритів установки призводить до суттєвого падіння енергоефективності відносно об'єму накопиченого компресованого газу. Виявлено фундаментальне протиріччя між ключовими завданнями розробки: максимізацією енергетичної продуктивності та мінімізацією фізичних розмірів обладнання.

7. В процесі масштабування установки спостерігається зворотна залежність між загальною продуктивністю та концентрацією енергії в стисненому середовищі - зростання габаритів призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії, проте підвищує питому енергоємність акумульованого газу.

8. Розроблений енергетичний комплекс демонструє коефіцієнт корисної дії на рівні третини від вхідної потужності та забезпечує безперервну генерацію електроенергії впродовж півгодинного періоду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke.

Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

2. EASE/EERA Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030. Режим доступу: <http://surl.li/dugkur>

3. European energy storage technology development Roadmap 2017 update. Режим доступу: <http://surl.li/okwcpd>

4. G. Grazzini and A. Milazzo. Thermodynamic analysis of caes/tes systems for renewable energy plants. Renewable energy, 33(9):1998–2006, 2008

5. Succar S, Williams RH. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. Princeton Environmental Institute. Energy Anal Group; 2008.

6. Madlener R, Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power. Appl Energy 2013;101:299–309.

7. Raju M, Kumar Khaitan S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant. Appl Energy 2012;89:474–81.

8. Finkenrath M, Pazzi S, D’Ercole M. Status and technical challenges of advanced Compressed Air Energy Storage (CAES) technology. In: Int. workshop on environment and alternative energy; 2009.

9. RWE power. ADELE – Adiabatic compressed-air energy storage (CAES) for electricity supply. Режим доступу: <http://surl.li/gvcqbb>

10. John JS. Texas to host 317MW of compressed air energy storage – After a long wait, a second big CAES project gets underway in the U.S. Published 9th July 2013. Режим доступу: <http://surl.li/pkslig>

11. Succar S, Denkenberger DC, Williams RH. Optimization of specific rating for wind turbine arrays coupled to compressed air energy storage. *Appl Energy* 2012;96:222-34.
12. LightSail Energy Ltd. We store energy in compressed air. Режим доступа: <http://www.lightsail.com>
13. Hartmann N, Vöhringer O, Kruck C, Eltrop L. Simulation and analysis of different adiabatic compressed air energy storage plant configurations. *Appl Energy* 2012;93:541-8.
14. Rutqvist J, Kim H-M, Ryu D-W, Synn J-H, Song W-K. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *Int J Rock Mech Min Sci* 2012;52:71-81.
15. Compressed-air energy storage using hard-rock geology: test facility and results. USA Electr. Power Res. Inst. (EPRI); 2005. p. 1-2.
16. Schulte RH, Critelli N, Jr., Holst K, Huff G. Lessons from Iowa: development of a 270 megawatt compressed air energy storage project in Midwest independent system operator. Technical report. Sandia National Laboratories. Published January 2012. Режим доступа: <http://surl.li/wfbzbs>
17. Flowbattery (formerly Pnu Power). Compressed air batteries. Режим доступа: <http://www.flowbattery.co.uk>
18. Wang J, Luo X, Yang L, Shpanin LM, Jia N, Mangan S, et al. Mathematical modeling study of scroll air motors and energy efficiency analysis—part II. *IEEE/ASME Trans Mechatronics* 2011;16:122-32.
19. Proczka JJ, Muralidharan K, Villela D, Simmons JH, Frantziskonis G. Guidelines for the pressure and efficient sizing of pressure vessels for compressed air energy storage. *Energy Convers Manage* 2013;65:597-605.
20. Sun H, Luo X, Wang J. Management and control strategy study for a new hybrid wind turbine system. In: *IEEE Conf. Decis. Control Eur. Control Conf.*, IEEE; 2011. p. 3671-6.