

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ АКУМУЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ,
ЩО ПРАЦЮЮТЬ ЗА ПРИНЦИПОМ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Джигринюк О.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Джигринюку Олесю Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Енергоефективність акумулювання електроенергії в системах, що працюють за принципом стисненого повітря

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 25.12.2023

3. Вихідні дані до роботи Система акумулювання на стисненому повітрі повинна виконувати функції акумулятора для накопичення електроенергії від джерел відновлювальної енергетики. Повинна працювати для енергозабезпечення малопотужних споживачів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень за темою роботи

2. Зберігання енергії стисненого повітря

3. Опис моделі системи зберігання енергії стисненого повітря

4. Моделювання процесу «зарядження» резервуара

5. Моделювання процесу «розрядки» ресивера

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Принцип роботи системи CAES

2. Конфігурація системи

3. Енергія стиснення, витрачена на одиницю маси повітря

4. Залежність накопиченої маси повітря від кінцевого тиску в балоні

5. Повна робота стиснення як функція кінцевого тиску та об'єму резервуара

6. Зміна тиску під час розвантаження резервуара

7. Виробництво електроенергії турбіною під час спорощення резервуару

8. Залежність загальної кількості виробленої енергії від тиску та об'єму резервуара

9. Густина накопиченої енергії як функція тиску

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Клепчик В.М., ст. викладач кафедри ХО</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 10.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 10.11.2023 по 14.11.2023	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 15.11.2023 по 10.12.2023	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 11.12.2023 по 13.12.2023	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 13.12.2023 по 14.12.2023	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 15.12.2023 по 17.12.2023	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 18.12.2023 по 20.12.2023	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 21.12.2023 по 25.12.2023	

Студент _____
(підпис)

Джигринюк О.Р.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Коваль В.П.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 69 сторінок, __ аркушів презентації, 27 ілюстрацій, 3 таблиці та 20 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес перетворення електроенергії у енергію стисненого повітря.

Предмет дослідження – акумулятор на стисненому повітрі.

Метою кваліфікаційної роботи є: виявлення можливості та встановлення ефективності акумуляції електроенергії у формі стисненого повітря.

Встановлено, що існує очевидний потенціал для розвитку портативних систем генерації електроенергії з використанням накопичувачів енергії стисненого повітря. Ці системи можуть використовувати відходи виробництва енергії в не пікові години споживання для стиснення атмосферного повітря і зберігання його в резервуарах високого тиску, щоб потім використовувати для виробництва електроенергії.

Розроблено конфігурацію міні-акумулятора на стисненому повітрі. Він містить невеликий резервуар для стисненого повітря, який буде наповнюватися за рахунок ВДЕ або надлишків виробництва енергії, буде з'єднаний з невеликою турбіною, щоб протягом певного періоду часу виробляти невеликі обсяги електроенергії.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Стан справ у електроенергетиці	9
1.2 Розподілене виробництво електроенергії	13
1.3 Аналіз результатів теоретичних досліджень	15
1.4 Аналіз результатів експериментальних досліджень	16
1.5 Висновки до розділу	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Технології зберігання енергії	19
2.2 Зберігання енергії стисненого повітря	20
2.3 Пристрої розширення	25
2.4 Конфігурація системи	28
2.5 Висновки до розділу	29
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	31
3.1 Опис моделі системи зберігання енергії стисненого повітря	31
3.2 Термодинамічні процеси при стисканні повітря	32
3.3 Чисельні методи розв'язування звичайних диференціальних рівнянь	34
3.4 Термодинамічна модель	37
3.5 Моделювання процесу «заряджання» резервуара	42
3.6 Моделювання процесу «розрядки» ресивера	46
3.7 Виробництво енергії	50
3.8 Результати моделювання	52
3.9 Висновки до розділу	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59

4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	59
4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею	60
4.3 Концепція захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного походження	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Актуальність теми. Зберігання енергії забезпечує низку соціально-економічних переваг та переваг для захисту навколишнього середовища. Зберігання енергії може здійснюватися різними способами. Прикладами є: гідроакумулюючі електростанції, надпровідні магнітні накопичувачі енергії та конденсатори, які можуть бути використані для зберігання енергії. Кожна технологія має свої переваги та недоліки. Однією з основних відмінностей між різними технологіями є кількість енергії, яку технологія може зберігати, а іншою - швидкість, з якою ця енергія може бути вивільнена. Цей опис технології зосереджується на накопичувачах енергії стисненого повітря (CAES).

Технологічній концепції зберігання енергії стисненого повітря (CAES) вже понад 40 років. Зберігання енергії стисненого повітря (CAES) було серйозно досліджено в 1970-х роках як засіб для забезпечення маневреності та задоволення пікового попиту при збереженні постійного коефіцієнта використання потужності в атомній енергетиці. Технологія зберігання енергії стисненого повітря (CAES) стала комерційно доступною з кінця 1970-х років. Одна комерційна демонстраційна установка успішно працює вже понад 24 роки, а інша - 11 років. Крім того, багато інших установок CAES були досліджені на предмет вибору місця розташування, економічної доцільності або проектування.

Принцип роботи системи зберігання енергії стисненого повітря (CAES). По суті, термін "зберігання енергії стисненого повітря" описує основний принцип функціонування технології. У періоди надлишку електроенергії в енергосистемі (наприклад, через високі поставки електроенергії в періоди низького попиту) станція зберігання енергії стисненого повітря може стискати повітря і зберігати стиснене повітря в підземній печері. Коли попит на електроенергію зростає, накопичене повітря може бути вивільнене і енергія може бути рекуперована.

Станція CAES є єдиною технологією, яка може забезпечити значне зберігання енергії (в тисячах МВт·год) за відносно низьких витрат (приблизно \$400-500/кВт). Станція має практично необмежену гнучкість для забезпечення значного управління навантаженням на комунальному або регіональному рівнях.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: виявлення можливості та встановлення ефективності акумулювання електроенергії у формі стисненого повітря.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз стану сучасної електроенергетики на предмет необхідності акумулювання електроенергії.
2. Провести аналіз системи зберігання енергії стисненого повітря.
3. Запропонувати конфігурацію міні-акумулятора на стисненому повітрі.
4. Описати математичну модель системи зберігання енергії стисненого повітря.
5. Встановити можливість конструювання портативних акумуляторів електроенергії із системою зберігання енергії стисненого повітря.

Об'єкт дослідження – процес перетворення електроенергії у енергію стисненого повітря.

Предмет дослідження – акумулятор на стисненому повітрі.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток підхід до визначення ефективності акумулювання електроенергії в портативних енергоакумулюючих системах, що працюють за принципом стисненого повітря.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропонована система може розглядатися як хороша альтернатива іншим існуючим технологіям акумулювання електроенергії, без викидів забруднюючих речовин. Вона також проста в експлуатації, а при використанні портативної конструкції з малими розмірами є можливість її транспортування і використання у рухомих чи переносних енергоакумулюючих системах.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2023 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (20 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 69 сторінок, 3 таблиці, 27 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Стан справ у електроенергетиці

Зростання споживання електроенергії, головним чином через збільшення загальної чисельності населення світу, призвело до надмірного споживання традиційних викопних видів палива та викидів CO₂. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), до 2040 року світовий попит на енергію зросте на 40%. Однак, незважаючи на збільшення споживання, структура первинної енергії дещо відрізнятиметься від нинішньої. Зміна сценарію в основному зумовлена чотирма основними факторами: швидким розвитком і падінням вартості чистої енергії, зростаючою електрифікацією енергетики (тобто електроенергії як енергії кінцевого споживання, яка, за оцінками, зросла з 12% у 2008 році до 34% у 2025 році), переходом до економіки, орієнтованої на надання послуг, і більш чистою енергетичною структурою в Китаї, на який припадає майже 23% світового енергоспоживання [2]. На рисунку 1.1 наведено прогноз МЕА щодо зміни світового попиту на первинну енергію з 2017 по 2040 рік. Видно, що загальний попит на енергію в наступні роки зростатиме, причому найбільший внесок у це зростання зробить Індія, частка якої у світовому енергоспоживанні зросте до 11% у 2040 році.



Рисунок 1.1 – Прогноз зміни попиту на первинну енергію з 2017 по 2040 рік [2].

Враховуючи також очікуване зростання актуальності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), метою МЕА є створення стійкої та більш екологічної системи виробництва електроенергії, заснованої на розподіленій системі генерації (РСГ), замість традиційної централізованої системи генерації (ЦСГ), оскільки на останню припадає понад 20% втрат у системах передачі та розподілу електроенергії. Інтеграція РСГ з ВДЕ, зокрема сонячною фотоелектричною (PV) або вітровою енергією, викликає інтерес у кількох проєктах з виробництва електроенергії, оскільки це дозволить знайти більш фінансові рішення, заощадити енергію та зменшити викиди, крім того, зростає інтерес до концепції портативності, оскільки з'явилося кілька розробок компактних енергетичних систем для живлення портативних електронних пристроїв, багато з яких використовуються у військових цілях.

Однак самі по собі РСГ не можуть задовольнити попит на енергію, оскільки через значні зміни погодних умов, тобто непередбачуваність погоди, система виробництва електроенергії не буде ні безперервною, ні надійною. Ці нестабільні джерела збільшують складність стабілізації енергосистеми, створюючи додаткову проблему дисбалансу між попитом і пропозицією, оскільки сам попит також дуже мінливий протягом дня.

Для подолання цих труднощів у використанні технологій РСГ існує велика потреба у впровадженні технологій зберігання енергії, щоб забезпечити рівність між попитом та пропозицією енергії, забезпечуючи контрольовану роботу. Зберігання електроенергії може бути досягнуто ефективно, якщо спочатку перетворити електроенергію в іншу форму енергії, яку можна зберігати, а потім перетворити її назад в електричну енергію, коли це буде потрібно.

Традиційним рішенням є використання акумуляторів. Однак сьогодні батареї все ще стикаються з деякими проблемами, які призводять до необхідності розробки альтернативних систем. Батареї мають низьку енергетичну щільність (приблизно 0,5 МДж/кг, порівняно з типовим значенням 40 МДж/кг для більшості вуглеводнів, як легко помітити на рис. 1.2), вони

часто занадто важкі для деяких бажаних портативних застосувань, також слід враховувати час перезарядки, оскільки він набагато вищий, ніж у вуглеводневих енергосистем, а також той факт, що більшість цих батарей в хімічному відношенні засновані на матеріалах, які важко утилізувати і які можуть бути екологічно небезпечними.

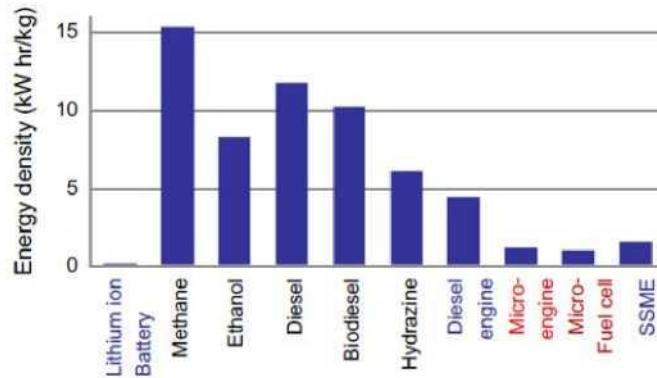


Рисунок 1.2 – Енергоємність деяких технологій та видів палива [3].

Однією з можливих альтернатив для зменшення негативного впливу акумуляторів є зберігання енергії за допомогою систем стисненого повітря, також відомих як системи зберігання енергії стисненого повітря (CAES), які можуть бути адекватним рішенням для довгострокового зберігання енергії великої потужності. Піки виробництва енергії, що перевищують миттєвий попит, можуть бути використані для живлення компресорів і зберігання атмосферного повітря в резервуарах високого тиску.

Технологія CAES вивчалася в останні роки і вважається придатною для малих систем генерації електроенергії, оскільки вона здатна зберігати кількість енергії порядку 10 кВт·год, а також виробляти вихідну потужність понад 10 кВт (рис. 1.3), що робить CAES придатною для портативних систем.

Важливо також враховувати фактор вартості, оскільки, як і будь-яка інша інвестиція, система зберігання буде цікавою лише в тому випадку, якщо загальний прибуток або економія перевищують або принаймні відповідають загальним витратам. Зазвичай прийнято вважати, що загальні витрати визначаються шляхом підсумовування інвестиційних витрат та

експлуатаційних витрат, які є останніми, розподіленими на весь термін служби системи.

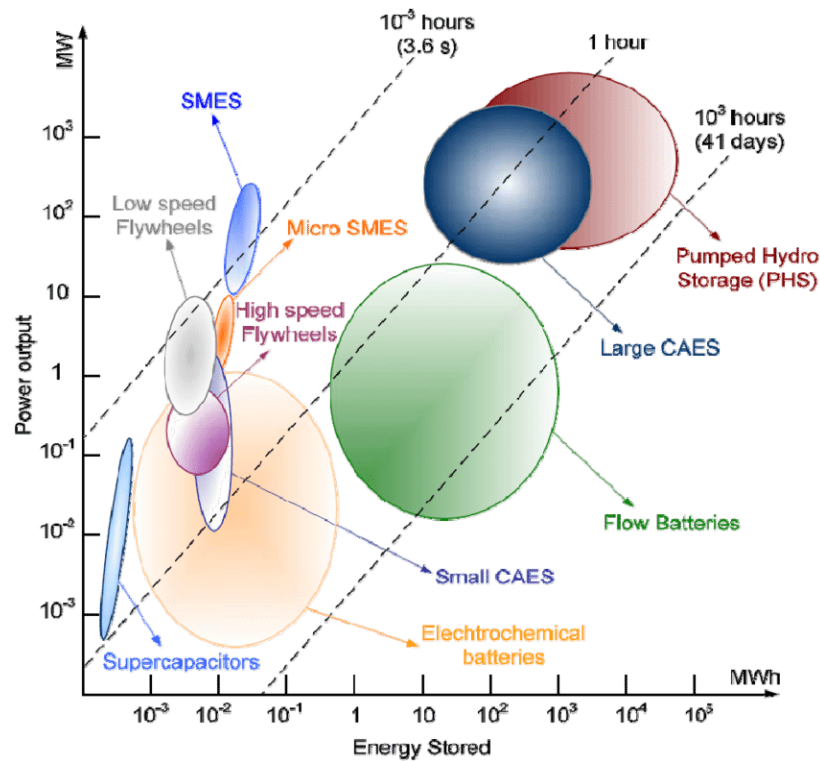


Рисунок 1.3 – Вихідна потужність у порівнянні з накопиченою енергією для різних технологій зберігання енергії [4]

Згідно з [4], обидві ці витрати пропорційні загальному обсягу виробленої енергії, W_{ut} , та встановленій потужності, P_d , враховуючи також, що експлуатаційні витрати пропорційні інвестиційним витратам, досягаючи до 40% від їх вартості. Загальна вартість може бути представлена наступним рівнянням:

$$C_t = a c_1 + c_2 P_d \quad (1.1)$$

де $a = W_{ut}/P_d$ визначається як автономність системи (співвідношення між енергетичною потужністю системи і розрядною потужністю),

c_1 і c_2 – коефіцієнти, які пов'язують загальні витрати з виробленою енергією, W_{ut} , і встановленою потужністю, P_d , відповідно.

Розглядаючи фактор вартості, на рис. 1.4 легко помітити, що системи CAES, серед інших технологій зберігання енергії, є тими, що мають одночасно

одну з найнижчих цін на одиницю потужності, $\$/\text{kВт}$, а також одну з найнижчих цін на одиницю енергії, $\$/\text{kВт-год}$.

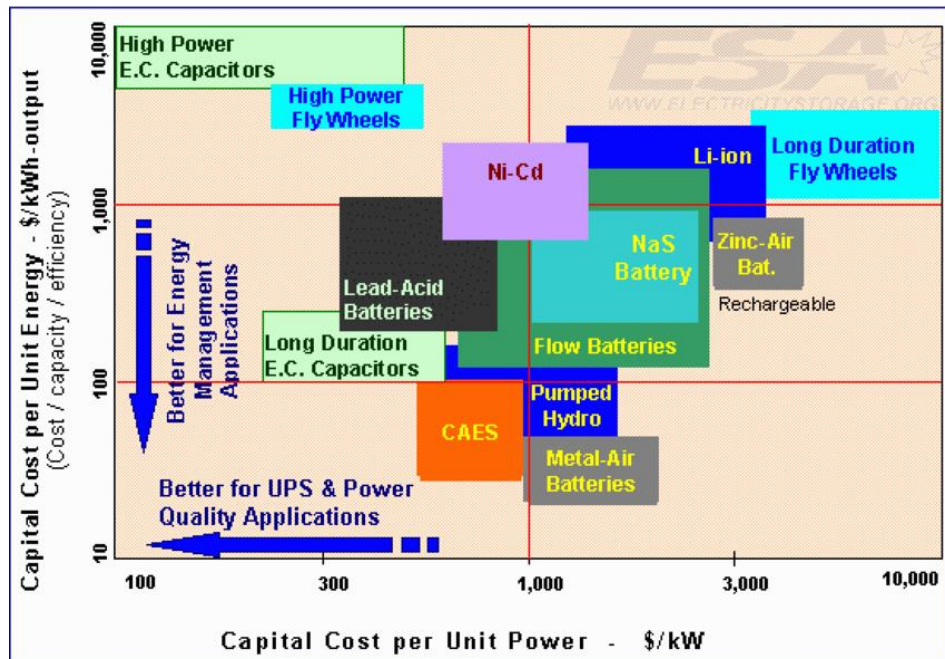


Рисунок 1.4 – Вартість технології зберігання енергії на одиницю потужності у порівнянні з вартістю одиниці енергії [5].

1.2 Розподілене виробництво електроенергії

Система РСГ визначається як джерело електроенергії, що підключене або безпосередньо до розподільчої мережі, або на стороні споживача до лічильника. Основними перевагами локального виробництва електроенергії, згідно з [5], є зменшення втрат електроенергії в системах передачі та розподілу (в системі передачі втрачається від 4% до 5% електроенергії, а в кінці розподільчої мережі – близько 10% – 15%), зменшення коливань енергосистеми, оскільки РСГ може легко задовольнити піки попиту, підвищення стабільності, надійності та безпеки енергосистеми, а також пропускної спроможності, збільшуючи при цьому діапазон роботи. Деякі з найбільш важливих застосувань РСГ, згідно з [5], включають аварійне резервування, оскільки багато служб, для яких відключення електроенергії є неприпустимим, готові платити надбавку за підтримку електропостачання без збоїв. Крім того, для згладжування пікових навантажень економічно вигідніше встановити систему РСГ на пікові періоди

попиту, ніж запускати виробництво на традиційній тепловій електростанції. Системи РСГ також можуть бути представлені як гарне рішення, коли задіяна концепція мобільності. Системи РСГ можна використовувати для виробництва електроенергії у віддалених місцях, де немає інших джерел, таких як електромережа.

Згідно з [6], основні рушійні сили, що сприяли розвитку РСГ на сьогоднішній день, можна згрупувати в три основні категорії:

I. Екологічні чинники: майже 25% газоподібних викидів припадає на сектор виробництва електроенергії, тому ДГУ на основі ВДЕ можуть бути перспективним рішенням для зменшення впливу виробництва електроенергії на навколишнє середовище, пропонуючи при цьому економічно ефективне рішення.

II. Рушійні сили ринку: учасники ринку шукають системи ДГУ з найнижчим фінансовим ризиком, отже, на ринку електроенергії перевага надаватиметься установкам ДГУ з нижчими капітальними витратами на встановлення, а також нижчими витратами на технічне обслуговування.

III. Чинники національного регулювання: як зазначалося вище, основна увага в сучасній енергетичній політиці зосереджена на підтримці безпечного та сталого виробництва електроенергії, знижуючи при цьому викиди газоподібних речовин. Таким чином, системи РСГ з меншим часом запуску можуть бути ефективним рішенням в надзвичайних ситуаціях і допомогти подолати дефіцит потужності за нижчими цінами.

Зазвичай системи РСГ поділяються на дві основні категорії: невідновлювані та відновлювані технології. До першої відносяться системи, які базуються на традиційних концепціях виробництва електроенергії, але мають менші розміри і використовують такі технології, як енергія внутрішнього згоряння, двигуни Стірлінга, парові або газові турбіни. До другої категорії, яка набуває все більшого значення в наш час, відносяться всі системи, що працюють на ВДЕ, включаючи паливні елементи, малі гідроелектростанції, сонячні фотоелектричні або вітрові електростанції. Оскільки ці джерела не

можуть контролюватися користувачем, для того, щоб зробити роботу систем РСГ більш безперервною та надійною, необхідно приділити особливу увагу системам зберігання енергії. Більшість згаданих технологій, а також деякі з їх основних характеристик наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Короткий огляд технологій РСГ [6].

Технологія	Діапазон потужності	Ефективність (%)	Капітальні витрати (\$/кВт)	Застосування
ICE	5 кВт – 10 МВт	до 43	300 – 1400	Надзвичайна ситуація
Мікротурбіни	20 – 500 кВт	20 – 80	600 – 2600	Надзвичайна ситуація, РСГ та ТЕЦ
Двигун Стірлінга	2- 10 кВт	до 30	-	РСГ
Паливні елементи	до 1 МВт	35 – 80	-	РСГ
Сонячні фотоелементи	20 Вт – 100 кВт	10-20	2500 – 7000	РСГ і ТЕЦ
Малі гідроелектростанції	5-10 МВт	60 – 80	3400 – 10,000	РСГ
Вітрові турбіни	1 кВт – 3 МВт	20 – 50	800 – 3500	РСГ

1.3 Аналіз результатів теоретичних досліджень

Переважає більшість теоретичних досліджень систем D-CAES була спрямована на пошук шляхів підвищення загальної ефективності, інтеграції їх з ВДЕ. В роботі [7] було зроблено висновок, що низька ефективність цих систем в основному пов'язана з низьким ККД турбін, що вимагає подальших досліджень з розробки малогабаритних турбін з вищим ККД.

Детальний енергетичний та ексергетичний аналіз малої системи CAES був виконаний в роботі [8], і шляхом тестування різних процесів стиснення і розширення для посудини постійного тиску було показано потенціал високої ефективності системи, до 60%, для квазіізотермічних процесів як в пристроях стиснення, так і в пристроях розширення. В роботі [9] досліджено систему змінної конфігурації з вхідною потужністю 500 кВт на основі ВДЕ, яка здатна

виробляти 14 400 МДж енергії, зберігаючи стиснене повітря під тиском 200 бар, при тривалості заряджання 8 годин. Загальна ефективність системи може досягати 72%, хоча це значення було завищено через спрощення, прийняті в моделі.

Для того, щоб зменшити втрати ексергії, спричинені дросельним клапаном, і покращити продуктивність системи, в [10] запропоновано нову систему EA-CAES, де E означає додатковий ежектор. Термодинамічний аналіз показав, що за рахунок модифікації стратегії дроселювання ефективність можна підвищити майже на 2%, а прибуток – більш ніж на 21%, порівняно зі звичайними системами A-CAES. Дослідження з [10] також показало, що існує оптимальне значення тиску на вході розширювача для отримання максимальних значень як продуктивності, так і густини збереженої енергії. У цьому дослідженні також було показано, що більший коефіцієнт теплопередачі між баком і навколишнім середовищем, який призводить до квазіпостійної температури повітря в баку під час нагнітання, тобто до квазіізотермічного процесу, є вигідним для циклу і може підвищити ефективність системи.

1.4 Аналіз результатів експериментальних досліджень

В літературі легко знайти деякі гібридні малі CAES системи, потужність яких коливається від 2 кВт до майже 1 МВт. Всі малі D-CAES системи базуються на спіральних розширювачах, які мають низький ККД у порівнянні з турбінами.

Детальний аналіз циклу міні-CAES був проведений в роботі [11] для системи з баком об'ємом 270 л, що зберігає повітря під тиском 11 бар, і використовує невелику турбіну, що обертається зі швидкістю 800 об/хв, що дозволило отримати напругу 8 В. Експерименти ще раз показали велику необхідність розробки більш ефективних розширювальних пристроїв.

З'єднання вітротурбіни з малогабаритною CAES досліджувалося в роботі [11], основним завданням якої було підвищення ефективності перетворення

енергії вітру в стиснене повітря шляхом розробки контролера, який адаптує редуктор до швидкості вітру. Отримані результати показали, що кількість накопиченої енергії залежить від максимального тиску в баку, який, в свою чергу, контролюється робочою швидкістю вітру. У Ворвіку, Англія, гібридна система CAES, що також включає вітрову турбіну, була розроблена [10], будучи експериментальною установкою, яка все ще перебуває на стадії будівництва, і призначена для оптимізації виробництва електроенергії при низьких швидкостях вітру.

Пілотна установка Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES) була нещодавно побудована, з метою оцінки потенціалу гірських каверн для зберігання стисненого повітря, що витримує навантаження, а також для оцінки ефективності накопичувача теплової енергії TES з використанням ущільненого шару гірських порід, розміщеного всередині каверн. Оціночна ефективність становила від 63% до 74%.

Що стосується малогабаритних розширювачів, то невелика турбіна діаметром 10 мм була виготовлена в Бельгії, і за допомогою стисненого повітря вона змогла виробити потужність на валу майже 30 Вт з ККД 18,5%. Пізніший експеримент, проведений у 2017 році, дозволив створити більшу турбіну для стисненого повітря, але все ще невеликих розмірів, вхідний тиск якої варіювався між 1,2 і 1,6 бар, і вона змогла виробити максимальну вихідну потужність 700 Вт, з ККД майже 60%.

1.5 Висновки до розділу

1. Сучасна енергетика йде шляхом створення стійкої та більш екологічної системи виробництва електроенергії, заснованої на розподіленій системі генерації (РСГ), замість традиційної централізованої системи генерації (ЦСГ), оскільки на останню припадає понад 20% втрат у системах передачі та розподілу електроенергії. Однак самі по собі РСГ не можуть задовольнити попит

на енергію, оскільки через значні зміни погодних умов, тобто непередбачуваність погоди, система виробництва електроенергії не буде ні безперервною, ні надійною. Ці нестабільні джерела збільшують складність стабілізації енергосистеми, створюючи додаткову проблему дисбалансу між попитом і пропозицією, оскільки сам попит також дуже мінливий протягом дня. Для подолання цих труднощів у використанні технологій РСГ існує велика потреба у впровадженні технологій зберігання енергії, щоб забезпечити рівність між попитом та пропозицією енергії, забезпечуючи контрольовану роботу.

2. Однією з можливих альтернатив для зменшення негативного впливу акумуляторів на екологію є зберігання енергії за допомогою систем стисненого повітря, також відомих як системи зберігання енергії стисненого повітря (CAES), які можуть бути адекватним рішенням для довгострокового зберігання енергії великої потужності. Піки виробництва енергії, що перевищують миттєвий попит, можуть бути використані для живлення компресорів і зберігання атмосферного повітря в резервуарах високого тиску.
3. Системи CAES мають одночасно одну з найнижчих цін на одиницю потужності, а також одну з найнижчих цін на одиницю енергії.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Технології зберігання енергії

Для забезпечення можливості виробництва електроенергії в малих масштабах з використанням ВДЕ існує велика потреба в розробці надійних та ефективних технологій зберігання енергії, щоб можна було керувати коливаннями потужності, забезпечуючи безперервне постачання енергії. Технології зберігання енергії зазвичай поділяють на три основні категорії: механічні, теплові та хімічні. Залежно від застосування їх також можна класифікувати на системи малої генерації електроенергії (як правило, ізольовані місця для надзвичайних ситуацій) та системи середньої потужності для незалежного виробництва електроенергії.

Для малих систем РСГ найбільш поширеними технологіями є паливні елементи, маховики, акумулятори та накопичувачі стисненого повітря. Зокрема, для тривалого зберігання з малим часом розряду, використання CAES та паливних елементів видається більш адекватним, порівняно з акумуляторами. Згідно з [5], для систем малої генерації електроенергії суперконденсатори, акумулятори та малі системи CAES є найкращими варіантами з наявних. У таблиці 2.1 представлені найбільш використовувані технології зберігання для малих і середніх та великих енергетичних систем.

Таблиця 2.1 – Огляд технологій зберігання енергії [5]

Технологія	Потужність (МВт)	Енергоємність (кВт-год/м ³)	Ефективність (%)	Час розвантаження	Тривалість зберігання	Капітальні витрати (\$/кВт)
PHS	100 – 5000	0.5 – 1.5	70 – 80	1 – 24 години	години – місяці	600 – 2000
Велика CAES	5 – 300	3-6	40 – 55	1 – 24 години	години – місяці	400 – 800
Малі CAES	0.003 – 3	0.5 – 2.5	до 40	1 година	години – місяці	200 – 250

Продовження таблиці 2.1

Технологія	Потужність (МВт)	Енергоємність (кВт-год/м ³)	Ефективність (%)	Час розвантаження	Тривалість зберігання	Капітальні витрати (\$/кВт)
Свинцево-кислотний акумулятор	0 – 20	15-70	75 – 85	Секунди – години	хвилини – дні	300 – 800
Нікель-Кадмієва батарея	0 – 40	20 – 80	60 – 85	Секунди – години	хвилини – дні	500 – 1500
Літієва батарейка	0 – 0.1	200 – 500	85 – 95	Хвилини – години	хвилини – дні	1500 – 4000
Конденсатор	0 – 0.05	10-30	60 – 75	Секунди – година	секунди – хвилини	200 – 750
Маховик	0 – 0.250	20 – 80	90 – 95	Секунда – хвилини	секунди – хвилини	250 – 750
НТ TES	0 – 60	120 – 300	30 – 60	1 – 24 години	хвилини – дні	200 – 300
Паливні елементи	0 – 50	500 – 3000	20 – 50	Секунда – 24 години	години – місяці	+ 10,000

2.2 Зберігання енергії стисненого повітря

Зберігання енергії стисненого повітря – це стара концепція, яка почала досліджуватися у другій половині двадцятого століття, хоча й не набула широкого впровадження у світі. Системи CAES можна згрупувати в декілька категорій, відповідно до способу використання стисненого повітря для виробництва енергії. З усіх існуючих категорій, представлених в [5], тут можна виділити чотири основні категорії:

I. Традиційні CAES: складаються з типового циклу Брейтона, який використовує майже дві третини доступної потужності в процесі стиснення повітря. Він розділяє процеси стиснення і розширення в часі, щоб використовувати надлишок електроенергії в години непікового споживання для стиснення повітря в підземних великих соляних або кам'яних печерах. Потім система спирається на реалізацію CAES з традиційним циклом Брейтона, де

турбіна і компресор розділені на окремі фази роботи. Таке розділення процесів дозволяє станції CAES виробляти втричі більше енергії з тієї ж кількості палива, якщо порівнювати з типовим циклом Брейтона. Спалювання палива за допомогою стисненого повітря збільшує споживання палива та викиди CO_2 , а також значні теплові втрати під час фази стиснення, що призводить до зниження загальної ефективності. Однак важливо пам'ятати, що вхідна енергія для стиснення була безкоштовною.

У світі вже існує декілька традиційних установок CAES, перша з яких була реалізована в 1978 році в Хантінгтоні, США.

Перша з них була введена в експлуатацію в 1978 році в Ханторфі, Німеччина, яка, використовуючи велику підземну печеру, змогла генерувати 290 МВт протягом 4 годин (рис. 2.1, 2.2). Пізніше подібна станція була встановлена в Макінтоші, штат Алабама, США, яка змогла безперервно виробляти 110 МВт протягом 26 годин (рис. 2.2

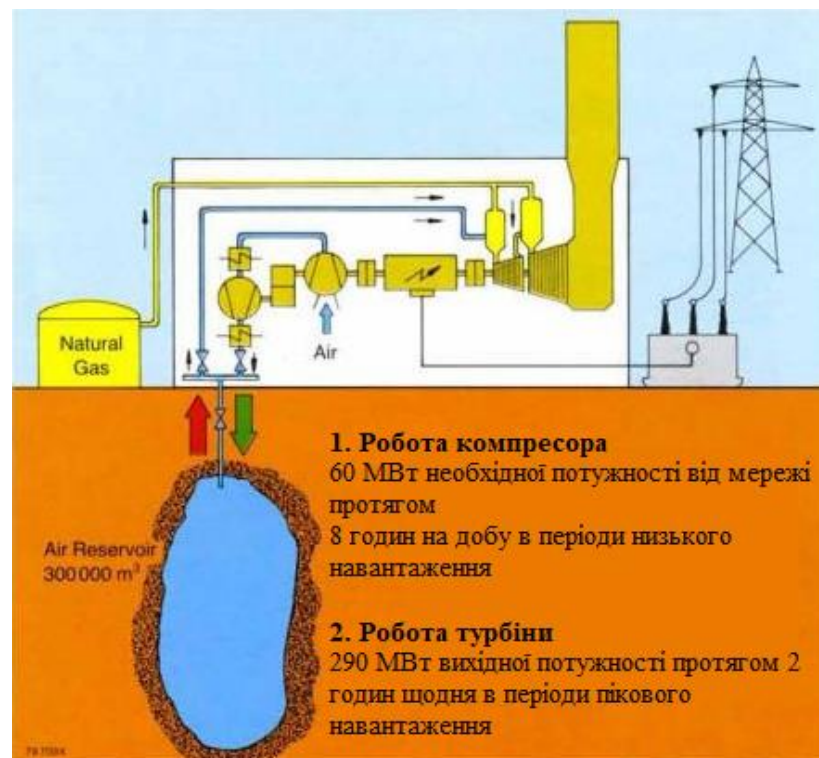


Рисунок 2.1 – Принцип роботи системи CAES Ханторф у Німеччині [12]

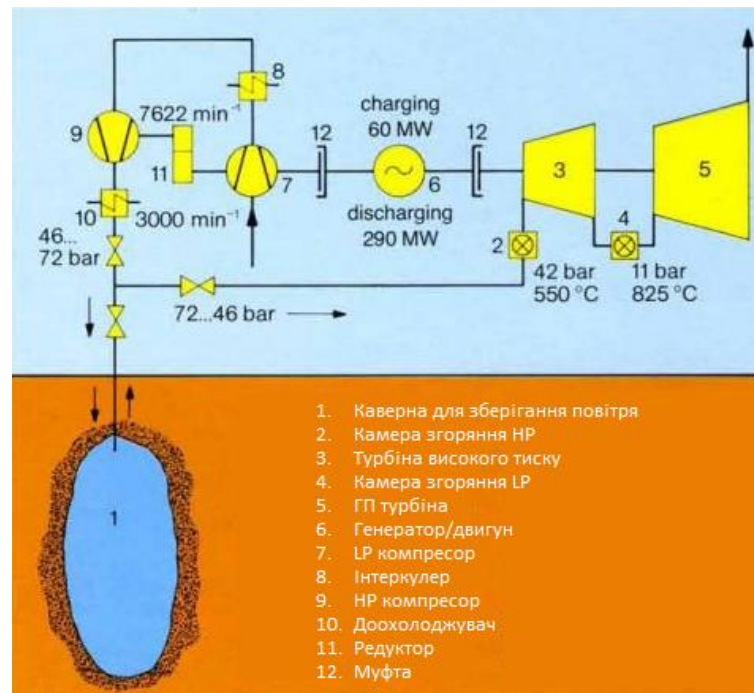


Рисунок 2.2 – Принцип роботи системи CAES: Схематичне зображення станції Ханторф у Німеччині [12]

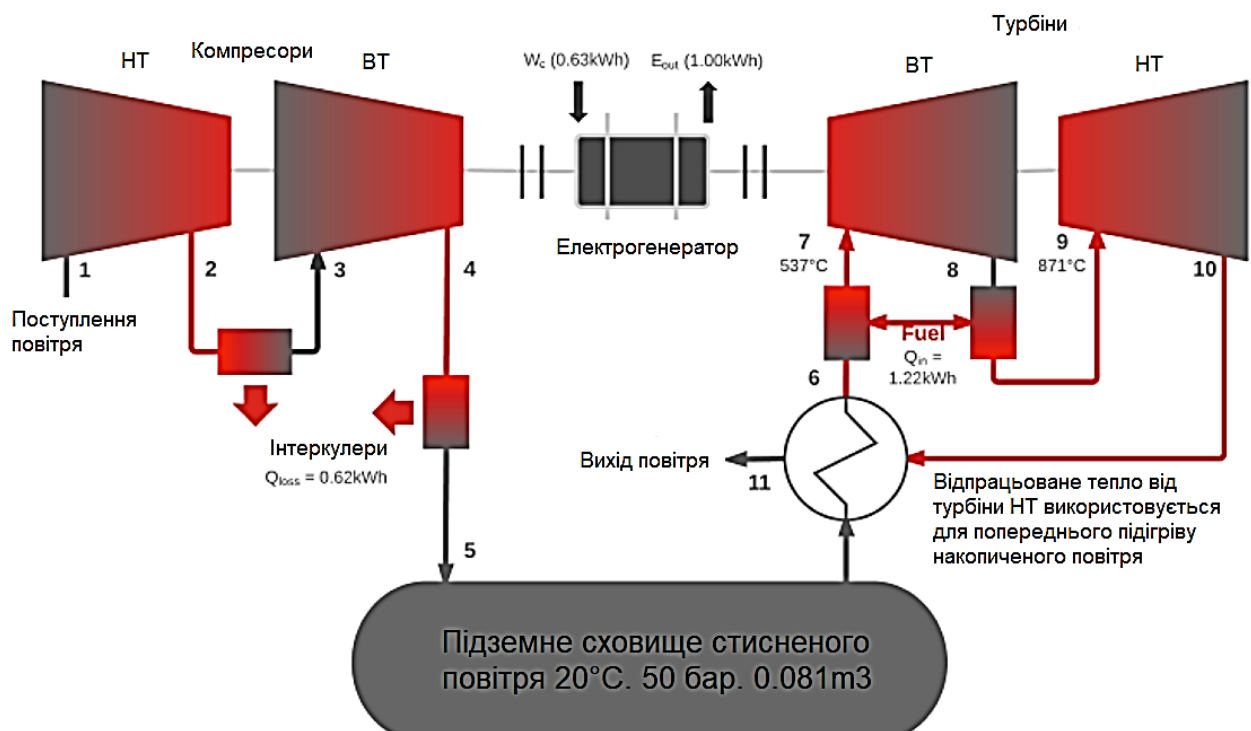


Рисунок 2.3 – Принцип роботи системи CAES: Схематичне зображення станції McIntosh в Алабамі, США [13]

II. Адіабатична CAES (A-CAES): ця конфігурація системи CAES має на меті зменшити споживання палива у порівнянні зі звичайною CAES, підтримуючи повітря при високих температурах перед розширенням. Це досягається, головним чином, завдяки впровадженню технології акумулювання теплової енергії (TES), основна функція якої полягає у відновленні втраченого тепла під час стиснення і подальшому використанні його для попереднього підігріву повітря перед входом в турбіну. Термодинамічний аналіз системи A-CAES довів, що вона може покращити загальну продуктивність традиційної системи, і в результаті можна отримати 30% збільшення загальної ефективності. Також було досліджено використання ізолюваного резервуару, показаного на рис. 2.4, і результати показали, що його можна використовувати лише протягом коротких періодів часу, що може бути достатнім для невеликих систем, де є потреба у зберіганні лише протягом коротких періодів часу.

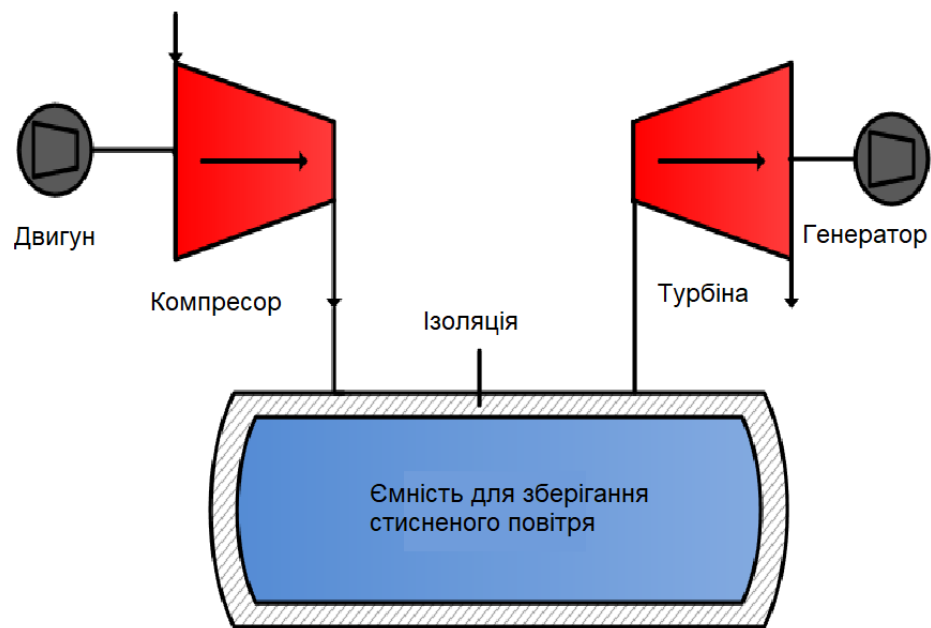


Рисунок 2.4 – Установка CAES з ізолюваним баком [12].

III. Ізотермічні CAES (I-CAES): I-CAES намагаються запобігти підвищенню температури в компресорах під час заряджання і падінню температури під час розряджання в розширювальних пристроях. Зазвичай отримують коли процеси стиснення і розширення протікають повільно, і

дозволяють здійснювати значний теплообмін між повітрям і навколишнім середовищем, підтримуючи його майже постійну температуру. Ця система, зображена на рис. 2.5, заснована на впорскуванні води або масла під час процесу стиснення, і ці гарячі рідини потім повторно впорскуються під час фази розширення для підігріву повітря, що надходить до турбіни. Система I-CAES все ще перебуває на стадії розробки, і для досягнення вищих рівнів продуктивності потрібні подальші вдосконалення теплопередачі.

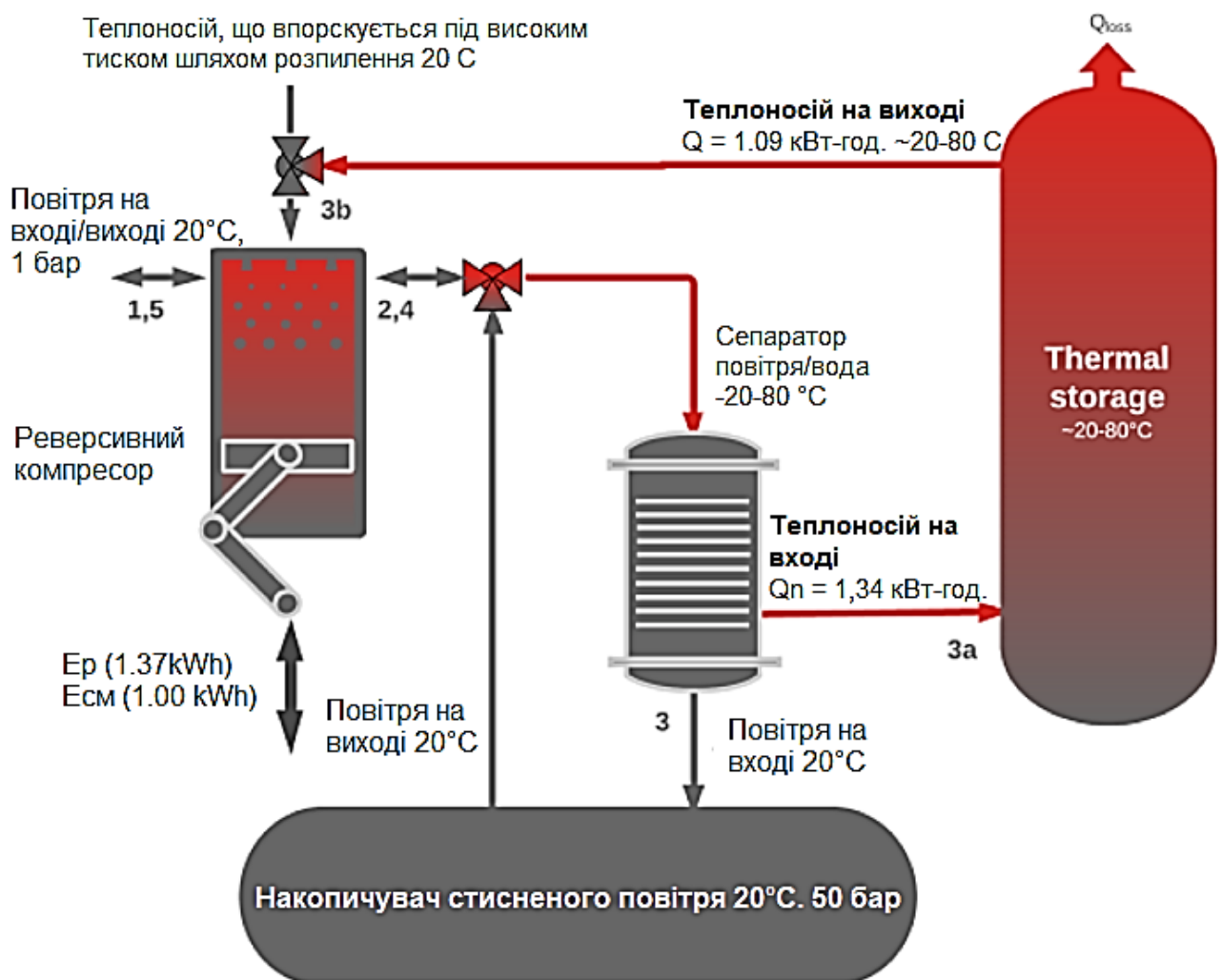


Рисунок 2.5 – Схема прототипу ізотермічної установки CAES [13].

IV. Розподілені CAES (D-CAES): маломасштабна система CAES, представлена на рис.2.6, розглядається як адекватне рішення для РСГ на основі CAES з використанням повітряних резервуарів високого тиску. Повітря можна стискати, використовуючи піки енергопостачання, або навіть ВДЕ (зокрема, сонячну енергію або енергію вітру), зберігаючи його в балонах під тиском до 300 бар, що дозволяє досягти ККД до 50% [5]. Це рішення також має деякі переваги порівняно з іншими системами РСГ: 1) безпечна та екологічно чиста технологія, 2) може вироблятися з ВДЕ для економічно ефективного електропостачання, 3) менше обмежень щодо встановлення та 4) простіше у виробництві. З іншого боку, є й певні недоліки: оскільки ця технологія не набула широкого застосування, ефективність процесів стиснення і розширення є низькою, що призводить до відносно низької загальної ефективності.

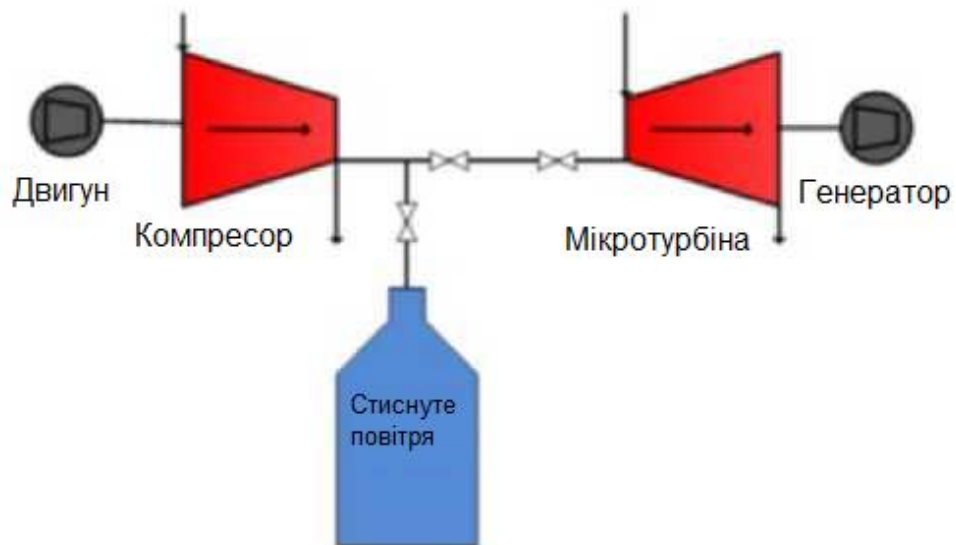


Рисунок 2.6 – Схема розподіленої системи CAES [12].

2.3 Пристрої розширення

Пристрій розширення, або просто розширювач, використовується для рекуперації енергії, шляхом вилучення енергії робочої рідини і перетворення її в механічну роботу. Невеликий розширювач є життєво важливою частиною в системі D-CAES, і він суттєво впливає на її продуктивність з точки зору

ефективності, а також вартості виробництва електроенергії. Тому вибір розширювача є надзвичайно важливим при проектуванні цих систем. Для вибору відповідного розширювача необхідно враховувати декілька параметрів: умови роботи циклу, розмір системи та властивості робочої рідини. Розширювачі для малих застосувань зазвичай поділяються на дві основні категорії: розширювачі швидкісного або динамічного типу та об'ємні розширювачі.

Перші, також відомі як турбіни або турбокомпресори, призначені для перетворення кінетичної енергії рідини, що проходить, у форму механічної роботи за допомогою обертового валу з набором лопатей. Турбіни, що використовуються в енергетичних системах, поділяються на осьові та радіальні, і, незважаючи на малі масштаби, які тут розглядаються, вони працюють подібно до звичайних турбін. Осьові турбіни є більш поширеними в системах з високою швидкістю потоку, з низьким відношенням тиску, і завдяки осьовому потоку через лопаті, осьові турбіни мають менші аеродинамічні втрати і вищу ефективність. Радіальні турбіни є найкращим вибором, коли застосування вимагає низької масової витрати і високого відношення тиску. Для невеликих вихідних потужностей радіальна турбіна створює менше механічних навантажень, що дозволяє зробити її конструкцію простішою, надійнішою і ефективнішою (в аналогічному діапазоні потужностей), порівняно з осьовими турбінами.

Що стосується об'ємних детандерів, то вони більш поширені в мікро-ТЕЦ (теплоелектроцентралях). Вони використовуються, коли застосування вимагає низької масової витрати, низької швидкості обертання і високого тиску на вході. Існує чотири основні типи об'ємних розширювачів:

1. Спіральний розширювач: загальний для всіх об'ємних пристроїв, спіральний розширювач має фіксоване об'ємне співвідношення. У порівнянні з турбінами, він має нижчий рівень продуктивності через тертя і втрати тиску.

2. Гвинтовий розширювач: складається з пари гвинтових роторів в одному корпусі, а енергія передається в результаті зміни об'єму між обома

роторами. Гвинтові розширювачі з невеликою потужністю все ще знаходяться в стадії розробки і їх важко знайти на ринку.

3. Поршневий розширювач: поршневий розширювач є більш складним у порівнянні з іншими розширювачами через складну систему клапанів як для впуску, так і для випуску. Крім того, на загальну продуктивність циклу впливають втрати, що виникають через тертя між поршнем і циліндром.

4. Роторно-лопатевий розширювач: також відомий як розширювач з повітряним двигуном, в ньому використовуються лопаті, що приводяться в рух стисненим повітрям. Він простий у виготовленні і має нижчу собівартість порівняно з іншими розширювальними пристроями.

Огляд цих розширювачів можна знайти в таблиці 2.2, де детально описані типові значення декількох параметрів, таких як потужність.

Таблиця 2.2 – Огляд основних розширювальних пристроїв, що використовуються в літературі [14].

Технологія	Потужність (кВт)	ККД (%)	Швидкість обертання (об/хв)	Відношення тисків
Радіальна турбіна	0,15 – 30	30 – 85	до 100 000	1,5-5
Спіральний розширювач	0,5 – 3,5	10-80	500 – 5000	1,5- 10,5
Гвинтовий розширювач	0,5 – 15,5	25 – 70	400 – 3500	2-10
Роторно-лопатевий розширювач	0,8 – 2,2	17,5 – 55	300 – 4500	2 – 24
Поршневі Поршневий розширювач	0,2 – 20	10,5 – 65	100 – 200	2,1 – 2,4

2.4 Конфігурація системи

Враховуючи всі попередні міркування, обсяг цієї роботи складатиметься з проектування системи РСГ з використанням CAES, як показано на рис. 2.7. Враховуючи те, що ці дві концепції перетинаються, ці системи також можна назвати D-CAES, як згадувалося раніше. Невеликий резервуар для стисненого повітря, який буде наповнюватися за рахунок ВДЕ або надлишків виробництва енергії, буде з'єднаний з невеликою турбіною, щоб протягом певного періоду часу виробляти невеликі обсяги електроенергії.

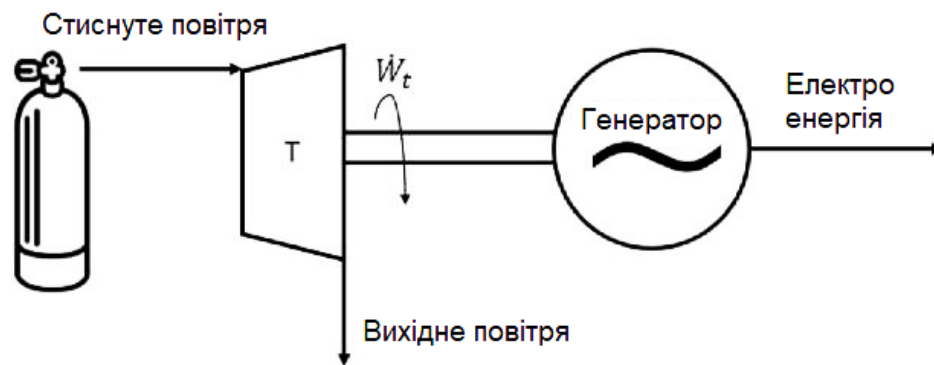


Рисунок 2.7 – Конфігурація системи

Як згадувалося раніше, зарядка резервуару буде здійснюватися за рахунок надлишків енергії в непікові години споживання, а також ВДЕ (сонячних фотоелементів або вітру) – рис. 2.8, що дозволяє заряджати систему без будь-яких додаткових витрат.

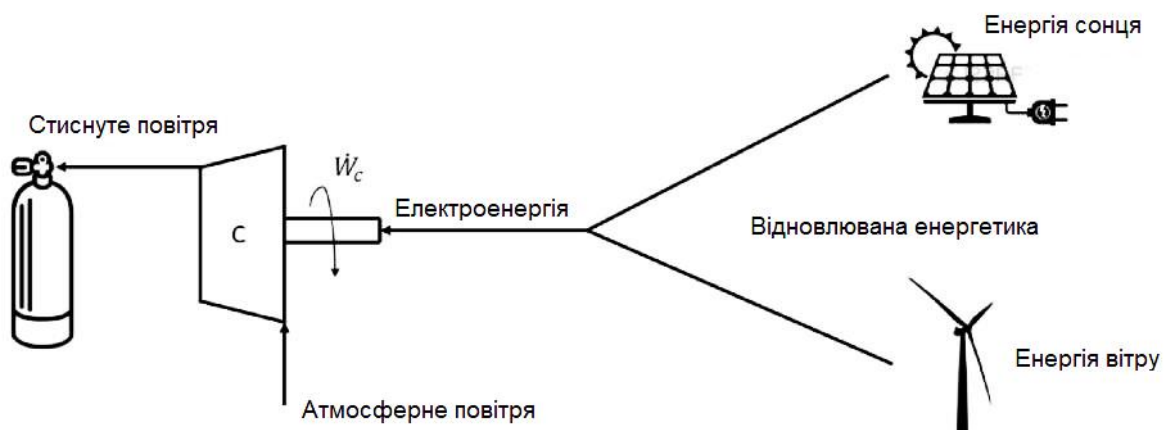


Рисунок 2.8 – Схема заряджання системи

Серед усіх раніше розглянутих пристроїв розширення вибір на користь малої турбіни, також відомої як мікротурбіна (МТ), був зумовлений її вищим співвідношенням потужності до ваги та ефективністю. Турбіни мають більш компактні розміри, вони більш надійні, з меншими витратами на експлуатацію та обслуговування, нижчим рівнем шуму і більш гнучкі з точки зору палива, що використовується.

Система D-CAES може бути застосована кількома способами. Перший, пікове згладжування, передбачає використання D-CAES для зменшення витрат на пікове виробництво і підвищення загальної ефективності, а також зменшення інвестицій в об'ємну передачу. Система також може бути використана для резервної генерації, забезпечуючи безперебійне живлення (ДБЖ). Вона також може використовуватися як резервний генератор, тобто резервна електрична система, яка працює, коли це необхідно. Останнє і найважливіше із згаданих тут застосувань пов'язане з концепцією портативності. Спостерігається зростання попиту на портативні електричні пристрої, особливо у військовому застосуванні. Тому система D-CAES може бути використана для віддаленого електропостачання, тобто в місцях, де будівництво мереж неможливе або економічно недоцільне, тобто вартість будівництва мереж є вищою, ніж у системи РСГ. Гнучкість використання палива, що забезпечується застосуванням МТ, також є визначальним фактором для використання у віддалених додатках, що призводить до значного зниження інвестиційних витрат.

2.5 Висновки до розділу

1. Для тривалого зберігання з малим часом розряду, використання CAES та паливних елементів є більш адекватним шляхом, порівняно з акумуляторами.

2. Розроблено міні-акумулятор на стисненому повітрі. Він містить невеликий резервуар для стисненого повітря, який буде наповнюватися за рахунок ВДЕ або надлишків виробництва енергії, буде з'єднаний з невеликою турбіною, щоб протягом певного періоду часу виробляти невеликі обсяги електроенергії.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Опис моделі системи зберігання енергії стисненого повітря

У цьому розділі представлено модель системи, що базується на конфігурації, описаній у розділі 2. Основною метою цієї моделі є отримання простого способу оцінки продуктивності системи, особливо з точки зору ефективності, загального обсягу виробленої енергії та загального часу роботи, що буде зроблено на прикладі системи, зображеної на рис. 3.1.

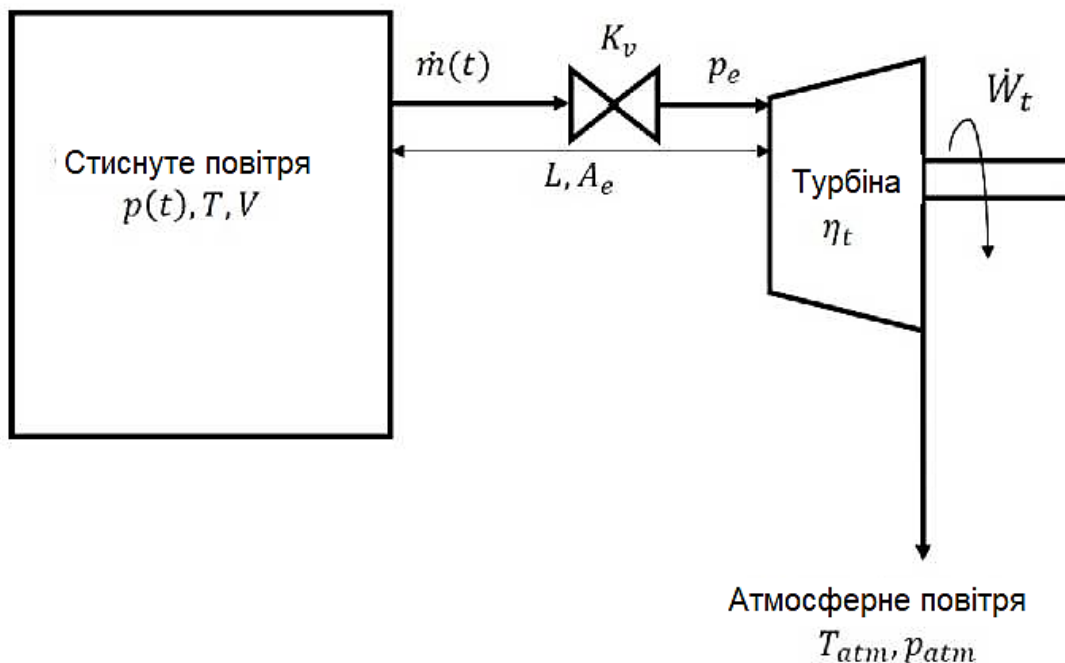


Рисунок 3.1 – Конфігурація, яка буде використана в математичній моделі.

Модель базується на простих одновимірних рівняннях термодинаміки та механіки рідини з використанням моделі ідеального газу і призначена для отримання звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) для дослідження еволюції процесів стиснення та розширення в часі. Ці ЗДР будуть розв'язуватися чисельно за допомогою програми MATLAB, що дає на виході еволюцію тиску в резервуарі в часі, яка потім буде використана для отримання інших змінних, що характеризують роботу системи.

Цей розділ починається з короткого огляду деяких понять термодинаміки, а також деяких основ чисельних методів, щоб зрозуміти, як будується модель і як отримуються результати. Після отримання розв'язку ЗДР будуть представлені деякі результати, отримані за допомогою моделі, для того, щоб обговорити доречність деяких конструктивних параметрів, а також їх вплив на загальну продуктивність системи.

3.2 Термодинамічні процеси при стисканні повітря

Оскільки більшість рівнянь, отриманих у цьому розділі, ґрунтуються на простій термодинаміці та механіці рідини, важливо надати короткий огляд основних принципів збереження, представивши основні рівняння збереження маси, імпульсу, енергії та ентропії, отримані в базових підручниках [15].

Диференціальна форма балансу маси просто задається наступним рівнянням, де підрядкові індекси i та e означають вхід та вихід з контрольного об'єму, відповідно.

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

Щодо збереження імпульсу, також відомого як 2-й закон Ньютона, диференціальна форма задається рівняннями Нав'є-Стокса (НС). Оскільки ця модель буде одновимірною (1D), рівняння НС вздовж напрямку x , з нульовою швидкістю в інших напрямках ($u_y = u_z = 0$) і нехтуючи впливом сили тяжіння, просто задається наступним рівнянням, де U представляє швидкість потоку вздовж x , а ν – кінематичну в'язкість рідини.

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

Перший закон термодинаміки можна виразити у вигляді балансу енергії, диференціальна форма якого подана наступним рівнянням.

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

де Q і W представляють, відповідно, теплоту і роботу, якими обмінюється система з навколишнім середовищем.

Нарешті, рівняння, яке формулює 2-й закон термодинаміки, принцип збереження ентропії, можна описати за допомогою наступного рівняння.

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

де σ_{cv} позначає часову швидкість виробництва ентропії через незворотності, присутні в контрольному об'ємі.

Перший доданок у правій частині рівняння, $\int_A \left(\frac{\dot{q}}{T} \right)_b dA$ представляє швидкість перенесення ентропії, що супроводжує теплопередачу.

Крім цих рівнянь, рідиною, що використовується в цій моделі, буде повітря, яке через низькі значення тиску і температури (нижче критичних значень [15]) буде моделюватися як ідеальний газ з постійними властивостями, рівняння стану якого описується наступним рівнянням.

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

$$R = \frac{R_o}{M_{пов}} = 287 \text{ Дж / кг.К} - \text{повітряна стала.}$$

3.3 Чисельні методи розв'язування звичайних диференціальних рівнянь

ЗДР часто зустрічаються в математичних моделях науки, техніки і навіть економіки. Існує лише декілька ситуацій, коли аналітичний розв'язок може бути знайдений, що вимагає використання чисельних методів для пошуку наближених розв'язків. Типове звичайне диференціальне рівняння (ЗДР) першого порядку має на меті визначити функцію u , яка задовольняє

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

Для визначення єдиного розв'язку потрібна додаткова умова, яка зазвичай визначає значення u в єдиній точці області, $u(t_0) = u_0$. З цієї точки визначається розв'язок u для решти точок області. Оскільки змінна t зазвичай представляє час, ці задачі називаються задачами з початковими значеннями.

Найпоширеніший спосіб розв'язання цих рівнянь – розбиття неперервної часової області на декілька дискретних точок, відокремлених кроком за часом $\Delta t_i = t^{i+1} - t^i$. Припускаючи тепер постійний крок за часом, $\Delta t = h$, і інтегруючи обидва члени рівняння 3.6, між t і $t + h$, отримаємо наступне:

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

Легко помітити присутність функції u в інтегралі, що унеможливило б обчислення інтеграла в явному вигляді, оскільки u є функцією, яку ми намагаємося визначити. Позначивши через $F_h(t, u)$ наближене значення інтеграла, всі значення u можна апроксимувати наступним чином:

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

Для чисельного розв'язання інтеграла, а отже, отримання значень функції u в інших точках області, найпростішим способом є використання методів Ейлера. У цих методах область розбивається на N точок, однаково віддалених одна від одної на h . Інтеграл обчислюється за допомогою правила інтегрування прямокутником, причому для цього є два варіанти:

1. Явний метод Ейлера: інтеграл апроксимується за попередньо відомою точкою (n)

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

2. Неявний метод Ейлера (формули зворотного диференціювання – BDF): інтеграл апроксимується значенням функції в наступний момент часу ($n + 1$)

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

Стійкість другого методу не залежить від кроку за часом. Однак він передбачає розв'язання рівняння на кожній ітерації, що, якщо воно нелінійне, може збільшити складність задачі.

Однак методи Ейлера мають точність лише першого порядку [16]. У випадку нежорсткого ЗДР можна застосувати методи Рунге-Кутта. Ці методи зазвичай вважаються простими покроковими методами, але передбачають кілька проміжних обчислень на кожній ітерації. Ці методи жертвують ефективністю методів Ейлера для того, щоб підвищити точність отриманого розв'язку [16]. Один з найпопулярніших методів, метод Рунге-Кутта 4-го порядку, вимагає чотирьох обчислень f на кожному часовому кроці. Метод п'ятого порядку, наприклад, вже не є ефективним, оскільки вимагає шість обчислень функції f на кожному кроці [16].

Іноді виникає потреба розв'язати ЗДР порядку вище одиниці. Найпоширенішим способом розв'язання таких задач є перетворення ЗЛП вищого порядку в систему ЗЛП першого порядку. Розглянемо тепер задачу:

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

з початковими умовами:

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

Враховуючи, що $u_1 = u$, перетворення, яке потрібно застосувати, наступне:

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

У системах ЗДР зазвичай є компоненти розв'язку з абсолютно різними поведінками: швидкі перехідні процеси накладаються на повільніші еволюції. Це явище призводить до жорсткості системи, де іноді саме менш значущий компонент розв'язку є тим, що визначає часовий крок. Згідно з [16], задача вважається жорсткою, якщо розв'язок, який шукається, змінюється повільно, але існують близькі розв'язки, які змінюються швидко, так що чисельний метод повинен робити невеликі кроки для отримання задовільних результатів. Жорсткість – це, в основному, питання ефективності: нежорсткий розв'язувач може розв'язати жорстку задачу, але це займе багато часу!

Найпопулярнішими методами для розв'язання жорстких задач є формули BDF. Вони мають дуже просту форму, коли розмір кроку залишається постійним і використовуються зворотні різниці.

Іншою альтернативою для жорстких систем є використання формул Розенброка. Вони класифікуються як лінійно неявні, оскільки обчислення u_{n+1} вимагає розв'язання системи лінійних рівнянь. Ці формули вимагають, однак, обчислення похідної від f на початку кроку. У зв'язку з необхідністю знати значення похідної (якобіана) були розроблені альтернативні формули: модифіковані формули Розенброка. Головною особливістю цих модифікованих формул є те, що вони не залежать від наявності точного якобіана.

Розв'язувач у MATLAB, який буде використано для ОДЗ, представленого в розділі 3.5, що вимагав здатності розв'язувати жорсткі ОДЗ, базуватиметься на цих модифікованих формулах Розенброка. Це розв'язувач `ode23s`, і він був обраний як більш ефективний і стабільний для розв'язування жорстких задач, ніж формули BDF. Цей розв'язувач особливо ефективний, коли якобіани мають власні значення близькі до уявної осі, і серед усіх протестованих розв'язувачів саме він виявився найефективнішим.

3.4 Термодинамічна модель

При моделюванні процесів заряджання або розряджання цистерни стисненим повітрям розрізняють дві граничні ситуації для процесів: адіабатичну та ізотермічну. Перша зазвичай пов'язана зі швидкими процесами, коли теплообмін не встигає відбутися. Друга, ізотермічна, зазвичай застосовується, коли процес тривалий у часі, і тому може з'явитися тепловіддача, що призводить до квазірівноваги між температурою повітря, що зберігається, і температурою навколишнього середовища.

Щоб вибрати найбільш адекватне рішення для цієї проблеми, зокрема, було проведено дослідження теплопередачі в резервуарі. Метою дослідження є визначення характерного часу теплопередачі, а потім порівняння його з запланованим часом роботи системи. Якщо час теплопередачі перевищує час роботи, процес можна вважати швидким, що призводить до використання адіабатичного припущення. З іншого боку, якщо характерний час теплопередачі

менший за час роботи системи, то використовується припущення про ізотермічність.

Розглянемо тепер термодинамічну систему на рисунку 3.2, де неадіабатичний резервуар заповнений стисненим повітрям. Початкова температура в резервуарі задана через T_0 , і завдання полягає в тому, щоб визначити закон зміни температури в резервуарі, доки вона не досягне температури навколишнього середовища T_{amb} . Отже, має відбуватися передача тепла від резервуару до навколишнього середовища, тобто $Q < 0$.



Рисунок 3.2 – Термодинамічна система для дослідження теплопередачі

Виконуючи простий енергетичний баланс і нехтуючи ефектами кінетичної та потенційної енергії, з рівняння 3.3 отримуємо наступний результат:

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

Якщо швидкість теплопередачі пов'язана із загальним коефіцієнтом теплопередачі, U_c , то вона матиме вигляд

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

де A – це площа поверхні резервуару. Глобальний коефіцієнт тепловіддачі, U_c , який включає як внутрішню, так і зовнішню конвекцію, а також теплопровідність на стінках резервуару, може бути визначений за формулою:

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

де різницею між площею внутрішньої та зовнішньої поверхні нехтуємо.

Таким чином, можна отримати диференціальне рівняння для температури в резервуарі. Переставивши доданки, отримуємо його:

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

Інтегруючи обидві частини рівняння, можна знайти експоненціальний закон зміни температури, який має вигляд

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

Можна звернути увагу на присутність члена $AU_c/(mc_v)$ в експоненті, який можна віднести до величини, оберненої до характерного часу розпаду, t_{dec} , тобто часу, який знадобився б для того, щоб температура знизилася приблизно до 36,8% ($1/e$) від її початкового значення. Вибір моделі для використання буде пов'язаний з цим часом спаду: якщо він приймає малі значення, порядку секунд, то буде використовуватися ізотермічна модель, оскільки метою є отримання високого часу роботи системи. В іншому випадку, якщо цей час розпаду приймає великі значення, використовується припущення про адіабату.

Щоб оцінити час розпаду, розглянемо тепер кубічний резервуар об'ємом 1 м^3 і площею поверхні 6 м^2 , яку вважатимемо однаковою як для внутрішньої, так і для зовнішньої поверхні, оскільки товщина резервуару повинна бути відносно невеликою (порядку 1 см). Значення коефіцієнтів конвективної

тепловіддачі приймемо рівними $25 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, що характерно для природної конвекції повітря [17], а теплопровідність – 20 Вт/мК , що характерно для нержавіючої сталі. Маючи ці значення, можна оцінити час розпаду:

$$t_{dec} = \frac{mc_v}{AU_c} = \frac{\rho Vc_v}{AU_c} \quad (3.19)$$

і це дає характерний час у кілька секунд (порядок десятків секунд).

Зважаючи на ці результати, а також на те, що час роботи системи має перевищувати півгодини (1800 с), було обрано ізотермічну модель. Тривалий час роботи забезпечить тепловіддачу і підтримання температури повітря майже на постійному рівні. Це було підтверджено експериментально в роботі [17], де було показано, що тривалий час роботи як для процесів заряду, так і для процесів розряду наближає процеси до ізотермічних, а не до адіабатичних.

Окрім фактору часу, слід також враховувати складність створення ідеально адіабатичного резервуару. Навіть якби процеси можна було змоделювати як адіабатичні, якщо врахувати, що повітря іноді може зберігатися протягом тривалого часу (тижнів або навіть місяців), теплообмін все одно відбуватиметься і призводитиме до зниження як температури, так і тиску повітря. У розділі 1 також згадувалося, що найкращі показники для систем CAES були отримані при високих коефіцієнтах теплопередачі, які б наближали процес до ізотермічного розвитку.

Для досягнення квазіізотермічного процесу, якщо він не відбувається природним шляхом, необхідно охолоджувати повітря за допомогою теплообмінника. Перевагою зберігання повітря при температурі навколишнього середовища, тобто квазіізотермічного процесу, є уникнення теплових втрат при зберіганні, а також це дозволяє витратити менше енергії на одиницю маси для стиснення повітря (рис. 3.3), оскільки при однаковому кінцевому тиску в резервуарі можна зберігати більше повітря, якщо підтримувати нижчу температуру (рис. 3.4). Недолік ізотермічного зберігання пов'язаний з нижчою температурою повітря, коли воно розширюється через турбіну, що призводить

до нижчих значень виробленої потужності, а отже, може призвести до нижчої енергетичної щільності системи.

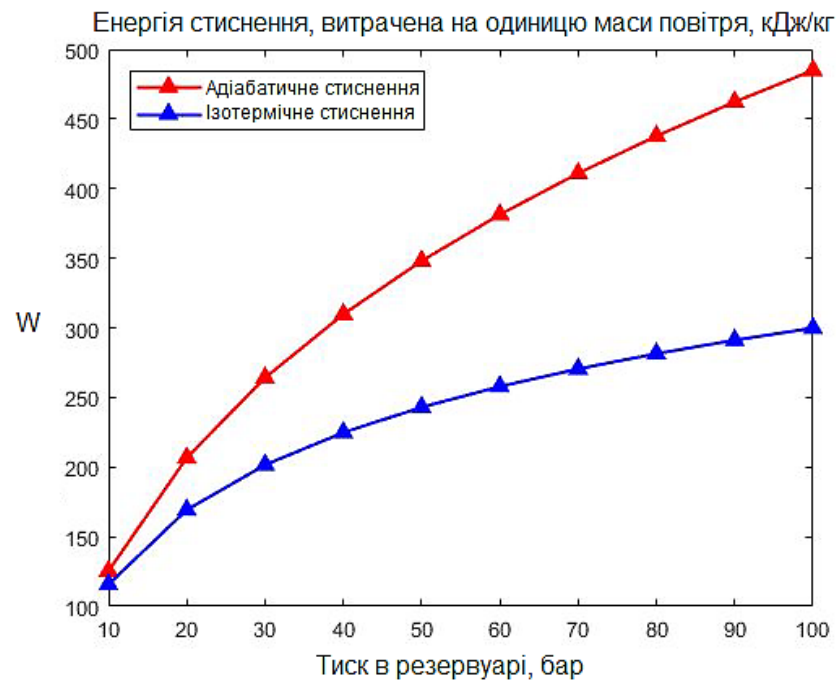


Рисунок 3.3 – Енергія стиснення, витрачена на одиницю маси повітря, що зберігається при адіабатичному та ізотермічному стисненні

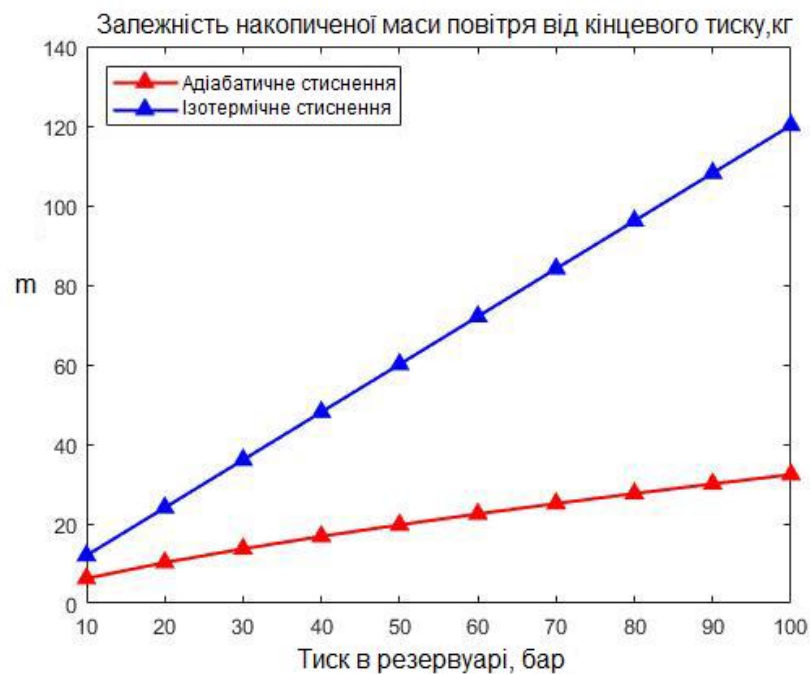


Рисунок 3.4 – Залежність накопиченої маси повітря від кінцевого тиску в балоні для адіабатичного та ізотермічного стиснення

3.5 Моделювання процесу заряджання резервуара

Процес стиснення повітря в напірний бак має енергетичні витрати, які необхідно оцінити кількісно. Першим кроком у цьому розділі буде отримання рівняння, яке дозволить кількісно оцінити загальну роботу, витрачену в процесі стиснення. Розглядаючи систему на рисунку 3.5, де початкові умови в резервуарі такі ж, як і в атмосфері, T_{atm} і p_{atm} , бажане рівняння легко отримати, виконавши перехідні баланси маси і енергії для системи, і інтегруючи їх між початковими і кінцевими умовами, коли резервуар заповнений до потрібного тиску.

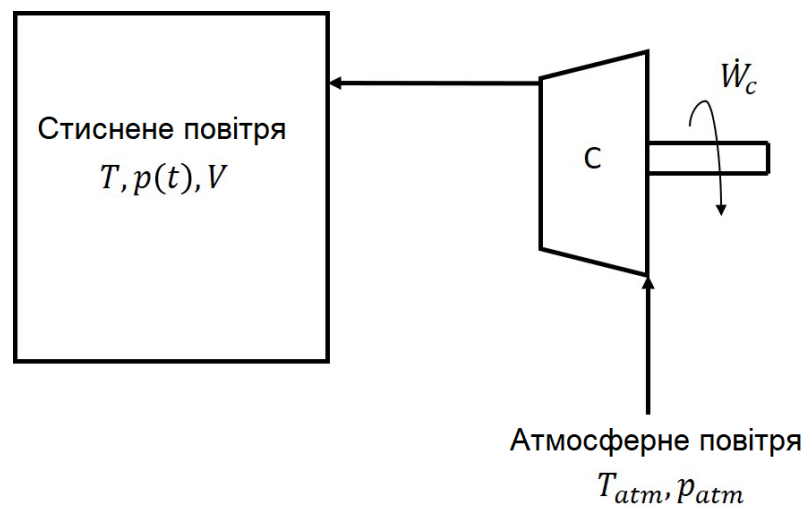


Рисунок 3.5 – Термодинамічна система для процесу наповнення резервуара

Розглядаючи тепер згадану систему, баланс маси з рівняння 3.1 спрощується наступним чином:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i \quad (3.20)$$

Баланс енергії, рівняння 3.3, нехтуючи впливом змін кінетичної та потенційної енергії, просто має вигляд

$$\frac{d \, um}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i \quad (3.21)$$

де член h_i відноситься до ентальпії атмосферного повітря, оскільки повітря, яке використовується для заповнення резервуару, береться з атмосфери.

Переставивши останнє рівняння і застосувавши модель ідеального газу, тобто $du = c_v dT$ і $dh = c_p dT$, легко отримати наступне рівняння:

$$\frac{d}{dt} mc_v T = \dot{Q} - \dot{W} + \frac{dm}{dt} c_p T_{atm} \quad (3.22)$$

Пам'ятаючи, що температура газу в резервуарі, T , залишатиметься постійною, і враховуючи постійні питомі теплоємності, як зазначалося раніше, попереднє рівняння можна ще більше спростити:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dm}{dt} c_v T - c_p T_{atm} \quad (3.23)$$

Припускаючи тепер, що температура в резервуарі буде залишатися постійною і приблизно дорівнюватиме температурі навколишнього середовища, $T \approx T_{atm}$, і застосовуючи закон ідеального газу (3.5), можна записати наступне:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} T c_v - c_p \Rightarrow -\dot{W} = V \frac{dp}{dt} - \dot{Q} \quad (3.24)$$

де тут використано співвідношення $c_p - c_v = R$.

Інтегруючи за часом попереднє рівняння, можна отримати повну роботу стиснення:

$$-W_c = -V p_2 - p_1 - Q \quad (3.25)$$

де $W_c = \int_1^2 \dot{W}$ – повна енергія, витрачена в процесі. Оскільки в даному випадку робота, виконана в системі, є від'ємною, $-W_c = |W_c|$, тому повна робота стиснення буде просто виражатися через W_c , що представляє її абсолютне значення.

Невідомою величиною, що залишилася, є теплота, передана від системи. Її можна отримати за допомогою балансу ентропії (рівняння 3.4), припускаючи, що процес є оборотним, що для даної системи спрощується наступним чином:

$$\frac{d}{dt} sm = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m}_i s_i \quad (3.26)$$

Інтегруючи рівняння за часом і переставляючи доданки (пам'ятаємо, що $s_1 = s_i$, оскільки початкові умови в резервуарі дорівнюють атмосферним), отримуємо:

$$\frac{Q}{T} = m_2 s_2 - s_i = \frac{p_2 V}{RT} \left[c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_{atm}} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_{atm}} \right) \right] \Rightarrow Q = -p_2 V \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (3.27)$$

оскільки температура в резервуарі вважається постійною і такою, що дорівнює атмосферній.

Підставивши цей результат у рівняння 3.25, отримуємо остаточний вираз для повної роботи стиснення:

$$W_c = V \left[p_2 - p_1 + p_2 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right] \quad (3.28)$$

Тут важливо обговорити припущення про оборотність процесу, оскільки воно може бути неочевидним на перший погляд. Для того, щоб процес теплопередачі вважався оборотним, він повинен відбуватися з нескінченно малою різницею температур і тиску. Оскільки температура в резервуарі повинна залишатися постійною і дорівнювати температурі навколишнього середовища, спонтанне генерування ентропії через температурні градієнти майже відсутнє. Однак під час процесу відбувається підвищення тиску в резервуарі, що може призвести до генерації ентропії. Навіть враховуючи це, ми все одно можемо вважати процес оборотним, якщо процес є повільним, тобто якщо зміна тиску в резервуарі є достатньо повільною, щоб уникнути високих коливань тиску в часі, які могли б призвести до генерації ентропії. Тому,

розглядаючи квазі-рівновагу між резервуаром і навколишнім середовищем, і невеликі збільшення тиску в кожному мить, можна використовувати наближення оборотного процесу. Це не буде точно відображати реальність, але все ж таки дасть орієнтир для розрахунку величини повної роботи стиснення, яка використовується для наповнення резервуара.

Використовуючи тепер результат з рівняння 3.28 і змінюючи кінцевий тиск в резервуарі від 10 до 100 бар, а об'єм резервуару від 200 до 1000 л, еволюцію повної роботи стиснення при зміні цих двох змінних можна спостерігати на рисунку 3.6. Легко зробити висновок, що при використанні компресорів малої потужності, потужністю порядку 10 кВт, загальний час заповнення резервуару в деяких випадках може досягати порядку годин (тисяч секунд) (загальна енергія стиснення порядку МДж), що значно перевищує час розпаду, отриманий в розділі 3.3, що підтверджує припущення про ізотермічну еволюцію у випадку використання компресорів малої потужності, що і є метою, якщо ми ще раз розглянемо ідею портативності.

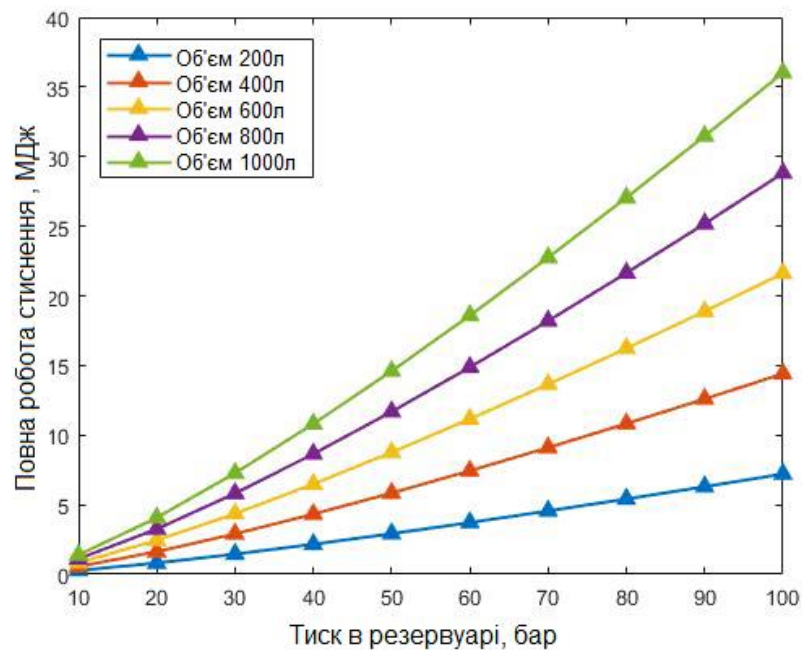


Рисунок 3.6 – Повна робота стиснення як функція кінцевого тиску та об'єму резервуара

3.6 Моделювання процесу «розрядки» ресивера

Після того, як стиснене повітря накопичене в резервуарі, воно буде нагнітатися під постійним тиском, розширюватися через турбіну і виробляти необхідну потужність на валу. У цьому розділі детально пояснюється модель процесу нагнітання. Розглядаючи систему на рисунку 3.7, модель матиме декілька важливих припущень:

1. Повітря в резервуарі буде мати постійну температуру і знаходитиметься в рівновазі з навколишнім середовищем: $T = 290\text{K}$.
2. Швидкість в резервуарі є незначною, тобто ми маємо умови стагнації в резервуарі.
3. Потік вважатимемо одномірним, тобто будь-якими змінами вздовж y та z нехтуватимемо.

Починаючи з рівняння НС вздовж напрямку x , рівняння 3.2, і помітивши, що $U \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial U^2}{\partial x}$, інтегруючи рівняння НС вздовж напрямку x , від 1 до 2 (рисунок 3.7), можна записати

$$\int \frac{\partial U}{\partial t} dx + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = \int v \nabla^2 U dx \quad (3.29)$$

що еквівалентно нестационарному рівнянню Бернуллі, коли член у правій частині дорівнює нулю, тобто ситуації невязкої течії. Цей член має одиниці $(\text{м/с})^2$ і може бути виражений через втрату напору

$$\int v \nabla^2 U dx = -K_v \frac{U^2}{2} \quad (3.30)$$

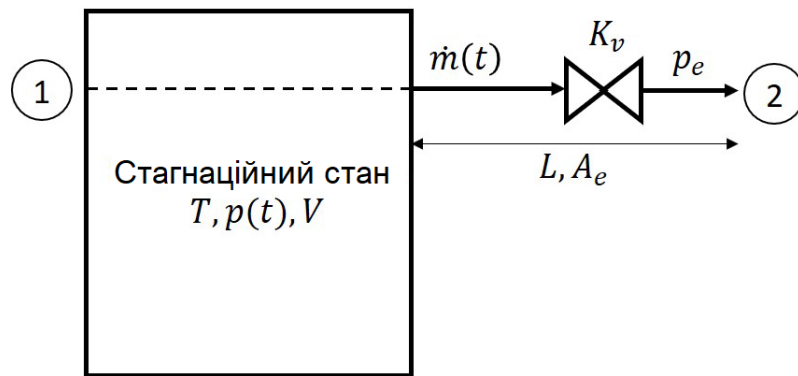


Рисунок 3.7 – Термодинамічна система для процесу спорожнення резервуара коефіцієнта в регуляторі тиску

Насправді ця втрата напору в клапані є функцією різниці тисків перед клапаном і після нього, однак для спрощення моделі і розв'язку ЗНП її значення будемо вважати постійним під час роботи системи.

Оскільки швидкість в резервуарі незначна, а також враховуючи постійний переріз на вихідному трубопроводі, швидкість повинна залишатися постійною вздовж труби, як і її зміна в часі, що призводить до того, що

$$\int_1^2 \frac{\partial U}{\partial t} dx \approx L \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3.31)$$

де L – довжина труби.

Використовуючи закон ідеального газу (рівняння 3.5) і враховуючи постійну температуру повітря в резервуарі, його можна переписати:

$$\int_p^{p_e} \frac{dp}{\rho} = RT \int_p^{p_e} \frac{d\rho}{\rho} = RT \ln\left(\frac{\rho_e}{\rho}\right) = RT \ln\left(\frac{p_e}{p}\right) \quad (3.32)$$

де індекс e відноситься до стану на виході, тобто після регулятора тиску.

Підставивши ці результати в рівняння (3.29), отримаємо наступне рівняння:

$$L \frac{dU}{dt} + RT \ln \left(\frac{\rho_e}{\rho} \right) + \left(\frac{1 + K_v}{2} \right) U^2 = 0 \quad (3.33)$$

Тепер важливо пов'язати тиск і швидкість потоку, що можна легко зробити, застосувавши до системи баланс мас, як показано нижче:

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{m} \Rightarrow V \frac{d\rho}{dt} + \rho_e A_e U = 0 \quad (3.34)$$

З попереднього рівняння, з $\frac{d\rho}{dt} = \frac{V}{RT} \frac{dp}{dt}$, легко отримати як швидкість, так і її похідну:

$$U = -\frac{V}{p_e A_e} \frac{dp}{dt} \Rightarrow \frac{dU}{dt} = -\frac{V}{p_e A_e} \frac{d^2 p}{dt^2} \quad (3.35)$$

де V – об'єм резервуару,

A_e – поперечний переріз вихідного каналу.

Підставивши ці результати в рівняння (3.33), отримаємо остаточний ODE.

$$\frac{d^2 p}{dt^2} - \frac{RT p_e A_e}{LV} \ln \left(\frac{p_e}{p} \right) + \frac{1 + K_v}{2 L p_e A_e} V \left(\frac{dp}{dt} \right)^2 = 0 \quad (3.36)$$

Оскільки це диференціальне рівняння другого порядку, потрібні дві початкові умови. Першою з них є початковий тиск в резервуарі, p_0 , а другою – перша похідна тиску при $t = 0$, де зазначено, що $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{t=0} = 0$, оскільки значення швидкості U при $t = 0$ повинно дорівнювати нулю.

Спостерігаючи за рівнянням, можна помітити, що в ньому присутній логарифмічний член, який ускладнює його розв'язок, оскільки робить рівняння

нелінійним. Тому, як вже зазначалося в розділі 3.2, було обрано розв'язувач ode23s. Для тестування цієї моделі було визначено ще одну процедуру MATLAB [18,19], а також задано деякі тестові значення змінних (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення параметрів, що використовуються для тестування моделі

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Тиск в резервуарі	bar	100
Об'єм резервуара	L	1000
Тиск на виході	бар	2.5
Довжина вихідного каналу	м	0.5
Діаметр вихідного каналу	см	1
Коефіцієнт втрат напору клапана	-	20

Запуск процедури MATLAB, розвантаження резервуару, доки тиск в резервуарі не зрівняється з тиском на виході, p_e , показав еволюцію, зображену на рисунку 3.8.

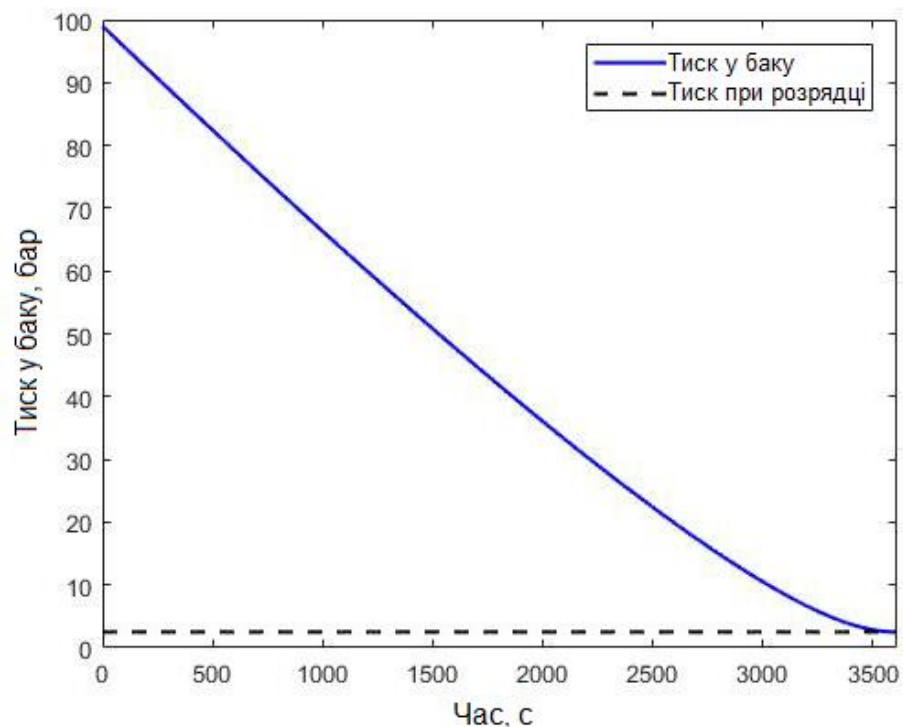


Рисунок 3.8 – Зміна тиску під час розвантаження резервуара

Легко помітити, що тиск починає спадати майже лінійно, але в міру наближення до значення тиску нагнітання, що задається регулятором тиску, його похідна прямує до нуля. Також спостерігається, що при таких параметрах загальний час зливу досягає майже однієї години (3600 с), що також на кілька порядків перевищує час спаду тепловіддачі, що ще раз підтверджує гіпотезу про ізотермічність процесу.

3.7 Виробництво енергії

Отримавши еволюцію тиску в резервуарі та враховуючи постійне значення температури, легко отримати еволюцію загальної маси повітря в резервуарі в часі, використовуючи закон ідеального газу.

Знаючи значення маси повітря в резервуарі в кожний момент часу, можна розрахувати масову витрату повітря, що виходить з резервуара, наступним чином:

$$\dot{m} = \frac{m^{t+1} - m^t}{\Delta t} \quad (3.37)$$

де надрядкові індекси $t+1$ і t – це два різні моменти часу, розділені інтервалом часу Δt , який відповідає кроку часу, що використовується чисельним розв'язувачем ЗДР.

Вихідна потужність турбіни в кожен момент часу може бути обчислена за формулою

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t c_p (T_1 - T_2) = \dot{m}_t c_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (3.38)$$

де 1 і 2 відносяться до входу і виходу турбіни, відповідно.

Використовуючи ізоентропійний ККД, η_t , реальну потужність, що виробляється турбіною, можна порівняти з ідеальним значенням потужності,

яка б вироблялася, якби процес розширення в турбіні був ізентропійним. Це міркування дозволяє записати потужність, що виробляється турбіною, як функцію її коефіцієнта розширення.

$$\dot{W}_t = \eta_t \dot{W}_{t,s} = \eta_t \dot{m} c_p \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_e} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (3.39)$$

Використовуючи результати з розділу 3.5, потужність турбіни може бути отримана від $t = 0$ до кінця процесу скидання, що призводить до результатів, зображених на рисунку 3.9, які були отримані для тих же умов, що і на рисунку 3.8 (таблиця 3.1). Легко помітити, що потужність турбіни повільно зменшується на початку, але потім швидко падає до нуля, коли робота припиняється, тобто коли похідна тиску за часом починає прямувати до нуля.

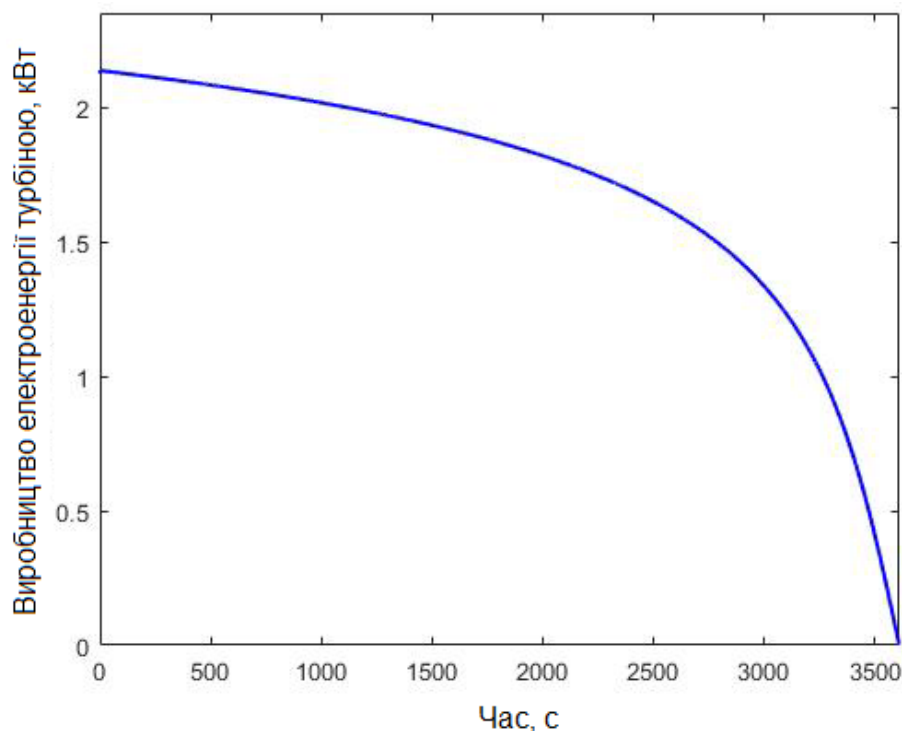


Рисунок 3.9 – Виробництво електроенергії турбіною під час спорожнення резервуару

Маючи тепер потужність турбіни, загальну вироблену енергію, W_t , можна отримати шляхом інтегрування потужності турбіни, тобто

$$W_t = \int \dot{W}_t dt \quad (3.40)$$

Оскільки використовуваний розв'язувач, ode23s, використовує метод 2-го порядку точності, вибране правило інтегрування також має бути 2-го порядку, і тому тут буде використано трапецієподібне правило інтегрування, що призведе до наступного результату:

$$W_t = \int \dot{W}_t dt \approx \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\dot{W}_t^{i+1} + \dot{W}_t^i}{2} \Delta t_i \quad (3.41)$$

де N – загальна кількість точок, в яких було розраховано тиск.

3.8 Результати моделювання

Маючи тепер математичне формулювання роботи системи, цікаво дослідити вплив деяких параметрів на продуктивність системи. Було помічено, що деякі змінні мають більший вплив, ніж інші, тому в цьому розділі представлені деякі з найбільш важливих отриманих результатів. У всіх представлених результатах будуть використані значення змінних, наведені в таблиці 3.1, зі зміною лише значення змінної, вплив якої планується дослідити.

Наприклад, легко помітити вплив як тиску, так і об'єму резервуару на загальну кількість виробленої енергії, що зображено на рисунку 3.10. Як і очікувалося, збільшення як тиску в резервуарі, так і його об'єму призводить до виробництва більшої кількості енергії.

Це призводить до проблеми при проектуванні системи: мета полягає в тому, щоб система була якомога меншою, але виробляла велику кількість енергії. Необхідно знайти компроміс між розміром системи і кількістю енергії, яку ми маємо намір виробляти!

Також можна помітити, що збільшення значення тиску нагнітання, аналогічно до тиску та об'єму бака, також призводить до збільшення загальної кількості виробленої енергії (рис. 3.11).

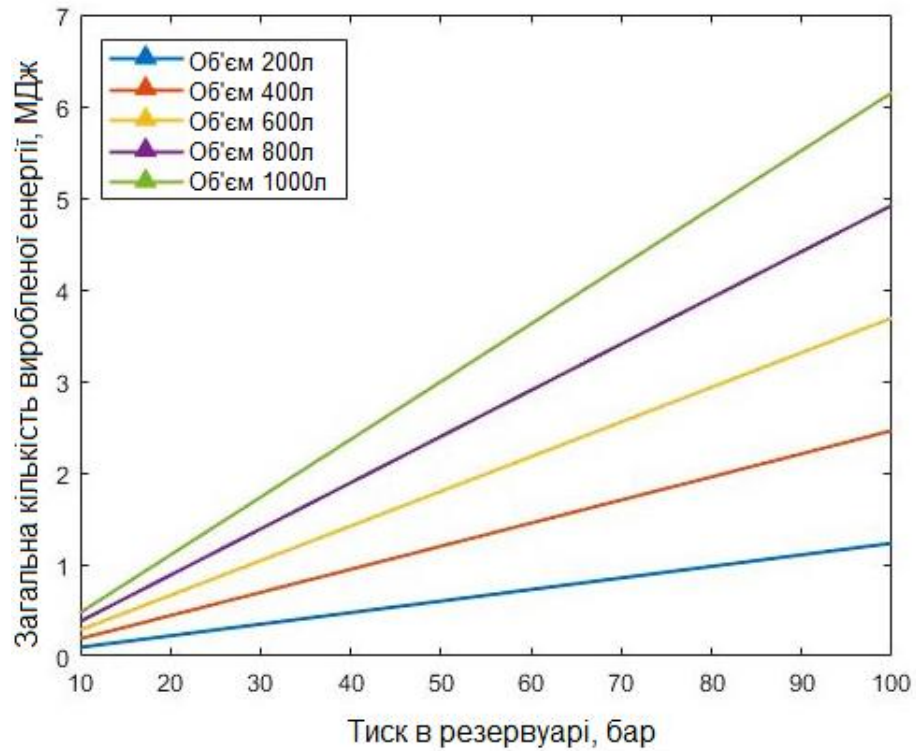


Рисунок 3.10 – Залежність загальної кількості виробленої енергії від тиску та об'єму резервуара

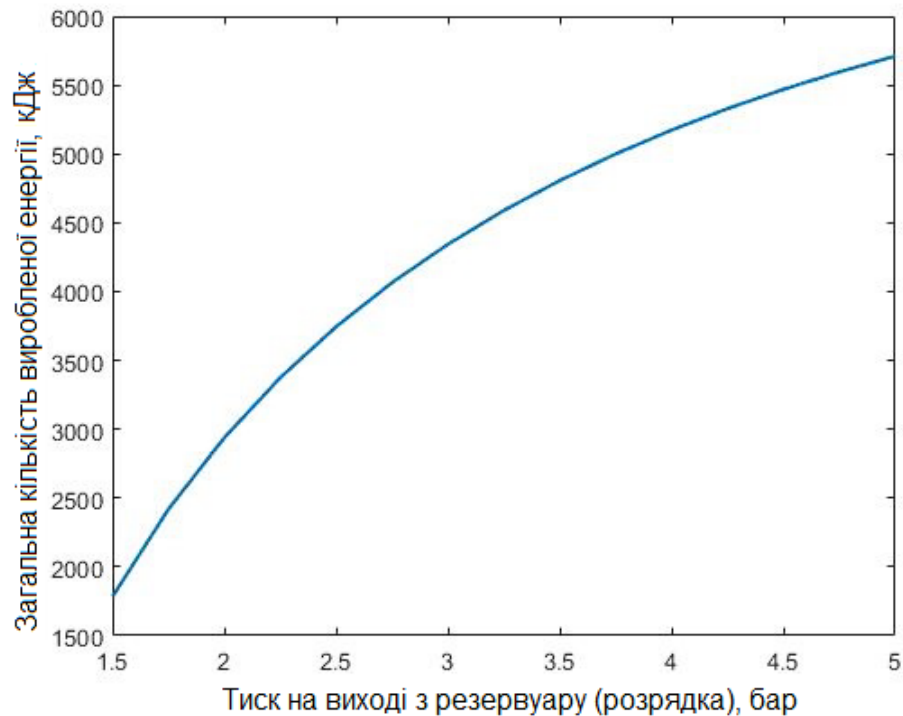


Рисунок 3.11 – Залежність загальної кількості виробленої енергії від тиску на виході з резервуару для початкового тиску $p_0 = 100$ бар та об'єму $V = 1000$ л

Іншою важливою змінною, яку слід враховувати, є загальний час роботи: він повинен бути якомога більшим, щоб забезпечити виробництво енергії протягом максимально можливого часу. Однак він зменшується зі збільшенням тиску нагнітання (Рис. 3.12), що також зменшує загальну кількість виробленої енергії, як було показано раніше.

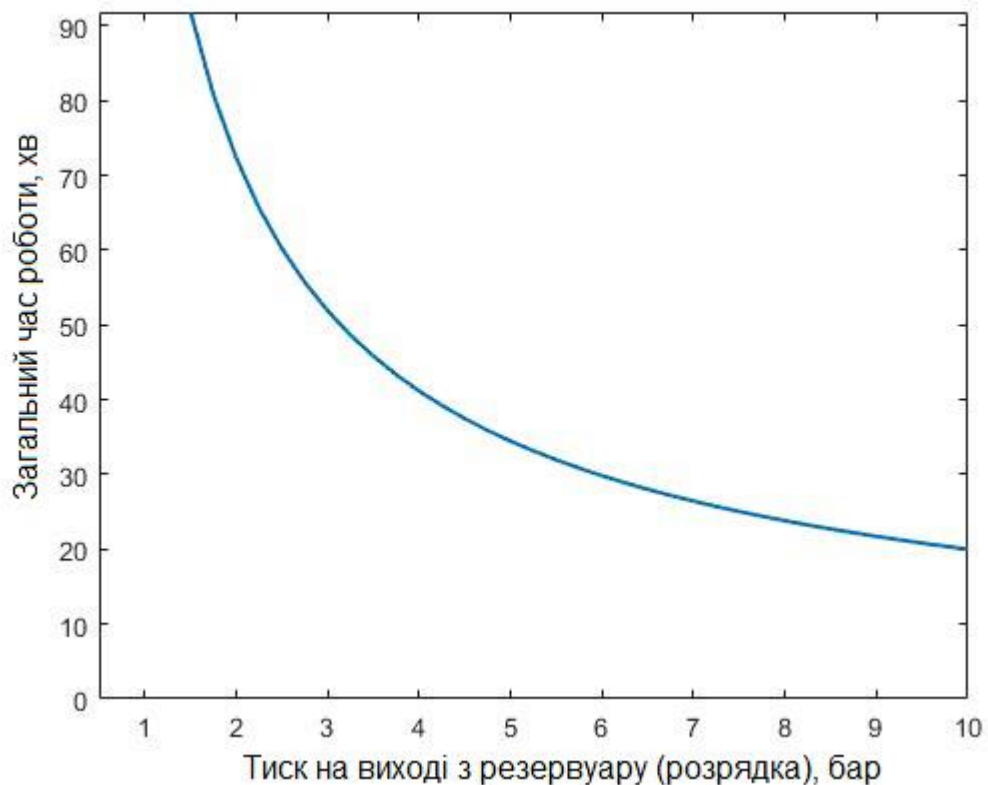


Рисунок 3.12 – Залежність загального часу роботи від тиску нагнітання для початкового тиску $p_0 = 100$ бар і об'єму $V = 1000$ л

Крім загальної кількості виробленої енергії, важливо також враховувати потужність, яку забезпечує система, оскільки було б нецікаво мати систему, що працює протягом великого часу, але забезпечує низькі значення потужності, яких було б недостатньо для живлення електричних приладів. Саме тут було помічено, що параметром, який найбільше впливає на максимальну потужність, отриману в турбіні, є тиск нагнітання: чим вище його значення, тим вище максимальна масова витрата, а також коефіцієнт розширення в турбіні (співвідношення між тиском на вході і виході). Потім спостерігалася

квазілінійна еволюція максимальної потужності при збільшенні значення тиску нагнітання (рис. 3.13).

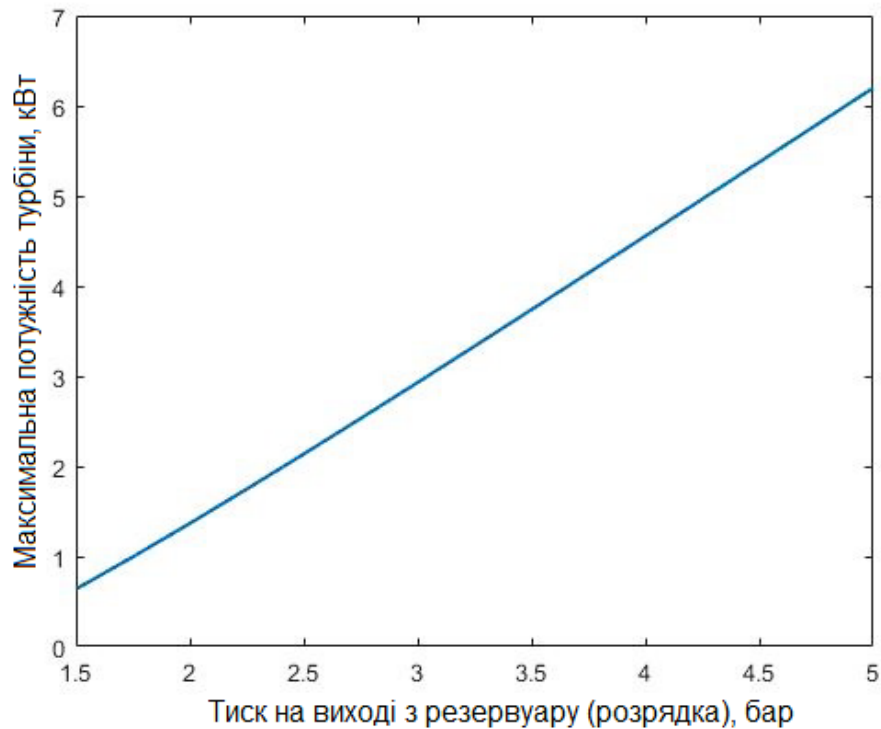


Рисунок 3.13 – Залежність максимальної потужності турбіни від тиску нагнітання для початкового тиску $p_0 = 100$ бар і об'єму $V = 1000$ л

Враховуючи той факт, що ми проектуємо систему виробництва електроенергії з використанням накопичувача енергії, необхідно враховувати два важливих поняття: загальний ККД системи, η , та енергетичну щільність накопиченої енергії, $\rho_{energetic}$. Обидві ці змінні відповідно визначаються як

1. Ефективність системи:

$$\eta = \frac{W_t}{W_c} \quad (3.42)$$

де W_t – загальна виконана робота,

W_c – загальна робота, витрачена на заповнення резервуару, як описано раніше в цьому розділі.

2. Щільність збереженої енергії:

$$\rho_{energetic} = \frac{W_t}{m_{stored}} = W_t \frac{RT}{p_0 V} \quad (3.43)$$

де p_0 і V представляють накопичений тиск повітря і об'єм резервуару, відповідно.

Як видно з рисунку 3.14, збільшення тиску в баку призводить до більшого збільшення необхідної роботи стиснення, ніж загальної виробленої енергії, що може бути переведено як зниження ефективності системи. Тому, щоб мати більш ефективну систему, вона повинна бути спроектована зі зменшенням тиску в баку, що може бути еквівалентно тому, що менша маса повітря повинна зберігатися в баку. Щодо характерних розмірів системи, то це можна перекласти як проектування меншої системи, якщо розглядати масу повітря, що зберігається, як міру розміру системи.

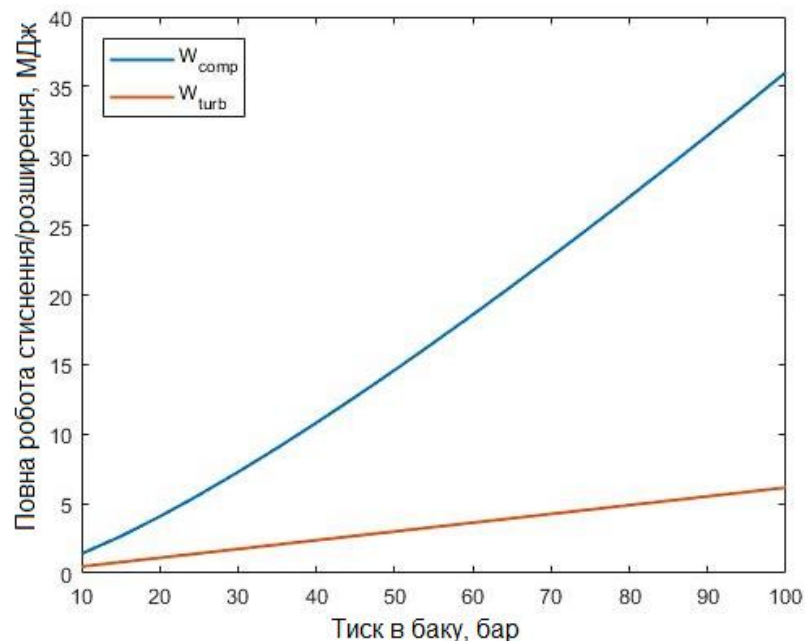


Рисунок 3.14 – Повна робота стиснення і повна робота розширення як функція p_0

Однак, маючи справу з поняттям портативності, іноді важливіше розглянути здатність системи виробляти якомога більше енергії, зберігаючи при цьому якомога менші розміри, навіть якщо вона має низький ККД. Тому дуже важливо враховувати кількість накопиченої енергії на одиницю маси, $\rho_{energetic}$, яка, на відміну від ККД системи, зростає зі збільшенням значення тиску

в баку p_0 , як показано на рисунку 3.15. Звідси робиться висновок, що для збільшення енергетичної густини накопиченої енергії необхідно проектувати систему з більшими габаритами, тобто, іншими словами, збільшувати тиск в баку.

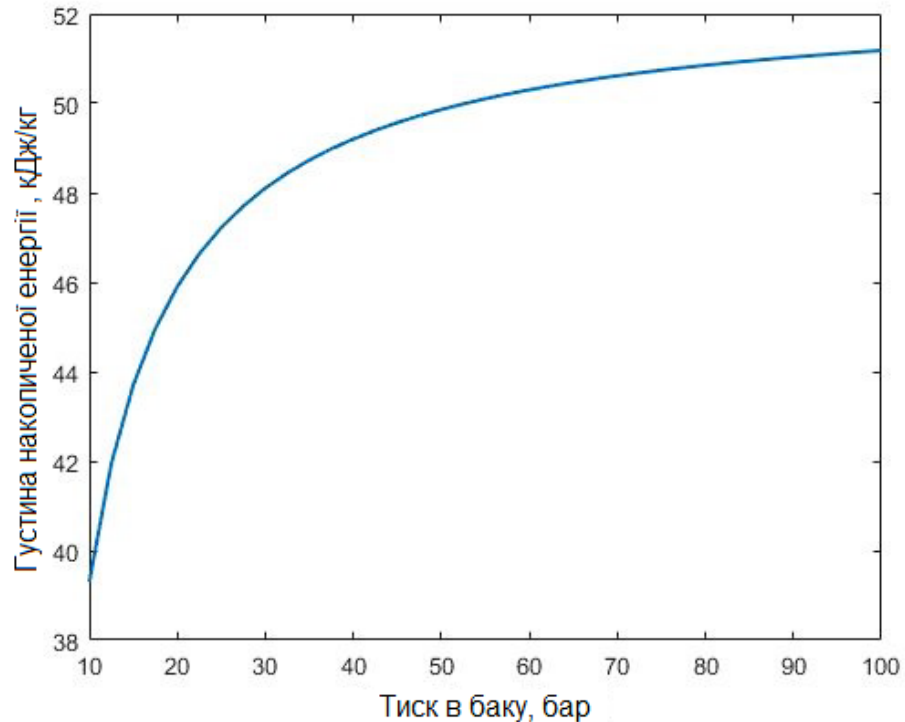


Рисунок 3.15 – Густина накопиченої енергії як функція p_0 .

На попередньому рисунку також видно, що для нижчих значень тиску це зростання є більш вираженим, оскільки зі збільшенням тиску в баку значення $\rho_{\text{energetic}}$ має тенденцію до стабілізації. Також легко зробити висновок, що ці значення є нижчими, ніж значення, представлені іншими технологіями зберігання енергії, однак слід пам'ятати, що ця система передбачає використання відходів виробленої енергії, і, на відміну від деяких інших згаданих варіантів, вона має низький вплив на навколишнє середовище. Порівнюючи значення енергії, виробленої з одиниці об'єму, зі значеннями, представленими в таблиці 2.2, можна побачити, що отримані тут значення знаходяться в межах діапазону систем, представлених в літературі. Для резервуара об'ємом 1 м^3 при тиску 100 бар енергія, вироблена на одиницю об'єму, становила приблизно $1,7 \text{ кВт год/м}^3$.

Цікаво відзначити, що при збільшенні розміру системи, ефективність системи має тенденцію до зниження, в той час як енергетична щільність повітря має тенденцію до збільшення. Тому необхідно знайти компроміс між цими двома змінними: ми не можемо максимізувати обидва показники одночасно, як нам хотілося б, а отже, необхідно знайти компроміс між цими двома змінними, що і буде метою наступних розділів.

3.9 Висновки до розділу

1. Запропонована математична модель системи, що базується на конфігурації, описаній у розділі 2, дозволила оцінити значення декількох змінних, що вимірюють продуктивність системи.

2. Виявлено, що існує очевидний потенціал для розвитку портативних систем генерації електроенергії з використанням накопичувачів енергії стисненого повітря.

3. Результати досліджень показали, що чим менша система, тим гіршими будуть її показники з точки зору енергії, виробленої на одиницю маси повітря, що зберігається. Неважко зрозуміти, що тут існує явний конфлікт між двома основними цілями цієї системи: з одного боку, передбачалося спроектувати систему, здатну виробляти якомога більше енергії, а з іншого боку, система повинна була мати якомога менші розміри.

4. При збільшенні розміру системи, ефективність системи має тенденцію до зниження, в той час як енергетична щільність повітря має тенденцію до збільшення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку [21].

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному - біля 15-20 %. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80 % електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, паш тою понад 1 кВ, - до 20-30 %.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань

електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групи з електробезпеки.

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

- електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

- розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею

Наслідки спричинені електризацією, свідчать про необхідність здійснення заходів щодо попередження небезпечної і шкідливої дії статичної електрики на організм людини [22].

Статична електрика - це процес утворення і розділення зарядів у просторі при контакті двох матеріалів, якщо хоча б один з них є діелектриком.

Підвищений рівень статичної електрики відноситься до групи фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Суть електризації заключається в тому, що діелектрики за певних умов стають електрично зарядженими. При цьому заряди не виникають і не зникають, а переходять з одного електризованого тіла на інше, накопичуються на поверхнях їх стикання чи переміщуються в межах одного й того ж тіла. Статична електрика може з'являтися на тілах і через індукцію, тобто через взаємодію на відстані. В основному виробництві харчової промисловості це можуть бути процеси помелу зерна, просіювання, транспортування трубопроводах борошна, процеси, пов'язані з приготуванням цукрової пудри, перевезенням чи транспортуванням по трубопроводах спирту, сухих дріжджів, розміщенням і фільтруванням рідин; технологічні процеси, пов'язані із застосуванням плоскопасових передач, транспортерів і т.д.

Статична електрика при розділенні контактів двох тіл особливо добре проявляється в пасових передачах (транспортерах). Електричні заряди протилежних знаків з'являються на пасі і шківі при порушенні поверхні контакту в місці збігання пасу зі шківа. і йому в деяких випадках різниця потенціалів може досягати 80 кВ.

Якщо напруженість електричного поля перевищує електричну міцність середовища (повітря), то відбувається розряд статичної електрики. Основною причиною, що характеризує здатність різних матеріалів проводити струм, а також визначає їх здатність до електризації, є питомий електричний опір. Умовно прийнято, що при питомому електричному опорі речовин і матеріалів порядку менше 10 Ом•м заряди не накопичують і безпеки не являють. Якщо ж опір високий і велика швидкість відриву поверхні, то заряди зберігаються. Величина зарядів визначається природою матеріалу і швидкістю розділення поверхонь, тобто інтенсивністю технологічного процесу.

Розряди статичної електрики являються одними з можливих імпульсів спалахування і вибухів в харчовій промисловості, що зв'язано, в першу чергу, із застосуванням сильно електризуючих речовин і матеріалів (горючі рідини, пил

органічного походження). Електризація рідин приводить до спалахування і вибухів втриє частіше, ніж електризація дрібнодисперсних матеріалів, оскільки мінімальна енергія запалювання пилово-вітряних сумішей з 10...100 раз менше. При протіканні рідин величина заряду залежить від діелектричної сталої, її забрудненості, шорсткості стінок, швидкості протікання і діаметра труб.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів повинен здійснюватись в двох напрямках: усунення електричних зарядів або зменшення їх до безпечних величин.

У харчовій промисловості статична електрика усувається заміною горючих середовищ негорючими. Для промивання ємкостей, трубопроводів, наприклад замість бензину, гасу слід використовувати пожежобезпечні розчинники (їдкий натр або калі, компоненти із рідкого скла, контакт Петрова, ОП-7 або ОП-10); підтриманням концентрації горючих речовин за межами вибуховості. Проводиться з урахуванням вимог і можливостей технологічного процесу; нанесенням на діелектричне устаткування електропровідних покриттів; відведенням зарядів від людей у виробництвах, де існує небезпека спалаху горючих сумішей розрядом з людини; зволоженням навколишнього середовища, якщо це допускається за умовами технологічного процесу. Якщо це неможливо, то може застосовуватись місцеве зволоження, шляхом направлення розпилюючого струменя на поверхні, з яких необхідно відвести статичні заряди; забезпеченням проявів заряду в тих місцях, де немає горючого і вибухонебезпечного середовища; збільшенням, об'ємної і поверхневої провідності діелектриків, які використовують для транспортування і зберігання рідин; іонізацією повітря індукційними, високовольтними, радіоактивними і комбінованими нейтралізаторами. Вибір кожного типу нейтралізатора проводиться з урахуванням середовища і характеристик іонізаторів; змінням технологічного процесу з метою усунення причин, що сприяють появі електризації; заземлення обладнання. Заземлення обладнання - один з важливих і обов'язкових заходів до захисту від статичної електрики.

Апарати, машини, пристрої, які можуть стати джерелами виникнення зарядів статичної електрики, повинні бути заземлені не менше ніж у двох місцях незалежно від заземлення усього технологічного кола.

Звичайні заземлюючі пристрої для захисту від розрядів статичної електрики об'єднують із заземлюючими пристроями для електрообладнання.

Заземлення повинно бути здійснене тільки паралельним приєднанням захисного обладнання. Допустимий опір заземленого пристрою для захисту від статичної електроенергії у вигляді малих струмів витрат допускається не більше 100 Ом.

Гнучкі трубопроводи для перекачування рідин, які здатні генерувати заряди (спирт, бензин, гас тощо), повинні мати металеве заземлене оплетення, а вихідні штуцери мають бути виконані із кольорових металів і з'єднані із заземленим металевим оплетенням.

Серед інших заходів, направлених на заземлення небезпечних проявів розрядів статичної електрики, слід відмітити такі, як заміна плоских пасів текстурними (клиновими); недопущення розприскування рідин при їх розливанні в ємності шляхом опущення завантажувальних труб на відстань не більше 0,2 м від днища приймальної посудини; зміна швидкості переміщення твердих і рідких матеріалів.

4.3 Концепція захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного походження

8 червня 2012 р. Президент України підписав Закон України "Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру" [22].

Цей Закон визначає організаційні та правові основи захисту громадян України та громадян інших держав, які перебувають на території України, захисту об'єктів виробничого і соціального призначення, довкілля від захисту

об'єктів виробничого і соціального призначення, довкілля від надзвичайних ситуацій природного характеру .

Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій природного характеру це — система організаційних, технічних, медико-біологічних, фінансово-економічних та інших заходів для запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру і ліквідації їх наслідків, що реалізуються центральними і місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування, відповідними силами та засобами підприємств, установ та організацій, незалежно від форм власності й господарювання, добровільними формуваннями і спрямовані на захист населення і територій, а також матеріальних і культурних цінностей та довкілля.

Законодавство України у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного характеру базується на Конституції України, цьому Законі й Законі України "Про правовий режим надзвичайного стану" та інших нормативно-правових актах.

Основними завданнями у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного характеру є:

- здійснення комплексу заходів для запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру та реагування на них;
- забезпечення готовності та контролю за станом готовності до дій і взаємодій органів управління у цій сфері, сил та засобів, призначених для запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру і реагування на них.

Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру здійснюється на принципах:

- пріоритетності завдань, спрямованих на рятування життя та збереження здоров'я і довкілля;
- надання переваги раціональній та превентивній безпеці;

— вільного доступу населення до інформації щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій;

—урахування економічних, природних та інших особливостей територій і ступеня реальної небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій;

— максимально можливого ефективного і комплексного використання наявних сил і засобів, призначених для запобігання надзвичайним ситуаціям і реагування на них.

У питаннях захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного характеру громадяни України мають право на:

— отримання інформації про надзвичайні ситуації, що виникли або можуть виникнути, та про заходи необхідної безпеки;

—забезпечення та використання засобів колективного й індивідуального захисту, які призначені для захисту населення від надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;

— соціально-психологічну підготовку та медичну допомогу;

— інші права у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру відповідно до законів України.

Для забезпечення реалізації державної політики захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій створюється єдина державна система органів виконавчої влади з питань запобігання надзвичайним ситуаціям природного характеру і реагування на них (далі єдина державна система), яка складається з територіальних і функціональних підсистем.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу стану сучасної електроенергетики встановлено, що однією з можливих альтернатив для зменшення негативного впливу акумуляторів на екологію є зберігання енергії за допомогою систем стисненого повітря, також відомих як системи зберігання енергії стисненого повітря (CAES), які можуть бути адекватним рішенням для довгострокового зберігання енергії великої потужності.

2. На основі аналізу роботи системи зберігання енергії стисненого повітря встановлено, що її використання є більш адекватним шляхом, порівняно з акумуляторами в яких протікають хімічні процеси.

3. Розроблено конфігурацію міні-акумулятора на стисненому повітрі. Він містить невеликий резервуар для стисненого повітря, який буде наповнюватися за рахунок ВДЕ або надлишків виробництва енергії, буде з'єднаний з невеликою турбіною, щоб протягом певного періоду часу виробляти невеликі обсяги електроенергії.

4. Запропонована математична модель системи, що базується на запропонованій конфігурації міні-акумулятора на стисненому повітрі, дозволила оцінити значення декількох змінних, що характеризують продуктивність системи.

5. Виявлено, що існує очевидний потенціал для розвитку портативних систем генерації електроенергії з використанням накопичувачів енергії стисненого повітря. Ці системи можуть використовувати відходи виробництва енергії в не пікові години споживання для стиснення атмосферного повітря і зберігання його в резервуарах високого тиску, щоб потім використовувати для виробництва електроенергії.

6. В результаті досліджень виявлено, що концепція портативності може бути дещо складною для реалізації. Перші отримані результати показали, що чим менша система, тим гіршими будуть її показники з точки зору енергії, виробленої на одиницю маси повітря, що зберігається. Неважко зрозуміти, що

тут існує явний конфлікт між двома основними цілями цієї системи: з одного боку, передбачалося спроектувати систему, здатну виробляти якомога більше енергії, а з іншого боку, система повинна була мати якомога менші розміри.

7. При збільшенні розміру системи, ефективність системи має тенденцію до зниження, в той час як енергетична щільність повітря має тенденцію до збільшення.

8. Запропонована система має ефективність близько 30% і здатна виробляти енергію безперервно протягом трохи більше 30 хвилин.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Джигринюк О. Р. Відновлювальні джерела енергії як шлях для надійного електропостачання // А. С. Беднаровський; Р. В. Волошин; О. Р. Фарина; О. Р. Джигринюк / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 164.
2. Edomah, N. (2018). Economics of energy supply. Reference module in earth systems and environmental sciences, 1-16.
3. Fernandez-Pello, A. C. (2002). Micropower generation using combustion: Issues and approaches. Proceedings of the combustion institute, 29(1), 883-899.
4. A. C. Barbier. Emerging energy storage technologies in europe, 2013
5. Anderson, E., Antkowiak, M., Butt, R., Davis, J., Dean, J., Hillesheim, M., ... & Visser, C. (2011). Broad overview of energy efficiency and renewable energy opportunities for Department of Defense installations.
6. Gharehpetian, G. B., & Agah, S. M. M. (Eds.). (2017). Distributed generation systems: design, operation and grid integration. Butterworth-Heinemann.
7. V. Lemort, S. Quoilin, C. Cuevas, and J. Lebrun. Testing and modeling a scroll expander integrated into an organic rankine cycle. Applied Thermal Engineering, 29(14-15):3094–3102, 2009
8. Y. Kim and D. Favrat. Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system. Energy, 35(1):213–220, 2010.
9. G. Grazzini and A. Milazzo. Thermodynamic analysis of caes/tes systems for renewable energy plants. Renewable energy, 33(9):1998–2006, 2008
10. L. X. Chen, P. Hu, P. P. Zhao, M. N. Xie, D. X. Wang, and F. X. Wang. A novel throttling strategy for adiabatic compressed air energy storage system based on an ejector. Energy conversion and management, 158:50–59, 2018.
11. A. Khamis, Z. M. Badarudin, A. Ahmad, A. Ab Rahman, and N. A. Bakar. Development of mini scale compressed air energy storage system. In Clean Energy and Technology (CET), 2011 IEEE First Conference on, pages 151–156. IEEE, 2011
12. 8.King, M., Jain, A., Bhakar, R., Mathur, J., & Wang, J. (2021). Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the

potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139..

13. Ibrahim, H. & Belmokhtar, Karim & Ghandour, Mazen. (2015). Investigation of Usage of Compressed Air Energy Storage for Power Generation System Improving – Application in a Microgrid Integrating Wind Energy. *Energy Procedia*. 73. 305-316. 10.1016/j.egypro.2015.07.694.

14. He, W., & Wang, J. (2018). Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 77-95.

15. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр – К.: НТУУ«КПІ», Вид-во “Політехніка», 2016. – 152 с.

16. Диференціальні рівняння для інформатиків: підручник / Ф.Г. Гаращенко, В.Т. Матвієнко, І.І. Харченко. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. – 352 с.

17. T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.

18. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

19. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAР 2023).

20. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

21. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.

22. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с