

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

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Демборинський А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Шелестовський Б.Г.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 02.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Демборинський А.О.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Коваль В.П.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: *«Аналіз можливості використання гідроакumuлюючої системи для вітроенергетичної установки».*

Метою роботи є аналіз можливості використання гідроакumuлюючої системи на базі існуючих водонапірних башт для акумулювання електричної енергії, виробленої вітроенергетичною установкою

У роботі досліджено можливість використання наявної інфраструктури водонапірних башт України для створення розосереджених систем гідроакumuлювання електроенергії з метою підвищення стабільності роботи вітроенергетичних установок. Актуальність роботи зумовлена переривчастістю виробництва енергії вітрогенераторами та необхідністю вирішення проблеми її накопичення з використанням існуючої інфраструктури. Розроблено конструкцію системи зберігання енергії на базі водонапірної башти. Виконано технічний розрахунок ємності системи для стандартної міської водонапірної башти. Виконано розрахунок гідравлічних параметрів системи. Проведено розрахунок необхідної вихідної потужності вітрової турбіни, яка має забезпечувати роботу насосної установки. Запропоновано встановлення вітрогенератора на вершині водонапірної башти або поруч з нею, що дозволяє створити повністю автономний енергетичний комплекс з відновлюваного джерела. Запропонована система гідроакumuлювання на базі водонапірної башти є технічно реалізованою та екологічно чистою. Вона дозволяє ефективно вирішувати проблему переривчастості вітрової енергії, підвищувати стабільність електропостачання та створювати основу для розвитку локальних мікромереж з відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: ГІДРОАКУМУЛЮЮЧА СИСТЕМА, ВІТРОГЕНЕРАТОР, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Майбутнє вітрової енергетики.....	9
1.2 Необхідність зберігання вітрової енергії.....	11
1.3 Переваги зберігання вітрової енергії	12
1.4 Існуючі способи зберігання енергії.....	13
1.4.1 Пристрої для короткочасного зберігання енергії	13
1.4.2 Пристрої для довгострокового зберігання енергії.....	17
1.5 Висновки до розділу	29
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	31
2.1 Види, загальна кількість та об'єм водонапірних башт в Україні	31
2.2 Запропонована конструкція системи зберігання енергії.....	34
2.3 Водяний контур системи зберігання енергії	38
2.4 Механічний контур системи	40
2.5 Режими роботи системи	41
2.6 Технічний аналіз.....	42
2.7 Висновки до розділу	44
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	46
3.1 Вихідні дані для проведення розрахунків	46
3.2 Ємність водонапірної башти.....	46
3.3 Витрата води на виході з резервуару	46
3.3.1 Швидкість потоку води, що використовується для водопостачання.....	48
3.3.2 Витрата води на виробництво електроенергії.....	48
3.4 Витрата води на вході до резервуара	49

3.5 Проектна кількість людей, яких обслуговує водонапірна вежа.....	49
3.6 Кількість електроенергії, необхідної для роботи водяного насоса.....	51
3.7 Розрахунок характеристики віротурбіни.....	51
3.8 Вибір водяної турбіни.....	53
3.9 Автоматичний контролер електроживлення.....	55
3.10 Результати розрахунків.....	55
3.11 Висновки до розділу.....	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	
4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В.....	58
4.2 Зонування територій за ступенем небезпеки.....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	65

ВСТУП

Актуальність теми.

На сучасному етапі розвитку електроенергетики одним із найперспективніших напрямів є використання відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрової енергії. Вітроенергетика є чистим джерелом енергії, що працює без забруднення повітря та води, і є невичерпною на відміну від викопного палива. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 року вітрова генерація має потроїтися порівняно з рівнем 2022 року, а до 2050 року стане ключовим компонентом децентралізованих енергосистем. Водночас основною проблемою вітроенергетики залишається мінливість і переривчастість вітрового потоку, що призводить до нестабільності виробництва електричної енергії.

Проблема нестабільності вітрової генерації потребує впровадження ефективних систем акумулювання енергії. На сьогодні існують різноманітні технології зберігання енергії: акумуляторні системи, суперконденсатори, маховики, системи стисненого повітря, водневі паливні елементи та насосні гідроакумулюючі сховища. Проте більшість цих технологій або мають високу вартість, або потребують спеціальної інфраструктури, або обмежені за ємністю та тривалістю зберігання.

Особливий інтерес становить ідея використання існуючих водонапірних башт як елементів гідроакумулюючих систем. В Україні налічується близько 2100 водонапірних башт із сумарним об'ємом близько 833 тис. м³, які наразі використовуються виключно для водопостачання. Водночас ці споруди мають усі передумови для подвійного використання: забезпечення тиску водопостачання та акумулювання електричної енергії у вигляді потенційної енергії води. Це дає змогу створити розосереджену мережу міні-гідроакумуляторів без потреби будівництва спеціальних водосховищ, що значно знижує капітальні витрати.

Таким чином, розробка та аналіз можливості використання гідроакумуючої системи на базі водонапірних башт для вітроенергетичної установки є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню стабільності та ефективності використання відновлюваних джерел енергії, зниженню залежності від традиційних джерел електроенергії та реалізації концепції сталого енергетичного розвитку

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є аналіз можливості використання гідроакумуючої системи на базі існуючих водонапірних башт для акумулювання електричної енергії, виробленої вітроенергетичною установкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд сучасного стану вітроенергетики та технологій зберігання енергії;
2. Проаналізувати стан водонапірного господарства України та оцінити потенціал водонапірних башт для гідроакумулювання;
3. Запропонувати конструкцію системи зберігання енергії на базі водонапірної башти з урахуванням водяного, механічного та електричного контурів;
4. Розрахувати основні параметри гідроакумуючої системи: об'єм резервуара, гідравлічні характеристики, потужність насоса та віротурбіни;
5. Обґрунтувати вибір основного обладнання: вітрогенератора, гідроагрегату та системи автоматичного керування.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати роботи можуть бути використані при модернізації існуючих систем водопостачання з метою надання їм функції гідроакумулювання електроенергії. Запропонована концепція дозволяє створити розосереджену мережу міні-гідроакумуляторів на базі водонапірних башт без суттєвих капітальних витрат, оскільки використовується вже наявна інфраструктура.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків,

переліку посилань (28 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини –69 сторінок.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Майбутнє вітрової енергетики

Вітрові системи є ідеальними, коли використовуються разом з іншими джерелами енергії. Вітрові енергетичні системи можуть слугувати переважним джерелом енергії і можуть бути «підкріплені» традиційними системами на викопному паливі в періоди, коли вітер слабкий. Ця стратегія може бути використана для зменшення поточного рівня використання викопного палива та збереження цього вичерпного ресурсу, одночасно зменшуючи пов'язані з цим екологічні проблеми, властиві системам на викопному паливі.

Вітроенергетичні системи мають ряд переваг перед іншими джерелами енергії [2,3]. Вітер доступний у всьому світі, оскільки є продуктом природних глобальних процесів, які не вичерпаються, на відміну від викопного палива, і є так званою відновлюваною енергією. Більше того, вітроенергетика є чистим джерелом енергії і працює без забруднення повітря та води, пов'язаного з викопним паливом [4,5].

Вітрова енергетика сьогодні є одним із найдинамічніших секторів відновлюваної енергетики, який стрімко трансформується під впливом технологічних інновацій та глобальних кліматичних викликів. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), до 2030 року вітрова генерація має потроїтися порівняно з рівнем 2022 року, а до 2050 року стане ключовим компонентом децентралізованих енергосистем. Цей розвиток базується на низці технологічних трендів, що формують нову парадигму електроенергетики.

Першочерговим напрямом є збільшення одиничної потужності вітротурбін. Сучасні офшорні установки вже перевищують 15 МВт, а прототипи наступного покоління сягають 20–25 МВт. Збільшення діаметра ротора та висоти башти дозволяє ефективно використовувати повітряні потоки на значних висотах, де швидкість вітру стабільніша та інтенсивніша. Паралельно відбувається трансформація матеріалів: композити на основі

вуглецевих волокон, біорозкладні смоли та рецикльовані компоненти зменшують вуглецевий слід виробництва та вирішують проблему утилізації лопатей.

Офшорний сегмент демонструє найвищі темпи зростання. Плавучі вітрові платформи (floating wind) відкривають доступ до глибоководних акваторій, де традиційні фундаменти технічно нереалізовані. Країни Азійсько-Тихоокеанського регіону та Європи активно впроваджують плавучі проекти, що дозволяє значно розширити потенційні зони розміщення ВЕС. Інтеграція вітрової генерації з технологіями виробництва «зеленого» водню створює синергію для секторів, важко піддаваних електрифікації, — судноплавства, авіації та важкої промисловості.

Цифровізація та штучний інтелект революціонізують управління вітровими активами. Системи прогнозування на основі машинного навчання оптимізують виробництво, а цифрові двійники турбін дозволяють проводити предиктивне технічне обслуговування, знижуючи операційні витрати на 20–30 %. Розподілені вітрові мікромережі в поєднанні з накопичувачами енергії формують основу енергонезалежних локальних спільнот.

Водночас вітрова енергетика стикається з викликами: нестабільні політичні рамки, складності з інтеграцією в енергосистеми, потреба в розширенні мережевої інфраструктури та соціальна прийнятність наземних проектів. Вирішення цих питань потребує скоординованих зусиль державних регуляторів, інвесторів та наукової спільноти. Зважаючи на безпрецедентні темпи технологічного прогресу та зростаючу підтримку декарбонізації, вітрова енергетика має всі передумови стати домінуючим джерелом електроенергії в другій половині XXI століття, забезпечуючи сталий енергетичний перехід для наступних поколінь.

1.2 Необхідність зберігання вітрової енергії

Типовим прикладом зберігання енергії є батарея, яка зберігає перетворювану хімічну енергію і може бути знайдена в багатьох електронних пристроях. Інші приклади включають гідроелектростанції, що зберігають гравітаційну потенційну енергію [6,7,8], резервуари для зберігання льоду, що зберігають теплову енергію, та викопне паливо, що зберігає давню енергію сонячного світла. Мабуть, одним з найважливіших методів зберігання енергії, про який найменше замислюються, є енергія, що зберігається в їжі. Зберігання енергії є невід'ємною частиною життя, і впровадження ефективного методу зберігання у вітроенергетику є кроком, якого бракує на шляху до досягнення 20% вітрової потужності до 2030 року. (рис.1.1)



Рисунок 1.1 - Україна має потужний потенціал у сфері вітрової енергетики

Вітроенергетика, чисте та відновлюване джерело енергії, є одним з найшвидше зростаючих ринків, збільшивши свою присутність у портфелі енергогенерації Сполучених Штатів на 51% у 2008 році, проте вона все ще становить лише 1,26% від усієї виробленої енергії. Нові інновації в галузі та доступність «палива» на внутрішньому ринку зробили вітроенергетику другою після природного газу за обсягом нових потужностей, доданих з 2005 року. Таким чином, необхідно зберігати цю вітроенергію, яка доступна в достатній кількості

1.3 Переваги зберігання вітрової енергії

Проблема мінливості та переривчастості швидкості вітру може бути вирішена за допомогою ефективного застосування систем зберігання. Хоча перед розміщенням вітрової електростанції графік або режим вітру на запропонованому місці ретельно моделюється, щоб можна було передбачити зміну вітрового режиму з вірогідністю 95 %. Реальна перевага, яку можна отримати від зберігання вітрової енергії, полягає в тому, що висока швидкість вітру не збігається з високим попитом на навантаження. Зазвичай середня швидкість вітру вища вночі, коли попит на навантаження нижчий. Зберігання є практичним рішенням для зменшення мінливості вітрових турбін, надаючи можливість зберігати надлишкову енергію, а потім повертати її в мережу, коли вихід вітрової турбіни падає або попит на навантаження вищий, ніж вихід може забезпечити.

З точки зору оператора вітрової електростанції або постачальника енергії в мережу, операторам легше виконувати зобов'язання щодо випуску вітрової енергії на наступний день. Доступне стабільне джерело постачання, яке доповнює випуск вітрової енергії або її нестачу. З боку попиту або оператора мережі навантаження збалансоване, а попит задовольняється. Періоди негативних цін на електроенергію можна скоротити завдяки доступності та можливості використання технології зберігання.

Негативні ціни на енергію не можуть зберігатися протягом тривалого часу, проте вони є частим явищем, оскільки енергетичні компанії, що виробляють електроенергію з відновлюваних джерел, відмовляються припиняти виробництво навіть тоді, коли пропозиція перевищує попит. Чому виробники електроенергії готові платити людям за те, щоб вони брали електроенергію? Як зазначалося раніше, власники вітрових електростанцій та інших відновлюваних джерел енергії отримують податкові пільги на виробництво, передбачені урядом в Акті про відновлення та реінвестиції США 2009 року. Виробники отримують від уряду 2,1 цента за кВт·год виробленої електроенергії. Доки вартість кВт·години, яку вони платять своїм клієнтам за використання електроенергії, є меншою за державну субсидію, виробники відновлюваної енергії заробляють гроші. Наявність можливостей зберігання дозволила б виробникам продовжувати виробляти електроенергію, отримуючи державну субсидію, але зберігати електроенергію до моменту, коли її можна буде продати в періоди високого попиту, замість того, щоб марнувати її без потреби.

1.4 Існуючі способи зберігання енергії

Існують деякі попередні рішення для зберігання енергії протягом певного періоду часу, щоб вона була корисною в той період, коли вона потрібна. На сьогоднішній день існують різні технології зберігання відновлюваної енергії, які вже доступні або знаходяться на просунутій стадії розробки, що відповідає новим вимогам до застосування систем зберігання енергії. Ці технології зберігання енергії класифікуються за двома основними категоріями, залежно від часу розрядження.

1.4.1 Пристрої для короткочасного зберігання енергії

Пристрої для короткочасного зберігання енергії повинні використовуватися для підтримки енергосистем під час перехідного періоду

після порушення роботи системи, такого як перемикання ліній, зміни навантаження та усунення несправностей.

Пристрої для зберігання енергії з короткочасним розрядом все частіше використовуються в енергосистемах з високим рівнем проникнення відновлюваних джерел енергії (наприклад, вітрової) і слабкими міжсистемними з'єднаннями або на островах, запобігаючи тимчасовим несправностям і сприяючи наданню важливих системних послуг, таких як миттєві резерви та короткочасна потужність [9]. Основні пристрої для зберігання енергії з короткочасним розрядом та їхня робота представлені нижче.

а) Маховики

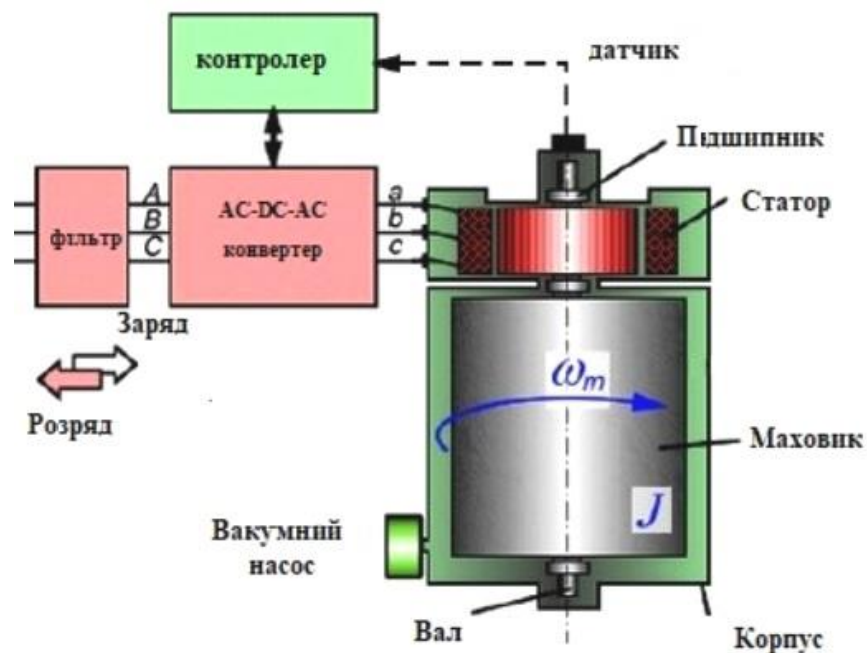


Рисунок 1.2 - Схема роботи пристрою накопичення енергії маховиком

Маховики зберігають кінетичну енергію в обертівій масі. Таке обладнання зазвичай використовується як пристрої короткострокового зберігання енергії для рушійних систем, таких як двигуни поїздів і дорожніх транспортних засобів, а також у центрифугах. У цих системах маховик згладжує навантаження під час гальмування за допомогою динамічного гальмування, а потім забезпечує прискорення під час розгону. На рисунку 1.2 показано роботу системи зберігання енергії з маховиком.



Рисунок 1.3 - Маховик

Маховики накопичують енергію, прискорюючи масивний обертовий циліндр до високої швидкості та зберігаючи цю енергію в системі у вигляді енергії обертання. Працюючи в корпусі з низьким вакуумом для зменшення опору, прискорювальний момент змушує маховик збільшувати швидкість і накопичувати енергію, тоді як гальмівний момент змушує маховик сповільнюватися, а енергія витягується за законами збереження енергії. Приклад сучасного маховика можна побачити нижче на рисунку 1.3. Завдяки можливості маніпулювання обертальним прискоренням маховик є винятковим інструментом для згладжування нестабільності в переривчастості вітрової генерації. Маховик має багато переваг. Маховик вже є високорозвиненою і зрілою технологією з ефективністю 80-90% і може похвалитися швидкістю заряджання і розряджання всього за кілька хвилин протягом понад 100 000 циклів життя [21]. Звичайно, маховик обмежений середнім часом зберігання 5-30 секунд, 15 хвилин для виняткового продукту, і він може зберігати лише до 10 МВт електроенергії, на відміну від 100-300 МВт, які здатна зберігати система зберігання енергії стисненого повітря. Вітроенергія, накопичена вночі під час більш високих середніх швидкостей вітру, не може зберігатися

протягом годин, необхідних для задоволення пікового навантаження протягом дня, коли вітер, швидше за все, буде слабким.

б) Суперконденсатори

Суперконденсатори — це новітні інноваційні пристрої в галузі зберігання електричної енергії. У порівнянні з батареєю або традиційним конденсатором, суперконденсатор забезпечує набагато більшу потужність і щільність енергії [10].

Суперконденсатори — це електрохімічні двошарові конденсатори, які зберігають енергію у вигляді електричного заряду між двома металевими або провідними пластинами, розділеними діелектриком, коли між пластинами застосовується різниця напруг [10]. Як і акумуляторні системи, конденсатори працюють на постійному струмі. Цей факт зумовлює використання електронних систем живлення, як показано на рисунку 1.4.

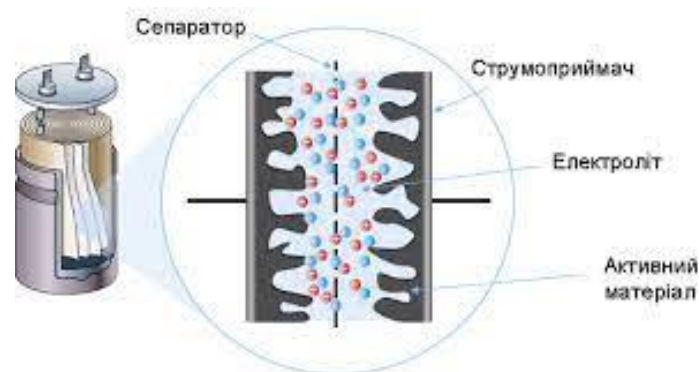


Рисунок 1.4 - Схема роботи пристрою для зберігання енергії на основі суперконденсаторів

с) Магнітний надпровідник

Надпровідний магнітний накопичувач енергії зберігає енергію у вигляді магнітного поля за допомогою постійного струму, що протікає в надпровідній котушці. Змінний струм з шини живлення перетворюється на постійний струм і подається в котушку. При необхідності накопичена енергія може бути вивільнена за допомогою постійного струму, який перетворюється на змінний струм і подається в шину живлення [11]. Інтерфейс між шиною живлення та надпровідною котушкою використовує силові електронні перетворювачі. Схема

роботи пристрою надпровідного магнітного накопичувача енергії (SMES) показана на рисунку 1.5.

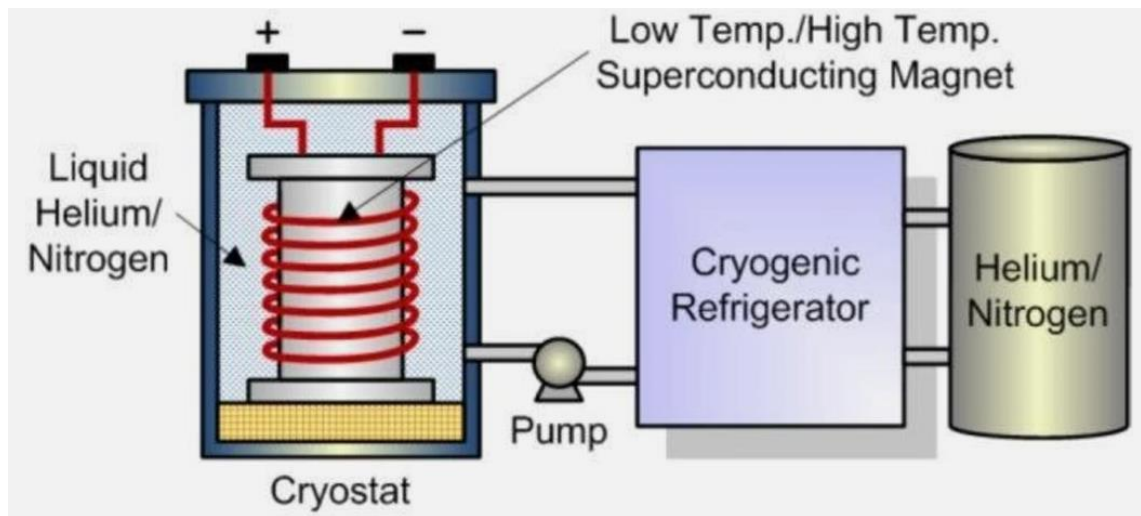


Рисунок 1.5 - Схема роботи пристрою надпровідного магнітного накопичувача енергії

Провідник для передачі постійного струму працює при криогенних температурах, де він поводить себе як надпровідник і, таким чином, практично не має втрат на опір, оскільки створює магнітне поле. Отже, енергія може зберігатися в постійному режимі, доки вона не буде потрібна. Найважливішою перевагою пристрою SMES є те, що затримка під час заряджання та розряджання є досить короткою. Енергія доступна майже миттєво, і протягом короткого періоду часу може бути забезпечена дуже висока вихідна потужність

1.4.2 Пристрої для довгострокового зберігання енергії

Ці пристрої для зберігання енергії відомі як пристрої для довгострокового зберігання енергії через їхню здатність постачати або поглинати електричну енергію протягом годин.

На сьогоднішній день вже існують різні технології довгострокового зберігання енергії, і очікується, що їх використання зросте в найближчі роки через все більшу інтеграцію недиспетчеризованих відновлюваних джерел

енергії в енергосистеми [12]. Нижче наведено короткий опис основних технологій довгострокового зберігання енергії.

а) Акумулятори

Акумулятор — це пристрій, який перетворює хімічну енергію безпосередньо в електричну. Він складається з декількох гальванічних елементів; кожен гальванічний елемент складається з двох напівелементів, з'єднаних послідовно провідним електролітом, що містить аніони та катіони. Одна напівклітина містить електроліт та електрод, до якого мігрують аніони (негативно заряджені іони), тобто анод або негативний електрод; інша напівклітина містить електроліт та електрод, до якого мігрують катіони (позитивно заряджені іони), тобто катод або позитивний електрод. У окисно-відновній реакції, яка живить батарею, катіони відновлюються (додаються електрони) на катоді, а аніони окислюються (видаляються електрони) на аноді. Електроди не стикаються один з одним, але з'єднані електрично за допомогою електроліту. Деякі елементи використовують дві півклітини з різними електролітами. Сепаратор між півклітинами дозволяє іонам текти, але запобігає змішуванню електролітів.

Батареї зберігають енергію в електрохімічній формі, створюючи електрично заряджені іони. Коли батарея заряджається, постійний струм перетворюється на хімічну потенційну енергію, а під час розрядження хімічна енергія знову перетворюється на потік електронів у вигляді постійного струму. Підключення системи до електромережі, як показано на рисунку 1.6, передбачає використання силових електронних перетворювачів для випрямлення змінного струму під час заряджання акумулятора та інвертування струму під час розрядження акумулятора.

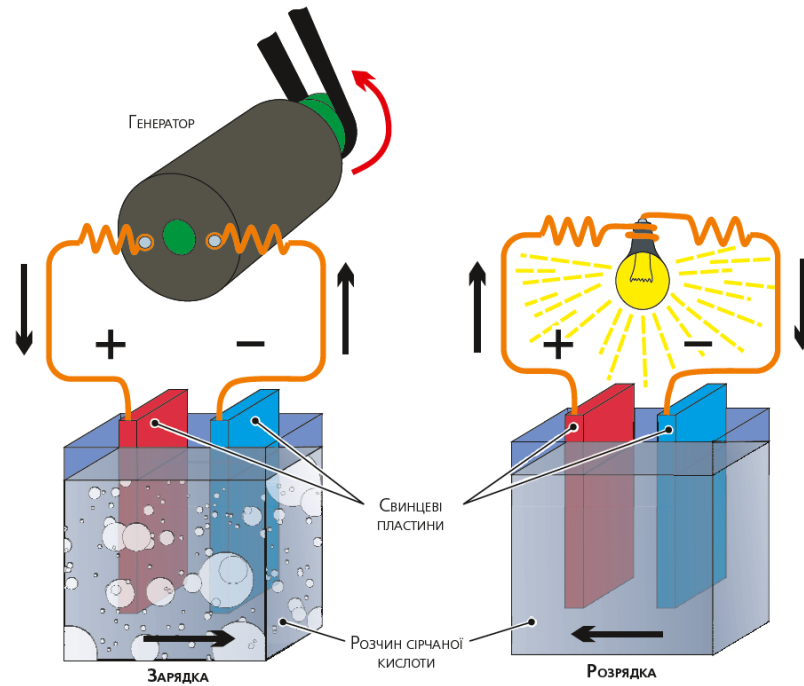


Рисунок 1.6 - Схема роботи акумуляторного пристрою

Акумулятори є найпопулярнішими пристроями для зберігання енергії. Однак термін «акумулятор» охоплює кілька технологій, що застосовують різні принципи роботи та матеріали. Тому тут підкреслюється відмінність між двома важливими концепціями акумуляторів: електрохімічною та редокс-потоквою.

Електрохімічні акумулятори використовують електрод як частину процесу перенесення електронів і зберігають продукти або реагенти за допомогою твердотільних реакцій електрода [13].

Існує ряд акумуляторних технологій, що розглядаються для зберігання енергії, основними з яких є:

- 1) Свинцево-кислотні
 - 2) Нікель-кадмієві
 - 3) Нікель-металгідридні
 - 4) Натрій-сірчані
 - 5) Літій-іонні
 - 6) Редокс-потоккові
- б) Стиснене повітря

Сховище енергії стисненого повітря (СЕСП) — це спосіб зберігання енергії, виробленої в один час для використання в інший час. На рівні комунальних підприємств енергія, вироблена в періоди низького попиту на енергію (поzza піковим навантаженням), може бути вивільнена для задоволення періодів підвищеного попиту (пікового навантаження) [14]. Це пристрій на основі газової турбіни, в якому процеси стиснення та спалювання розділені. Під час заряджання компресор з'єднується з електричною машиною, яка працює як двигун, стискаючи повітря. Після стиснення повітря зберігається в герметичних підземних сховищах. Розрядження пристрою полягає у виробленні енергії шляхом з'єднання газової турбіни з електричною машиною, яка працює як генератор, та подачі збереженого стисненого повітря до процесу згоряння. Схема роботи системи зберігання енергії стисненого повітря представлена на рисунку 1.7.

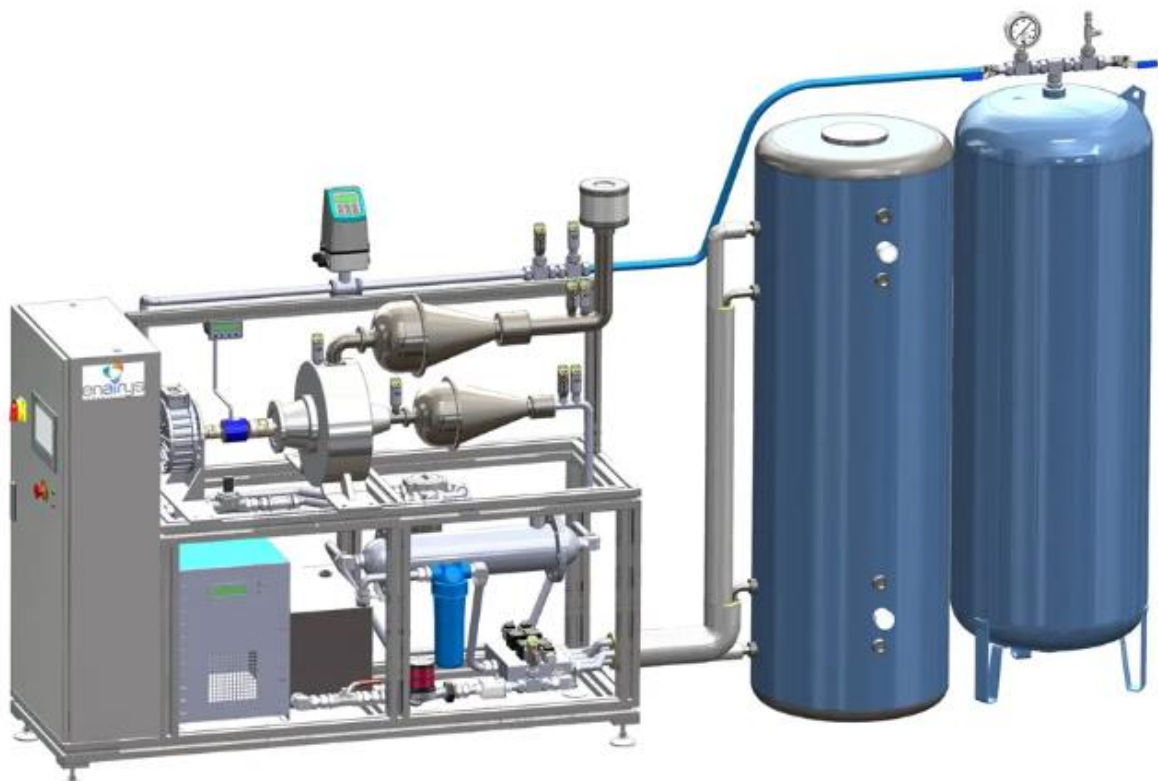


Рисунок 1.7 - Система зберігання енергії стисненого повітря

Зазвичай розглядають три типи резервуарів для повітря: природні водоносні горизонти (такі, як ті, що використовуються для зберігання

природного газу), соляні каверни, видобуті методом розчинення, та механічно сформовані резервуари в гірських породах. Основні обмеження щодо впровадження системи зберігання енергії стисненого повітря пов'язані з досягненням резервуарів. Існує 3 способи, за допомогою яких система СЕСП може впоратися з теплом. Зберігання повітря може бути адіабатичним, діабатичним або ізотермічним.

Адіабатичне зберігання утримує тепло, що утворюється під час стиснення, і повертає його в повітря, коли повітря розширюється для вироблення енергії. Теоретична ефективність адіабатичного зберігання наближається до 100 % при ідеальній ізоляції, але на практиці очікувана ефективність циклу становить 70 %.

Діабатичне зберігання розсіює надлишкове тепло за допомогою проміжних охолоджувачів (таким чином наближаючись до ізотермічного стиснення) в атмосферу як відходи. Після вилучення зі сховища повітря необхідно повторно нагріти перед розширенням в турбіні, щоб забезпечити енергією генератор, що може бути здійснено за допомогою пальника на природному газі для сховища комунального рівня або за допомогою нагрітої металеві маси.

Ізотермічні методи стиснення та розширення намагаються підтримувати робочу температуру завдяки постійному теплообміну з навколишнім середовищем.

в) Водневий паливний елемент

Паливний елемент — це пристрій для перетворення енергії, який тісно пов'язаний з акумулятором. Обидва є електрохімічними пристроями для перетворення хімічної енергії в електричну. В акумуляторі хімічна енергія зберігається всередині, тоді як у паливному елементі хімічна енергія (паливо та окислювач) подається ззовні і може постійно поповнюватися.

Загальна реакція в паливній комірці — це спонтанна реакція водню та кисню з утворенням електрики та води. Під час роботи паливної комірки водень іонізується на протони та електрони на аноді, іони водню

транспортуються через електроліт до катода за допомогою зовнішнього контуру (навантаження). На катоді кисень з'єднується з іонами водню та електронами, утворюючи воду.

Система водневих паливних елементів може бути оборотна, що дозволяє споживати електроенергію для виробництва водню, який може зберігатися для подальшого використання в паливних елементах [15]. Схема роботи системи зберігання енергії на водневих паливних елементах представлена на рисунку 1.8.

Летючість водню та зменшені розміри його атомів роблять резервуар для зберігання водню критичним елементом цього пристрою. Останні дослідження визнають металеві гідрати одними з найефективніших [15].

В останні роки системи водневих паливних елементів стали однією з найбільш популярних технологій зберігання енергії для вирішення проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії. Основними обмеженнями є ціна та ефективність заряджання/розряджання, що становить близько 30%.

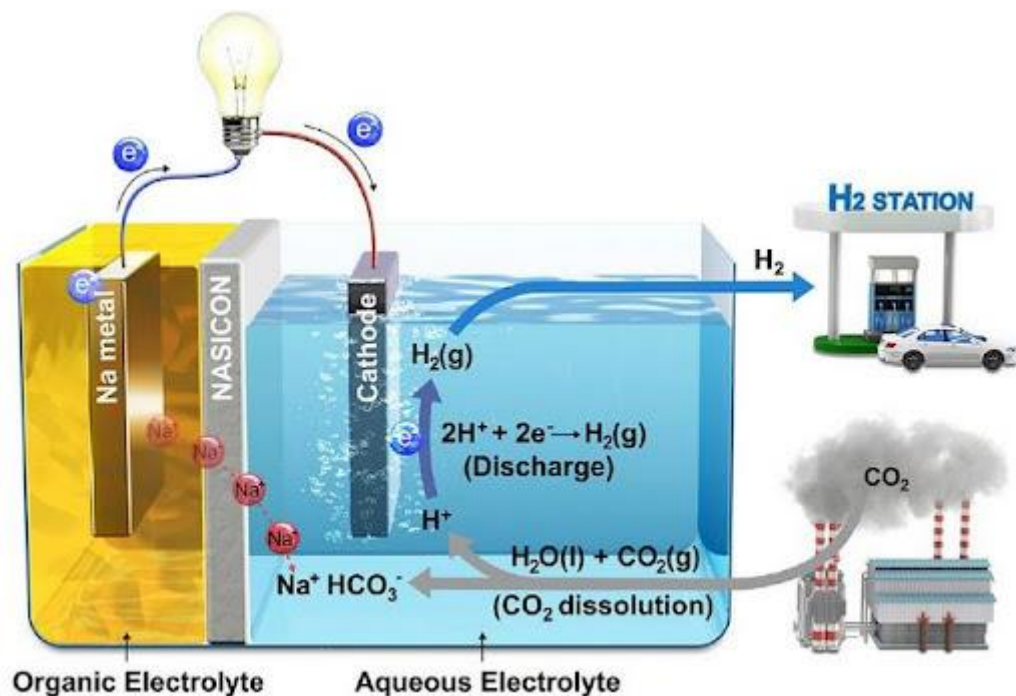


Рисунок 1.8 - Схема роботи системи зберігання енергії на водневих паливних елементах

г) Технологія зберігання водню

Водень також розробляється як засіб зберігання електроенергії. Водень не є первинним джерелом енергії, а є переносним засобом зберігання енергії, оскільки для його використання спочатку необхідно виготовити його за допомогою інших джерел енергії. Однак як засіб зберігання він може бути важливим фактором у використанні відновлюваних джерел енергії.

Підземне зберігання водню — це практика зберігання водню у підземних кавернах, соляних куполах та виснажених нафтових і газових родовищах. Великі кількості газоподібного водню зберігаються в підземних кавернах протягом багатьох років без будь-яких труднощів. Зберігання великих кількостей водню під землею може функціонувати як мережеве зберігання енергії, що є необхідним для водневої економіки. За допомогою турбоекспандера потреба в електроенергії для стисненого зберігання при тиску 200 бар становить 2,1% енергетичного вмісту.

Завдяки переривчастим відновлювальним джерелам, таким як сонячна та вітрова енергія, вихідна потужність може подаватися безпосередньо в електромережу. При проникненні нижче 20% попиту електромережі це не змінює економіку суттєво, але при перевищенні 20% загального попиту зовнішнє зберігання стане важливим. Якщо ці джерела використовуються для виробництва електроенергії для отримання водню, то їх можна використовувати в повній мірі, коли вони доступні, залежно від обставин. Взагалі кажучи, не має значення, коли вони вмикаються або вимикаються, водень просто зберігається і використовується за потреби. З 2007 року протягом п'яти років у віддаленому населеному пункті Рамеа, Ньюфаундленд і Лабрадор, реалізується пілотна програма на основі громади з використанням вітрових турбін і генераторів водню.

Крім того, існують деякі втрати енергії, пов'язані з циклом зберігання водню при виробництві водню для транспортних засобів з електролізом води, зрідженням або стисненням і перетворенням назад в електроенергію. і циклом зберігання водню при виробництві для стаціонарних паливних елементів, таких

як мікрочіпи, на 93 % з біоводнем або біологічним виробництвом водню, і перетворенням в електроенергію.

Знову ж таки, для виробництва одного кілограма водню потрібно близько 50 кВт·год (180 МДж) сонячної енергії, тому вартість електроенергії, очевидно, має вирішальне значення, навіть для використання водню в інших цілях, ніж зберігання для виробництва електроенергії. При ціні 0,03 дол. США/кВт·год, що є звичайною ціною на високовольтну лінію в Сполучених Штатах, це означає, що водень коштує 1,50 дол. США за кілограм електроенергії, що еквівалентно 1,50 дол. США за галон бензину, якщо він використовується в автомобілі на паливних елементах. Інші витрати включають електролізну установку, водневі компресори або зрідження, зберігання та транспортування, які будуть значними. Таким чином, цей метод є занадто дорогим.

д) Технологія зберігання біопалива

Біопаливо є однією з технологій зберігання енергії, в якій різні біопалива, такі як біодизель, пряма рослинна олія, спиртові палива або біомаса, можуть бути використані для заміни вуглеводневих палив. Різні хімічні процеси можуть перетворювати вуглець і водень у вугіллі, природному газі, рослинній і тваринній біомасі та органічних відходах на короткі вуглеводні, придатні для заміни існуючих вуглеводневих палив. Прикладами є дизельне паливо Фішера-Тропша, метанол, диметиловий ефір або синтетичний газ. Це дизельне паливо широко використовувалося в Німеччині під час Другої світової війни, коли доступ до запасів сирої нафти був обмеженим. Сьогодні Південна Африка виробляє більшу частину дизельного палива країни з вугілля з подібних причин. Довгострокова ціна на нафту вище 35 доларів США за барель може зробити такі синтетичні рідкі палива економічно вигідними у великих масштабах. Частина енергії вихідного джерела втрачається в процесі перетворення. Історично вугілля безпосередньо використовувалося для транспортування в транспортних засобах і суднах, що використовували парові двигуни. А стиснений природний газ використовується в особливих обставинах як паливо, наприклад, в автобусах деяких агентств громадського транспорту.

е) Технологія теплового зберігання

Теплова акумуляція — це тимчасове зберігання або відведення тепла для подальшого використання. Прикладом теплової акумуляції є зберігання сонячної теплової енергії протягом дня для подальшого використання для опалення вночі. Тепловий резервуар може підтримуватися при температурі вище (гарячіше) або нижче (холодніше) температури навколишнього середовища. Сьогодні це застосовується для виробництва льоду, охолодженої води або евтектичного розчину вночі, або гарячої води, яка потім використовується для охолодження/опалення приміщень протягом дня.

є) Технологія Grothe Power Tower

Grothe Power Tower — це пристрій для зберігання енергії для будинків та місцевих громад, який використовує надлишкову енергію від сонячних панелей та вітрових турбін, що зберігається в пристроях, схожих на водонапірні башти, і перетворюється водневими паливними елементами на електроенергію для ночі або безвітряних днів.

Grothe Power Tower отримує надлишкову енергію з відновлюваних джерел, таких як сонячна або вітрова енергія, через загальне електричне підключення. За допомогою водневого паливного елемента енергія перетворюється і зберігається у вигляді газу в пристрої, схожому на водонапірну башту, який називається Grothe Power Tower. За допомогою того ж паливного елемента ми перетворюємо енергію (газ), що зберігається в енергетичній башті, назад в електричне навантаження на вимогу, готове для використання в будинку або місцевій громаді, коли не світить сонце або не дме вітер. Це робить Grothe Power Tower ідеальним рішенням для зберігання енергії для пристроїв, що використовують відновлювані джерела енергії.

ж) Насосне гідроакумулююче сховище

У насосному гідроакумулюючому сховищі маса води, що знаходиться на відносно великій висоті, представляє потенційну або накопичену енергію. Коли потрібно виробляти енергію, вода з верхнього резервуара через трубу спускається вниз до гідроелектричного генератора і накопичується в нижньому

резервуарі. Для перезарядки системи зберігання вода перекачується назад у верхній резервуар, і електростанція діє як навантаження для енергосистеми [16].

Система гідроакumuлюючого енергозбереження складається з двох водосховищ, електричної машини (двигуна/генератора) та оборотного гідронасосно-турбінного агрегату. Система може бути запущена за кілька хвилин, а її автономність залежить від обсягу накопиченої води.

Існує три можливі конфігурації насосних гідросистем. Перша, чисто насосна гідросистема, відповідає електростанції, яка спеціально призначена для накопичення, де єдиною турбінованою/насосною водою є вода, що зберігається у верхньому та нижньому резервуарах. Друга конфігурація відповідає гідроелектростанції з резервуаром, інтегрованою у русло річки, оснащеною нижчим резервуаром та оборотним насосно-турбінним агрегатом. Третя конфігурація відповідає каскаду гідроелектростанцій, де деякі резервуари одночасно виконують функцію верхнього та нижнього резервуарів для різних електростанцій [17].

У другій і третій конфігураціях, які є найпоширенішими, експлуатація електростанції є більш складною через необхідність координації різних електростанцій та притоку води до водосховищ з річки. Експлуатація насосної гідроелектростанції представлена на рисунку 1.9.

Існує патент на систему виробництва електроенергії, яка дає уявлення про виробництво електроенергії за допомогою водонапірної башти. Конструкція цієї системи показана на рисунку 1.10, який дає детальне уявлення про систему [18].

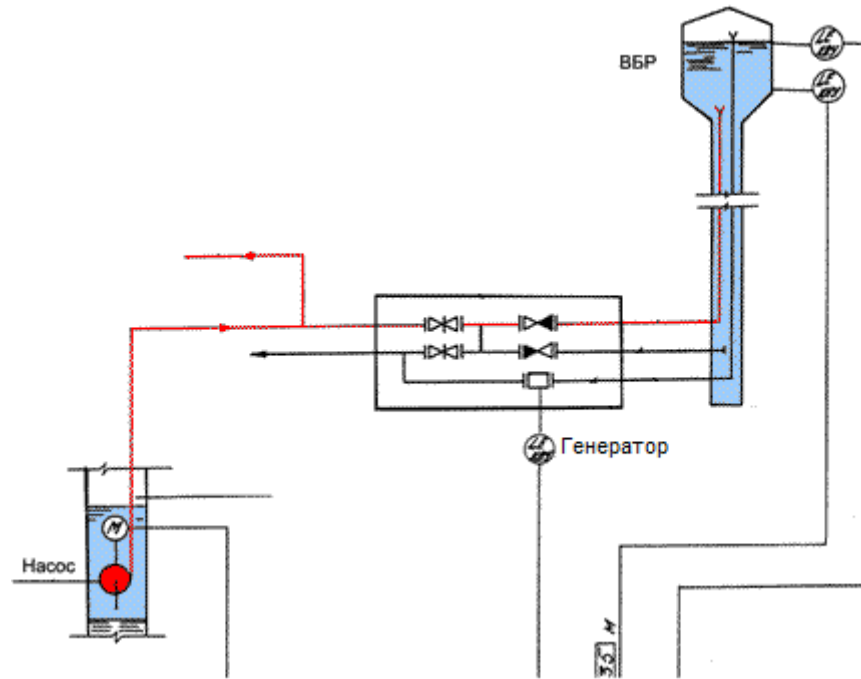


Рисунок 1.9 - Схема роботи насосної гідроелектростанції

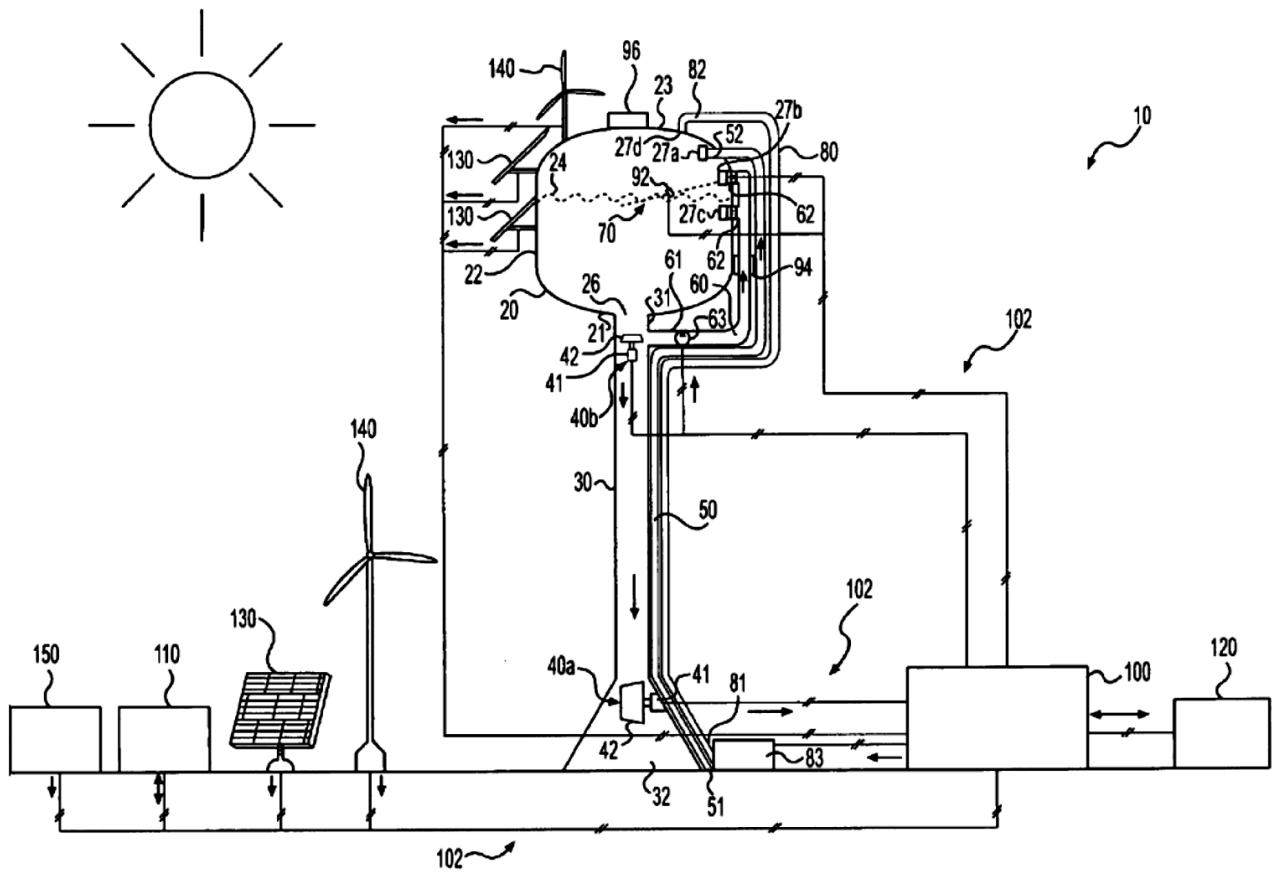


Рисунок 1.10 - Конструкція системи виробництва електроенергії за допомогою водонапірної башти

Суть цієї конструкції та принцип її роботи показані на рисунку 1.11. Резервуар має нижню поверхню (21). Водонапірна вежа також має рециркуляційний канал (60), з'єднаний з резервуаром. Цей рециркуляційний канал має перший кінець (61), з'єднаний з нижньою поверхнею резервуара і розташований поблизу або нижче неї, та другі кінці (27b) і (27c), з'єднані з резервуаром вище нижньої поверхні (21) резервуара.

Резервуар також включає водяний насос (63), розташований у рециркуляційному каналі (60) і призначений для перекачування рідини через рециркуляційний канал, а також пристрої для генерації енергії, що приводяться в дію рідиною (41) і (42), з'єднані з рециркуляційним каналом.

Принаймні частина рідини, що направляється через пристрій для генерації енергії, направляється через рециркуляційний канал. Таким чином, енергія генерується за допомогою пристрою для генерації енергії і передається до мереж для використання [18].

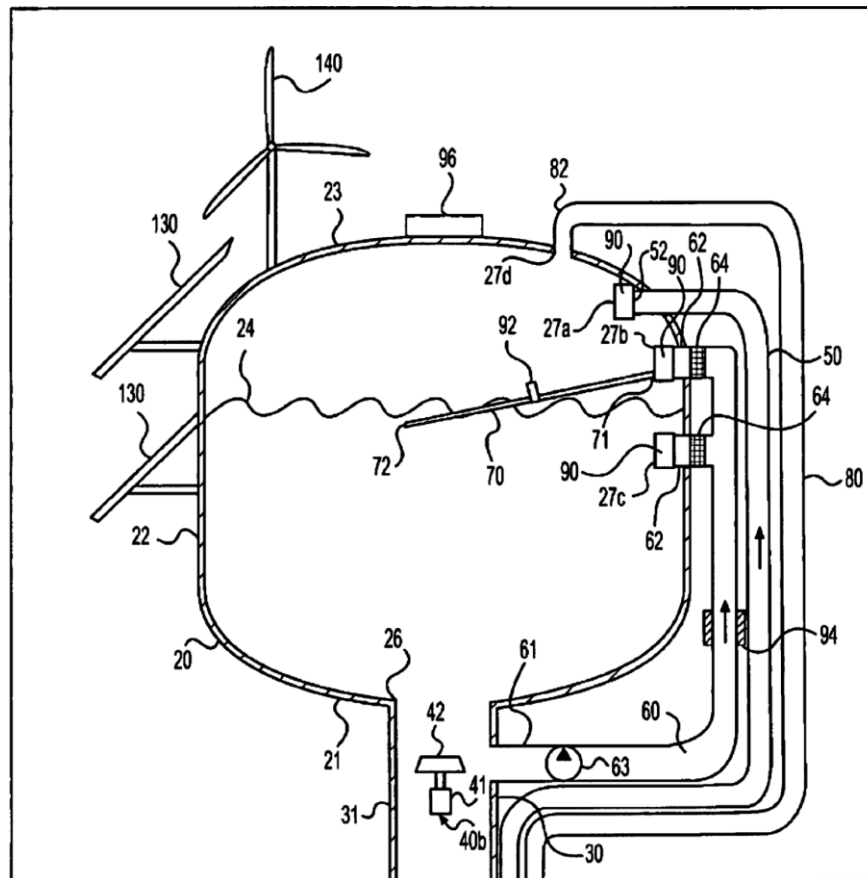


Рисунок 1.11 - Принцип роботи системи генерації енергії

Основним недоліком вищеописаної системи є те, що її конструкція є дуже складною і, отже, дорогою. Тому необхідно розробити особливу систему зберігання енергії, яка буде простою за конструкцією і виготовленням. Таким чином, метою цього проєкту є розробка системи зберігання енергії у водонапірній башті, яка буде простою, менш дорогою і яка зменшить витрати на зберігання електроенергії.

Сьогодні водонапірні башти використовуються лише для зберігання води та її постачання для громадського користування. У цьому проєкті основною метою є використання цих наявних водонапірних башт як системи зберігання енергії.

Запропонована тут концепція найбільш схожа на гідроакumuлюючу електростанцію, однак вона не залежить від унікальних геологічних утворень і не вимагає будівництва спеціальних водосховищ.

Муніципальні та інші типи водонапірних башт можуть бути оснащені насосами для закачування води у водонапірні башти, але використання електроенергії для закачування води у водонапірні башти вимагає значних витрат. Вночі, коли попит на воду зазвичай менший, тарифи на придбання електроенергії з електромережі часто є нижчими та не піковими. Тому закачування води у водонапірні башти в непікові години може зменшити витрати на роботу насосів.

1.5 Висновки до розділу

1. Проведений аналіз стану та перспектив розвитку вітроенергетики дозволяє зробити висновок, що вітрова енергетика є одним із найдинамічніших та найбільш перспективних секторів відновлюваної енергетики.

2. Проведений аналіз доводить, що основною проблемою вітроенергетики є її мінливість та перервистість, оскільки вихідна потужність вітрової турбіни не збігається із піковим електроспоживанням. Середня швидкість вітру значно вища вночі, коли попит на навантаження мінімальний.

Впровадження систем зберігання енергії дозволяє накопичувати надлишкову енергію вночі та випускати її у періоди пікового навантаження, зменшуючи мінливість вітрових електростанцій та забезпечуючи стабільніше постачання електроенергії у мережу.

3. Проведено класифікацію та огляд існуючих технологій зберігання енергії. До пристроїв короткочасного зберігання віднесено: маховики, суперконденсатори та надпровідні магнітні накопичувачі SMES. Ці технології ефективні для згладжування короткочасних коливань та надання системних послуг, але не здатні зберігати енергію протягом годин, необхідних для вирішення проблеми дисбалансу вітрової генерації. Для довгострокового зберігання розглянуто такі технології: акумуляторні системи, системи зберігання енергії стисненого повітря, водневі паливні елементи, технологія теплового зберігання, а також технологія з використанням водонапірної вежі.

4. Найбільш перспективною технологією довгострокового зберігання для інтеграції із вітроенергетикою є насосне гідроакумулювання. Система гідроакумулювання дозволяє зберігати великі обсяги енергії протягом годин, має високу ефективність (до 80%) та довгий термін служби. Вона не залежить від унікальних геологічних утворень, як гідроаккумулятивні електростанції, і може бути реалізована з використанням існуючих водонапірних башт, які широко поширені в інфраструктурі комунальних господарств. Це значно зменшує капітальні витрати на будівництво із порівнянням із традиційними гідроаккумулятивними електростанціями.

5. Оскільки існуючі водонапірні башту вже оснащені насосами для закачування води, перспективною є модернізація цієї інфраструктури для роботи як системи зберігання енергії. Закачування води у башту у непікові години, коли тарифи на електроенергію нижчі, додатково зменшує операційні витрати. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку компонування гідроакумулюючої системи на базі водонапірної башти, розрахунок її основних параметрів.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Види, загальна кількість та об'єм водонапірних башт в Україні

В Україні точний загальний облік водонапірних башт у відкритому доступі відсутній. Проте Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні за 2022-2024 роки надає дані по регіонах.

За даними Національної доповіді та обласних адміністрацій, вдалося встановити наступну статистику (таблиця 2.1)

Як бачимо, загальна оцінка по Україні близько 2100 башт із сумарним об'ємом до 833 тис.м³. Важливе те, що в Дніпропетровській області переважають великі залізобетонні башти міського типу (середній об'єм ~1 650 м³), тоді як у Вінницькій переважно металеві башти Рожновського (середній об'єм ~33 м³).

Металеві башти Рожновського це серійні конструкції для сільських населених пунктів, ферм, котеджних містечок. Проектуються за стандартами 1960-80-х років та є найпоширенішим типом башт в Україні.

Башти Рожновського (ВБР) складаються зі сталевого резервуара на фермовій опорі. Конструкція показана на рисунку 2.2

Міські залізобетонні башти – це індивідуальні конструкції, об'ємом від 200 до 2000+ м³, висотою 20-40 м. Використовуються у міських системах централізованого водопостачання. Їх спеціально проектують під конкретний район постачання з урахуванням демографічних показників.

Енергоємність та фізика процесу

Потенціальна енергія води розраховується за формулою $E = mgh$, де m - маса води, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, h - висота підйому. Перетворення у кВт·год дає наступні результати (таблиця 2.3.)

Таблиця 2.1 - Дані щодо кількості водонапірних башт та їх сумарний об'єм по областях (2022-2024 рр.)

Область / місто	Кількість	Сумарний об'єм
Автономна Республіка Крим	~85	~28 тис. м ³
Вінницька	272	8.9 тис. м ³
Волинська	32	1.25 тис. м ³
Дніпропетровська	202	333 тис. м ³
Донецька	34	142.5 тис. м ³
Житомирська	113	8.69 тис. м ³
Закарпатська	2	0.23 тис. м ³
Запорізька	114	8.67 тис. м ³
Івано-Франківська	~58	~7.8 тис. м ³
Київ (місто)	~45	~120 тис. м ³
Київська	~85	~22 тис. м ³
Кіровоградська	~42	~4.8 тис. м ³
Луганська	~15	~2.5 тис. м ³
Львівська	~125	~32 тис. м ³
Миколаївська	~48	~6.2 тис. м ³
Одеська	~150	~42 тис. м ³
Полтавська	~75	~14 тис. м ³
Рівненська	~58	~7.5 тис. м ³
Сумська	~52	~6.5 тис. м ³
Тернопільська	~48	~5.5 тис. м ³
Харківська	~135	~38 тис. м ³
Херсонська	~35	~4.5 тис. м ³
Хмельницька	~62	~9.5 тис. м ³
Черкаська	~68	~11 тис. м ³
Чернівецька	~38	~4.0 тис. м ³
Чернігівська	~48	~5.8 тис. м ³
РАЗОМ (оцінка)	~2 100	~833 тис. м³

Таблиця 2.2 – Види башт Рожновського

Тип	Об'єм	Висота	Застосування
ВБР-15	15 м ³	11.5 м	Приватні будинки, ферми
ВБР-25	25 м ³	13.5 м	ЖКГ, невеликі підприємства
ВБР-50	50 м ³	16.5 м	Промислові об'єкти
ВБР-160	160 м ³	26 м	Великі села, селища

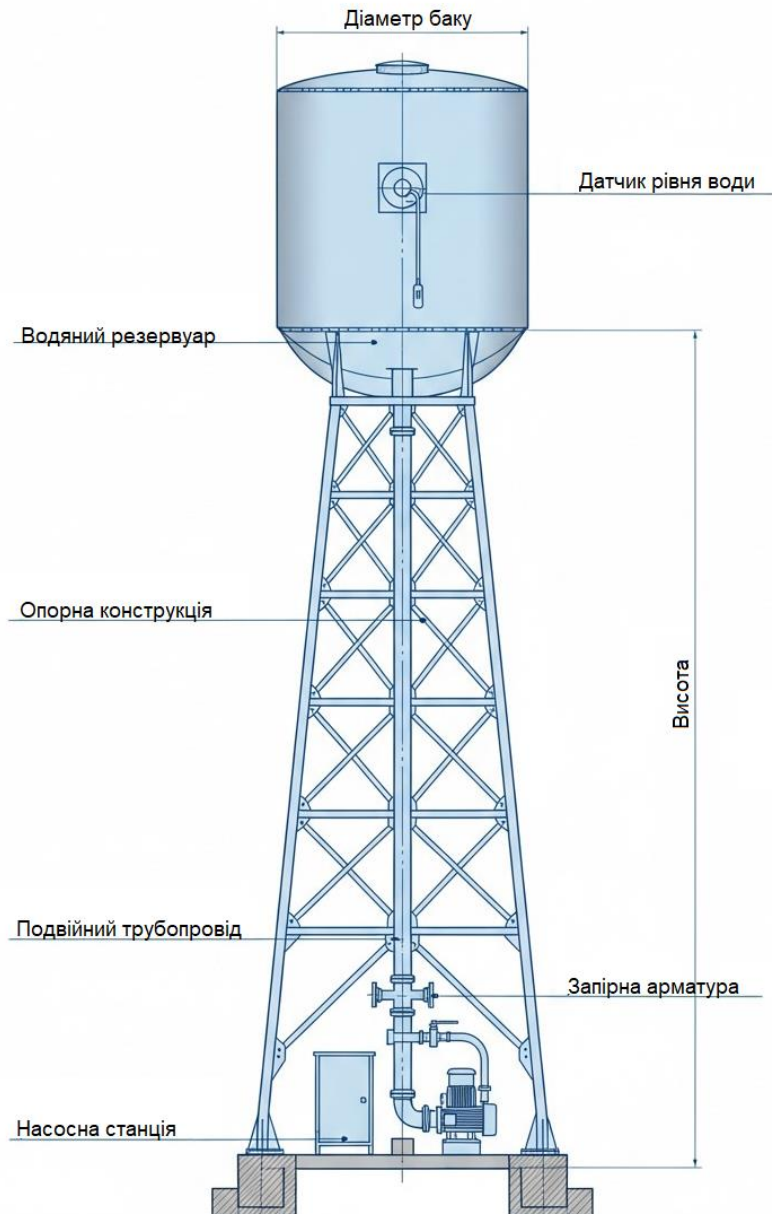


Рисунок 2.1 - Башта Рожновського

Таблиця 2.3 – Енергоємність водонапірних башт, які є в Україні

Тип башти	Параметри	Енергоємність
ВБР-15	15 м ³ x 11.5 м	0.47 кВт·год
ВБР-50	50 м ³ x 16.5 м	2.25 кВт·год
Міська (500 м ³)	500 м ³ x 25 м	34.0 кВт·год
Міська (1000 м ³)	1000 м ³ x 30 м	81.8 кВт·год
Промислова (2000 м ³)	2000 м ³ x 35 м	190.8 кВт·год

2.2 Запропонована конструкція системи зберігання енергії

Аналіз конструкцій системи зберігання енергії у водонапірній башті представлена в розділі 1.

У світі існує безліч систем зберігання енергії, але конструкція технології зберігання енергії з використанням водонапірної башти робить цей проєкт інноваційним і відмінним від інших технологій зберігання, оскільки ми використовуємо саму водонапірну башту як пристрій для зберігання, що, безсумнівно, дозволить заощадити багато коштів у порівнянні з іншими технологіями, розглянутими вище. Ці водонапірні башти вже широко представлені по всій країні, і основною метою цього проєкту є використання цих водонапірних башт не тільки для постачання води для муніципальних потреб, але й для зберігання електроенергії.

Основною метою цього проєкту є ідея зберігання гідроелектричної енергії в існуючих муніципальних водонапірних баштах шляхом поєднання електричних і гідравлічних компонентів з типовою системою водонапірної башти. Спочатку буде створено математичну модель всієї системи, а потім на основі вимог і розрахункових результатів буде обрано основні компоненти.

На рисунку 2.2 показана традиційна водонапірна вежа з вітрогенератором, встановленим поруч. Слід зазначити, що вітрогенератор можна встановити на вершині водонапірної вежі для додаткового використання вітру.

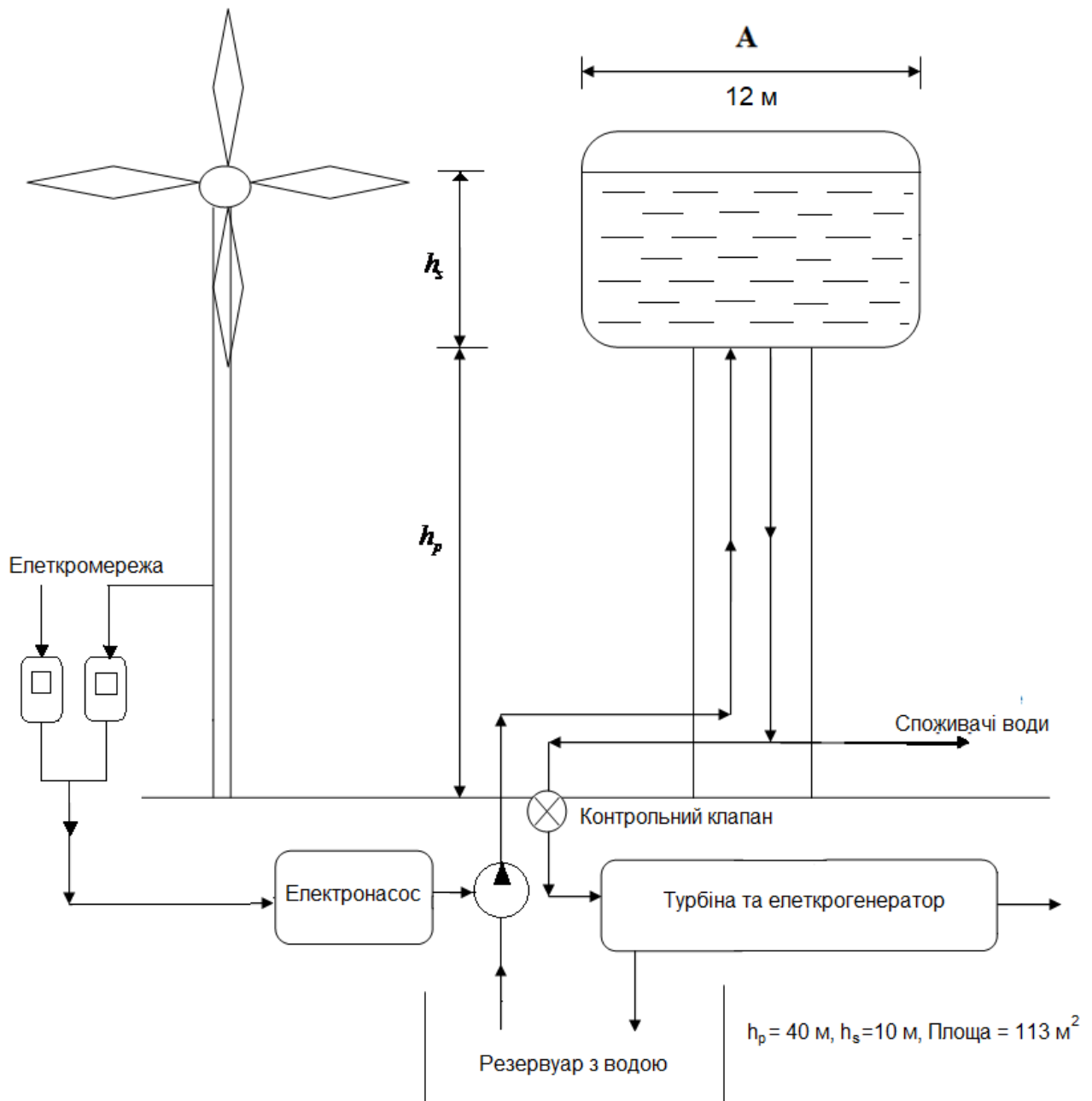


Рисунок 2.2 - Система зберігання енергії водонапірною баштою

Вітрогенератор є пристроєм, який може використовуватися для уловлювання відновлюваної енергії і може бути легко замінений набір сонячних панелей або іншим джерелом відновлюваної енергії без зміни функції вітрової вежі. Водонапірна вежа має два рівні води: 1) рівень води h_p використовується для створення необхідного тиску води, який традиційно генерується водонапірною вежею, і 2) рівень води h_s використовується для зберігання енергії у вигляді насосної гідроелектричної енергії.

На рисунку 2.2 показана лінія скидання води, яка розділяє водопостачання для житлових і комерційних цілей та для виробництва електроенергії.

У нижній частині рисунка показана система управління енергією, яка закачує воду в башту і викачує її з башти для поповнення водопостачання та видобутку енергії. Ця система управління енергією використовує гідравлічний насос, що приводиться в дію електродвигуном, який живиться від самого відновлюваного джерела енергії, такого як вітрогенератор. Насос наповнює водою водонапірну башту з резервуара. Вихідною стороною системи управління енергією є водяна турбіна, яка приводить в дію однофазний електричний генератор. Ця турбіна використовується для вилучення гідроелектричної енергії з башти в періоди пікового споживання електроенергії. Ця гідроелектрична енергія потім постачається в електромережу або в будинки. Вода, яка використовується для приведення в дію турбіни, проходить через систему фільтрації води (не показана на малюнку) і рециркулюється шляхом направлення її стоку назад у резервуар, звідки насос забирає воду. Ця замкнена система запобігає витраті води і містить систему управління енергією в загальній конструкції водонапірної башти. Єдина вода, яка виходить із системи, — це вода, яка використовується для муніципального водопостачання.

Система гідроакumuлювання складається з трьох взаємопов'язаних контурів: водяного, механічного та електричного. Кожен контур виконує специфічні функції та містить власний набір компонентів, що забезпечують ефективне перетворення енергії від однієї форми до іншої.

Водяний контур забезпечує циркуляцію робочої рідини (води) між верхнім та нижнім резервуарами через гідроагрегат. Він включає водонапірну башту як верхній резервуар, нижній резервуар (водойму, підземний резервуар або природній водойм), трубопроводи, запірну арматуру та контрольно-вимірювальні прилади. Водяний контур є основним елементом системи, оскільки саме в ньому відбувається накопичення та віддача енергії.

Механічний контур призначений для перетворення гідравлічної енергії в механічну обертальну енергію та навпаки. Його ключовим компонентом є насос-турбіна (pump-turbine) - реверсивна гідравлічна машина, здатна працювати як у режимі насоса, так і в режимі турбіни. Механічний контур також включає вал, муфти, підшипникові вузли та систему ущільнень.

Електричний контур забезпечує перетворення електричної енергії в механічну (у режимі заряджання) та механічної в електричну (у режимі розряджання). Він включає електродвигун-генератор, частотний перетворювач, силовий трансформатор, систему релейного захисту та автоматики, а також прилади обліку електричної енергії.

Взаємодія контурів відбувається наступним чином. У режимі заряджання електрична енергія з мережі надходить на електродвигун через частотний перетворювач та трансформатор. Електродвигун приводить у обертання вал насоса-турбіни, яка перекачує воду з нижнього резервуара у верхній (водонапірну башту). При цьому електрична енергія перетворюється спочатку в механічну, потім в гідравлічну, і, нарешті, в потенціальну енергію маси води, піднятої на висоту.

У режимі розряджання процес відбувається у зворотному напрямку. Вода з верхнього резервуара під тиском, створеним власною вагою, надходить на лопатки турбінної частини гідроагрегату, змушуючи його обертатися. Обертаний рух вала передається на генератор, який виробляє електричну енергію. Ця енергія через частотний перетворювач і трансформатор подається в електричну мережу.

Система автоматичного керування здійснює контроль усіх процесів, оптимізує режими роботи, забезпечує захист обладнання від аварійних ситуацій та взаємодіє з диспетчерськими системами енергопостачальної компанії. Основою системи керування є програмований логічний контролер (PLC) з відповідними модулями вводу-виводу та інтерфейсом оператора.

2.3 Водяний контур системи зберігання енергії

Водяний контур є функціональною основою системи гідроакumuлювання. Його конструкція визначає основні енергетичні характеристики установки: максимальну ємність накопичення, потужність та тривалість циклу. Детальна схема водяного контуру наведена на рисунку 2.2.

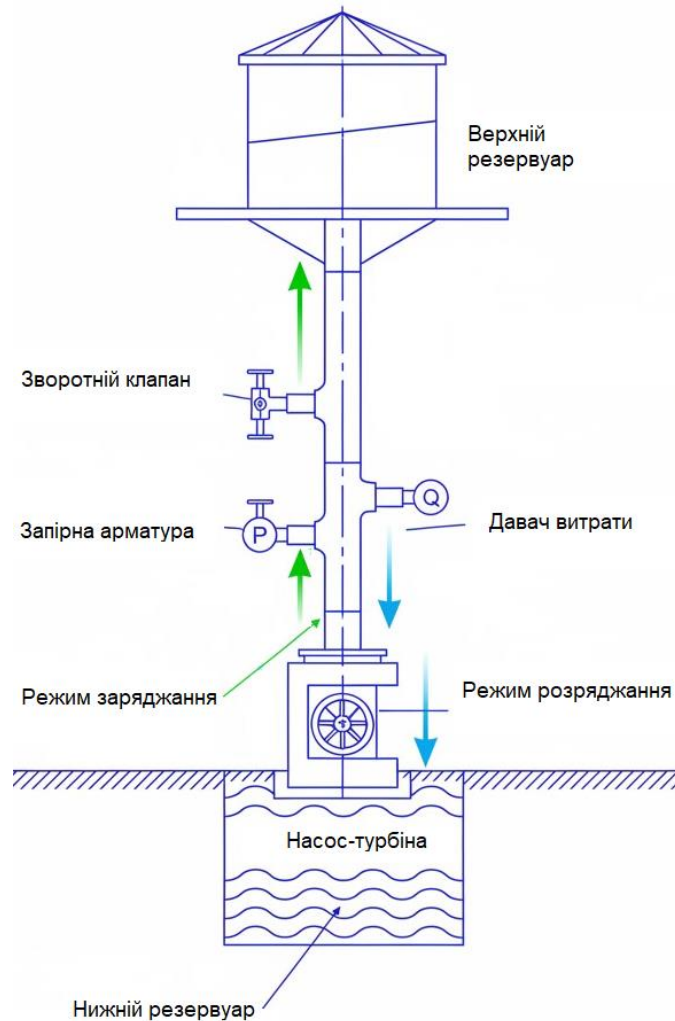


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення водяного контуру

Верхній резервуар виконує функцію водонапірної башти. Він являє собою герметичну ємність циліндричної форми з конусоподібним днищем, встановлену на опорній конструкції на висоті 15-35 метрів над рівнем землі. Матеріалом для виготовлення резервуара слугує вуглецева сталь товщиною 4-8 мм з антикорозійним покриттям. Внутрішня поверхня резервуара покривається епоксидною емаллю, а зовнішня - ґрунтовкою та фарбою.

Об'єм верхнього резервуара визначається з розрахунку необхідної енергоємності системи. Для побутового та комунального використання оптимальним є об'єм 500-1000 м³, що забезпечує накопичення 34-82 кВт·год електричної енергії при висоті башти 25-30 м. Резервуар обладнується люком для огляду та ремонту, сходами, сифоном для видалення осаду, а також вентиляційною трубою з москітною сіткою. Нижній резервуар приймає воду, що скидається з верхнього резервуара у режимі розряджання. У випадку використання існуючої башти водопостачання, нижнім резервуаром може слугувати водойма очисних споруд, підземний резервуар чистої води або спеціально облаштована водойма. Об'єм нижнього резервуара має бути не меншим за об'єм верхнього з урахуванням втрат на випаровування та фільтрацію.

Трубопровідна система з'єднує верхній та нижній резервуари з гідроагрегатом. Трубопроводи виготовляються зі сталі або поліетилену високої щільності діаметром 150-300 мм залежно від продуктивності системи. У місцях з'єднання труб з насосом-турбіною встановлюються гнучкі вставки для компенсації вібрацій та температурних деформацій.

Запірна арматура включає засувки на трубопроводах, зворотні клапани для запобігання самовільному руху води та дросельні заслінки для регулювання витрати. Усі арматурні вироби мають електричний привод для можливості дистанційного керування з пульта оператора. На трубопроводах встановлюються датчики тиску (0-1,6 МПа), витратоміри (електромагнітні, ультразвукові) та індикатори рівня води.

Гідравлічні розрахунки водяного контуру включають визначення оптимального діаметра трубопроводів, розрахунок втрат напора на тертя та місцеві опори, перевірку на кавітацію. Загальні втрати напора у водяному контурі не мають перевищувати 5-8% від робочого напору, що забезпечує високий загальний ККД системи.

2.4 Механічний контур системи

Механічний контур перетворює гідравлічну енергію потоку води в обертальний момент на валу генератора. Його основою є реверсивний гідроагрегат, що поєднує функції насоса та турбіни в одному корпусі. Таке конструктивне рішення знижує капітальні витрати, масогабаритні показники та спрощує монтаж і обслуговування.

Вал гідроагрегату виготовляється з високоміцної легованої сталі та проходить через усі робочі камери машини. На валу встановлюється робоче колесо, підшипникові вузли та елементи ущільнення. Вал з'єднується з ротором електродвигуна-генератора через еластичну муфту, що компенсує можливі невеликі відхилення від співвісності. Ущільнення вала в місці виходу з корпусу гідроагрегату виконується за схемою торцевого механічного ущільнення з допоміжною системою бар'єрної рідини. Таке рішення запобігає витoku води назовні та проникненню повітря у внутрішні камери насоса-турбіни. Ресурс торцевого ущільнення становить не менше 15 000 годин роботи при номінальних умовах.

Підшипникові вузли виконуються у вигляді радіально-упорних кулькових підшипників, здатних сприймати як радіальні, так і осьові навантаження. Верхній підшипниковий вузол встановлюється безпосередньо над робочим колесом і сприймає осьову силу, що виникає при роботі насоса. Нижній підшипниковий вузол фіксує вал від радіальних переміщень. Підшипники працюють у масляній ванні з системою охолодження.

Корпус гідроагрегату виготовляється методом лиття з високоміцного чавуну або вуглецевої сталі. Внутрішні проточні канали оптимізовані для забезпечення високого ККД як у насосному, так і у турбінному режимах. Конструкція передбачає можливість огляду та ремонту робочого колеса через розбірний фланцевий з'єднання. На корпусі передбачені отвори для установки датчиків тиску та температури.

2.5 Режими роботи системи

Система гідроакумулювання працює у трьох основних режимах: заряджання, розряджання та очікування. Перемикання між режимами відбувається автоматично за сигналами системи керування на основі даних про частоту та навантаження електричної мережі, рівень води у резервуарах та технічний стан обладнання.

Режим заряджання (насосний) активується при надлишку електроенергії в мережі, що супроводжується підвищенням частоти вище номінальної. У цьому режимі електродвигун приводить у рух насосну частину гідроагрегату, яка перекачує воду з нижнього резервуара у верхній. Процес триває до досягнення максимального рівня води у башті або до зникнення умов надлишку енергії в мережі. Тривалість повного циклу заряджання для башти об'ємом 500 м³ становить 2,5-3 години.

Режим розряджання (генераторний) активується при дефіциті активної потужності в мережі, що супроводжується зниженням частоти нижче номінальної. У цьому режимі вода з верхнього резервуара надходить на турбінну частину гідроагрегату, обертаючи вал генератора. Вироблена електрична енергія через частотний перетворювач і трансформатор подається в мережу. Тривалість повного розряджання залежить від рівня води у башті та потужності навантаження і становить 2-2,5 години.

Режим очікування (байпасний) встановлюється при нормальному стані мережі, коли частота знаходиться в допустимих межах 49,8-50,2 Гц, або при досягненні граничних рівнів води у резервуарах. У цьому режимі гідроагрегат зупиняється, запірні арматури перекриваються, система переходить у режим мінімального енергоспоживання для підтримки роботи системи керування та датчиків.

2.6 Технічний аналіз

Водонапірна башта, показана на рисунку 2.2, буде використовуватися для попереднього аналізу цієї концепції. У цьому аналізі буде показано, що як традиційна потреба у тиску води, так і нова потреба у зберіганні енергії можуть бути задоволені в рамках однієї системи водонапірної башти.

По-перше, добре відомо, що тиск води в основі традиційної водонапірної башти прямо пропорційний висоті водяного стовпа в башті. Тиск визначається за формулою

$$p = \rho gh \quad (2.1)$$

де ρ - щільність води;
 g - гравітаційна константа;
 h - висота рівня води в башті.

Якщо припустити, що рівень води вище певної висоти h_p є достатнім для створення необхідного тиску води в муніципальній мережі, то все, що перевищує h_p , може бути використано для зберігання гідроелектричної енергії. Іншими словами, енергія може бути видобута з рівня води, що існує вище h_p .

По-друге, можна показати, що потужність, необхідна для перекачування рідини у водонапірну башту, визначається таким виразом:

$$P_{in} = \frac{dE}{dt} = pQ \quad (2.2)$$

де E - енергія;
 t - час;
 p - тиск рідини в основі водонапірної башти;
 Q - об'ємна витрата рідини в башту.

Відповідно до попереднього обговорення, тиск рідини в основі башти визначається таким чином:

$$p = \rho g h_p + h_s \quad (2.3)$$

Якщо припустити, що рідина є нестисливою, об'ємний витрата може бути записаний у вигляді

$$Q = \frac{dv}{dt} = A \left(\frac{dh_s}{dt} \right) \quad (2.4)$$

де A - площа поперечного перерізу вежі, показана на рисунку 2.2. Підставляючи рівняння (2.3) і (2.4) в рівняння (2.2), отримуємо наступний вираз для кількості гідроелектричної енергії, що зберігається у вежі:

$$\int_0^E dE = \int_0^{h_s} \rho g h_p + h_s A dh_s \quad (2.5)$$

$$E = \rho g A \left(h_p h_s + \frac{1}{2} h_s^2 \right)$$

Якщо ми використовуємо наступні вихідні значення для проектування водонапірної башти: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $A = 113 \text{ м}^2$ (резервуар діаметром 12 метрів), $h_p = 40 \text{ м}$, $h_s = 10 \text{ м}$, то отримаємо

$$E = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 113 \text{ м}^2 \cdot \left(40 \text{ м} \cdot 10 \text{ м} + \frac{1}{2} 10 \text{ м}^2 \right)$$

$$E = 1,108,530 \frac{\text{кг}}{\text{с}^2} \cdot 450 \text{ м}^2$$

$$E = 498,83685 \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$$

$$1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 1 \text{ Джоуль} = 2,7778 \cdot 10^{-7} \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$E = 498,83685 \cdot 10^6 \cdot 2,7778 \cdot 10^{-7} \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$E = 139 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Ця ємність для накопичення 139 кВт·год призначена для повного об'єму води, що зберігається в резервуарі. Але вважається, що для вироблення електроенергії з резервуара витягується лише половина об'єму води, а друга половина використовується для постачання води для комунальних потреб, що означає, що для зберігання енергії використовується лише половина об'єму. Отже, фактична ємність зберігання для однієї водонапірної башти становить

$$E = \frac{139 \text{кВт} \cdot \text{год}}{2}$$

$$E = 69,5 \text{кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, ємність накопичувача енергії для одного резервуара для води становить 69,5 кВт·год. Якщо припустити, що енергія розряджається протягом 7 годин,

$$P = \frac{69,5 \text{кВт} \cdot \text{год}}{7 \text{год}}$$

$$P = 10 \text{кВт}$$

Отже, потужність, що забезпечується цією накопиченою енергією, становить 10 кВт. Це може здатися не дуже великим об'ємом накопичення, однак це число потрібно масштабувати відповідно до національних можливостей, що доступні в муніципальних водонапірних баштах.

2.7 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз стану водонапірного господарства України. Встановлено, що на території країни функціонує близько 2100 водонапірних башт із сумарним об'ємом ~833 тис. м³, які можуть бути використані як база для створення розосереджених систем гідроакмулювання електроенергії.

2. Запропоновано конструкцію системи зберігання енергії на базі водонапірної башти, яка поєднує традиційну функцію водопостачання з функцією гідроакмулювання. Концепція передбачає розподіл об'єму башти на дві зони: робочу зону рівня h_r для підтримання тиску водопостачання та зону накопичення h_s для зберігання енергії, що дозволяє використовувати існуючу інфраструктуру без повної модернізації водопостачальної системи.

3. Описано три режими роботи системи: режим заряджання (насосний), режим розряджання (генераторний) та режим очікування. Встановлено, що перемикання між режимами здійснюється автоматично за сигналами системи керування на основі моніторингу частоти мережі (пороги 49,8 Гц та 50,2 Гц) та

рівня води у резервуарі. Тривалість повного циклу заряджання становить 2,5-3 години, розряджання — 2-2,5 години.

4. Виконано технічний розрахунок ємності системи для башти з параметрами: діаметр резервуара 12 м (площа поперечного перерізу 113 м²), рівень водопостачання $h_p = 40$ м, рівень накопичення $h_s = 10$ м. Розрахована енергоємність повного об'єму накопичення становить 139 кВт·год, а фактична ємність зберігання (половина об'єму) — 69,5 кВт·год.

5. Визначено, що потужність гідроакumuлюючої системи при розрядженні протягом 7 годин становить 10 кВт для однієї водонапірної башти..

6. Запропоновано встановлення вітрогенератора на вершині водонапірної башти або поруч з нею, що дозволяє створити повністю автономний енергетичний комплекс з відновлюваного джерела. Це забезпечує подвійне використання башти: як опору для вітрогенератора та як резервуар для накопичення енергії, що підвищує економічну ефективність проєкту.

10. Встановлено, що запропонована конструкція системи гідроакumuлювання на базі водонапірної башти є технічно реалізованою. Система забезпечує подвійне використання існуючої інфраструктури, підвищує стабільність електропостачання від вітроенергетичних установок і може слугувати основою для створення локальних мікромереж з відновлюваних джерел енергії.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані для проведення розрахунків

Як зазначено в розділі 2, дослідження показують, що в Україні налічується 2100 водонапірних башт. Важливою метою цього проєкту є використання цих численних водонапірних башт не тільки для постачання води для муніципальних потреб, але й для виробництва електроенергії. Отже, для виробництва 10 кВт електроенергії з однієї водонапірної башти ми маємо спроектувати типову систему водонапірної башти зі стандартними характеристиками, що використовуються для існуючих водонапірних башт. Згідно з дослідженням, проєктні характеристики, що використовуються для стандартної міської системи водонапірної башти, передбачають висоту 40 м, а площа резервуара для води становить приблизно 113 м² (резервуар діаметром 12 м), а з технічного аналізу, обговореного в розділі 2, випливає, що одна водонапірна башта може генерувати 10 кВт електроенергії, використовуючи ці стандартні характеристики для системи водонапірної башти.

У цьому розділі розглядаються об'ємна ємність резервуара для води, витрати, необхідні для вироблення електроенергії та постачання води для муніципальних потреб, кількість людей, яких обслуговує резервуар для води, потужність, необхідна для роботи водяного насоса, та необхідні основні компоненти.

3.2 Ємність водонапірної башти

Як зазначено в розділі 2, резервуар для води має площу 113 м². Необхідно розрахувати об'ємну ємність цього резервуара для води, що дасть уявлення про об'єм води, необхідний для виробництва електроенергії, та об'єм води, необхідний для постачання для муніципальних потреб.

На рисунку 3.1 показано типову водонапірну башту, яка має об'ємну ємність V . У проєкті передбачається, що половина об'єму води V_{power} використовується для виробництва електроенергії, а інша половина V_{use} - для постачання води для комунальних потреб.

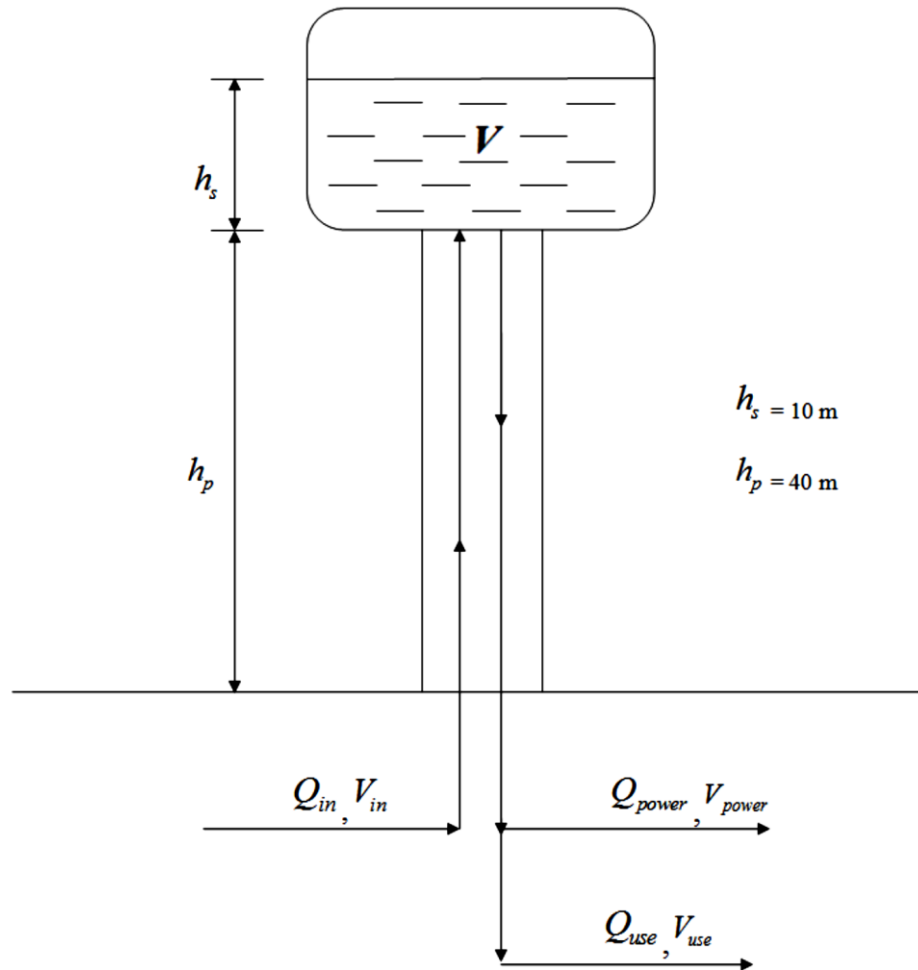


Рисунок 3.1 - Типова водонапірна башта

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h_s$$

$$V = \frac{\pi 12m^2}{4} 10m$$

$$V = 1131m^3$$

Таким чином, об'єм водонапірної башти V становить 264 м^3 , з яких половина використовується для виробництва електроенергії, а інша половина

— для комунальних потреб. Тому необхідно розрахувати витрати води через вхідну та вихідну труби, що буде розглянуто в наступних розділах.

3.3 Витрата води на виході з резервуару

Вихід з цього резервуара в основному поділяється на два напрямки: один для постачання води для виробництва електроенергії, інший для комунальних потреб. Тому необхідно розрахувати витрати для обох виходів.

3.3.1 Швидкість потоку води, що використовується для водопостачання

Як обговорювалося в розділі 3.2, передбачається, що половина обсягу води використовується для постачання води для комунальних потреб. Необхідно розрахувати швидкість потоку води Q_{use} для комунальних потреб, як показано на рисунку 3.1. Перед цим необхідно обчислити об'єм води, що використовується для комунальних потреб. Вважається, що половина обсягу води у водосховищі використовується для комунальних потреб:

$$V_{use} = \frac{1131}{2} \text{ м}^3$$

$$V_{use} = 565,5 \text{ м}^3$$

Отже, 565,5 м³ води можуть бути використані для комунальних потреб.

Таким чином, витрата води для комунальних потреб протягом 12 годин становить $Q_{use} = 0,013 \text{ м}^3/\text{сек}$.

3.3.2 Витрата води на виробництво електроенергії

Половина обсягу води (565,5 м³) у резервуарі використовується для виробництва електроенергії, а вода викачується протягом 7 годин. Отже, витрата води для виробництва електроенергії становить $Q_{power} = 0,022 \text{ м}^3/\text{сек}$.

3.4 Витрата води на вході до резервуара

Вважається, що закачування води до резервуара для води буде здійснюватися вночі протягом 12 годин, а об'єм води становить 1131 м³.

$$Q_{in} = \frac{1131}{12 \cdot 60 \cdot 60} \frac{c^3}{сек}$$

$$Q_{in} = 0,026 \frac{M^3}{c}$$

Таким чином, витрата води на вході до резервуара становить 0,026 м³/сек.

3.5 Проектна кількість людей, яких обслуговує водонапірна вежа

Головною метою цього проєкту є використання існуючих водонапірних веж не тільки для виробництва електроенергії, але й для постачання води для комунальних потреб, тому також необхідно розрахувати кількість людей, яких обслуговує обсяг води V_{use} , але перед цим необхідно розрахувати середнє споживання води на одну особу на день, що буде розглянуто в цьому розділі.

Розглянемо середнє споживання води на одну особу на день.

Згідно з даними Геологічної служби США (USGS), кожна особа споживає приблизно 0,30-0,38 м³ води на день. Цей аналіз наведено в таблиці 3.1 [55].

Таблиця 3.1 - Аналіз середнього споживання води на одну особу на день
[55]

Типове споживання води в домашніх умовах на одну особу на день	
Ванна	Повна ванна вміщує близько 0,136 м ³ ..
Душ	0,008 м ³ на хвилину. Старі душові головки використовують до 0,019 м ³ на хвилину.
Чищення зубів	<0,004 м ³ , особливо якщо під час чищення зубів вода вимкнена. Нові змішувачі для ванни використовують близько 0,004 м ³ на хвилину,

	тоді як старі моделі використовують понад 0,008 м ³ .
Миття рук/обличчя	0,004 м ³
Гоління обличчя/ніг	0,004 м ³
Посудомийна машина	0,015–0,038 м ³ за цикл, залежно від ефективності посудомийної машини
Миття посуду вручну	0,076 м ³ . Нові кухонні змішувачі використовують приблизно 0,008 м ³ на хвилину, тоді як старі змішувачі використовують більше.
Пральна машина	0,095 м ³ на завантаження для нових пральних машин. Старі моделі використовують близько 0,15 м ³ на завантаження.
Змивання туалету	0,011 м ³ . Більшість нових туалетів використовують 0,006 м ³ на змивання, але багато старих туалетів використовували близько 0,015 м ³ .
Склянки випитої води	180 мл на склянку
Полив на відкритому повітрі	0,019-0,038 м ³ на хвилину

Таким чином, середнє споживання води на одну особу на день становить 0,38 м³. Отже, кількість людей (N_p), яких можна нагодувати за допомогою 565 м³ галонів води, визначається за формулою:

$$N_p = \frac{149,292}{100}$$

$$N_p = 1493 \approx 1500 \text{ осіб}$$

Таким чином, 1500 осіб можуть бути забезпечені 565 м³ води.

3.6 Кількість електроенергії, необхідної для роботи водяного насоса

Під час реалізації цього проєкту вітрогенератор використовується для вироблення певної кількості електроенергії, необхідної для роботи електродвигуна, який приводить в дію водяний насос для подачі води на висоту 40 м. Тому необхідно розрахувати кількість електроенергії, необхідної для роботи водяного насоса, що допоможе визначити розмір вітрової турбіни, необхідної для цього проєкту. Отже, потужність, необхідна для водяного насоса для перекачування води у водонапірну башту, визначається за формулою:

$$WHP = \frac{Q_{in}}{3960} \cdot h_p$$

де WHP - водяна потужність;

Q_{in} - витрата в $\text{м}^3/\text{хв} = 1,57 \text{ м}^3/\text{хв}$;

h_p - висота.

Тепер потужність, необхідна для насоса для перекачування води у водонапірну башту, становить

$$WHP = 13,74HP = 10,24\text{кВт}$$

Отже, потужність, необхідна для насоса для перекачування води у водонапірну башту, становить 10,24 кВт.

3.7 Розрахунок характеристики віротурбіни

У цьому проєкті нам потрібно кілька основних компонентів, оскільки вже існуюча конструкція водонапірної башти та відповідні компоненти, такі як електродвигун, водяний насос, система фільтрації води та датчик для підтримки рівня води в резервуарі, вже є в наявності у системі водонапірної башти, що, безсумнівно, заощадить витрати на їх придбання. Основні компоненти, необхідні для цього проєкту, розглядаються нижче.

Віротурбіна є пристроєм, який перетворює кінетичну енергію вітру, також звану вітровою енергією, у механічну енергію; цей процес відомий як вітрова енергія. Якщо механічна енергія використовується для виробництва

електроенергії, пристрій може називатися вітротурбіною або вітровою електростанцією. Якщо механічна енергія використовується для приводу механізмів, таких як подрібнення зерна або перекачування води, пристрій називається вітряком або вітровою помпою. Аналогічно, його можна назвати вітровим зарядним пристроєм, коли він використовується для заряджання акумуляторів [19-24].

У проєкті, використовуючи переваги висоти водонапірної башти, вирішено розмістити вітрогенератор на даху резервуара для води, що допоможе зменшити висоту і, отже, вартість вітрогенератора. Крім того, як обговорювалося в попередніх розділах, потужність, необхідна для роботи водяного насоса на висоті 40 м, становить 10,24 кВт, що означає, що вітрогенератор, необхідний для цього проєкту, повинен мати потужність для вироблення дуже невеликої кількості електроенергії, щонайменше 10,24 кВт, що також зменшує розмір і, отже, вартість вітрогенератора, необхідного для цього проєкту.

Розрахунки для вітрової турбіни

Згідно з обговоренням у розділі 2, одна водонапірна вежа може зберігати до 139 кВт·год енергії, використовуючи повний об'єм води. Крім того, вітрова турбіна працює вночі, щоб запустити водяний насос і наповнити резервуар водою. Тому вважається, що вітрова турбіна буде працювати 12 годин на добу. Ця інформація допоможе розрахувати необхідну вихідну потужність вітрової турбіни, як обговорюється нижче.

$$\text{Потужність турбіни} \cdot 12 \text{ год} = 139 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$\therefore \text{Потужність турбіни} = \frac{139 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{12 \text{ год}}$$

Отже, для проєкту потрібна вітрогенераторна установка, здатна виробляти 11,6 кВт електроенергії.

Після аналізу продукції компанії Qingdao Windwings Wind Turbine Co. Ltd., яка є виробником вітрових турбін, було визначено, що модель вітрової

турбіни FZY10KW, яка має потужність 15 кВт, діапазон напруги 220-240 В, змінний струм, частоту 50 Гц [25].

3.8 Вибір водяної турбіни

Турбіна Турго була розроблена в 1919 році Гілкесом як модифікація колеса Пелтона. Колесо Турго має деякі переваги перед конструкціями Френсіса та Пелтона для певних застосувань. По-перше, робоче колесо дешевше у виробництві, ніж колесо Пелтона. По-друге, воно не потребує герметичного корпусу, як у Френсіса. По-третє, вона має вищу питому швидкість і може обробляти більший потік, ніж пелтонове колесо того ж діаметра, що призводить до зниження вартості генератора та установки.

Турбіна Турго — це імпульсна водна турбіна, призначена для застосувань із середнім напором. Ефективність турбін Турго в експлуатації становить близько 85 %. У заводських і лабораторних випробуваннях турбіни Турго демонструють ефективність до 90 %. Вони працюють з чистим напором від 15 до 300 м. Фактична турбіна Турго і генератор, де водяна турбіна і генератор з'єднані між собою, утворюючи єдиний блок. Турго працює в діапазоні напору, де перетинаються турбіни Френсіса і Пелтона. Хоча існує багато великих установок Турго, вони також популярні для малих гідроенергетичних проєктів, де дуже важлива низька вартість.

Як і всі турбіни з соплами, для ефективної роботи необхідно запобігати блокуванню сміттям. Робоче колесо Турго виглядає як робоче колесо Пелтона, розділене навпіл. При однаковій потужності робоче колесо Турго має діаметр, вдвічі менший за діаметр робочого колеса Пелтона, і, отже, вдвічі більшу питому швидкість. Турго може обробляти більший потік води, ніж Пелтон, оскільки вода, що виходить, не заважає сусіднім ковшам [26].

Питома швидкість робочих коліс Турго знаходиться між Франсісом і Пелтоном. Можуть використовуватися одинарні або множинні сопла. Збільшення кількості струменів збільшує питому швидкість робочого колеса на

квадратний корінь кількості струменів (чотири струмені дають удвічі більшу питому швидкість, ніж один струмінь на тій самій турбіні).

Як показано на рисунку 3.2, турбіна Турго є імпульсною турбіною; вода не змінює тиск, проходячи через лопаті турбіни. Потенційна енергія води перетворюється на кінетичну енергію за допомогою сопла. Потік води з високою швидкістю направляється на лопаті турбіни, які відхиляють і змінюють напрямок потоку. Результуючий імпульс обертає робоче колесо турбіни, передаючи енергію валу турбіни, що допомагає генерувати електроенергію потужністю 10 кВт за допомогою генератора. Вода виходить з дуже малою енергією, оскільки робочі колеса Турго є надзвичайно ефективними [26].

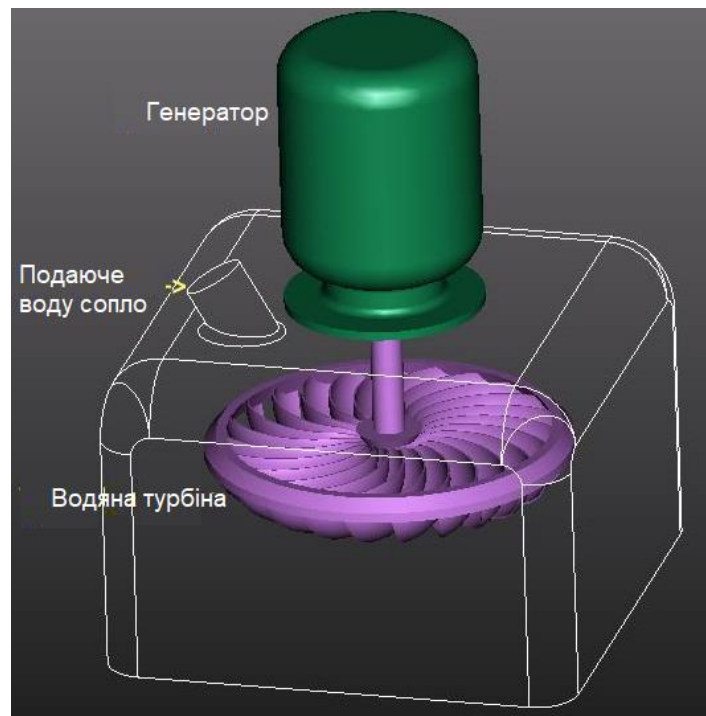


Рисунок 3.2 - Турбіна Турго

У цьому проєкті швидкість вхідного потоку води становить $0,022 \text{ м}^3/\text{сек}$, а чистий напір — 40 м, тому турбіна Турго і генератор можуть генерувати близько 7-8 кВт електроенергії [27]. Ця невелика втрата потужності пояснюється ефективністю турбіни, яка становить 85%. Після аналізу вартості генераторних установок, обрано установку T30-10SCT4/-Z компанії Suzhou Yueniao Machinery and Electronics Imp and Exp Company Limited, яка є

виробником турбін і генераторних установок для таких гідроенергетичних енергоакумуляторів. Цей агрегат також включає регулювальний клапан і електронний контролер навантаження для регулювання вихідної напруги та частоти.

3.9 Автоматичний контролер електроживлення

У проєкті передбачається, що вітрогенератор працює протягом 12 годин вночі, запускаючи водяний насос для наповнення резервуара. Протягом наступних 12 годин (вдень) електроживлення вітрогенератора відключається, і мережа буде постачати енергію для роботи водяного насоса, коли це необхідно. Вважається, що вдень для виробництва електроенергії використовується лише половина об'єму води. Тому, щоб відновити цю кількість води в резервуарі, мережа буде постачати енергію для роботи насоса протягом 6 годин тільки зі швидкістю $0,026 \text{ м}^3/\text{сек}$ протягом денного періоду. Для підтримки цієї автоматичної взаємодії між двома різними джерелами живлення (вітрогенератором і мережею) відповідно до заданих термінів, необхідно використовувати мікрокомп'ютерний таймер-перемикач автоматичного контролера живлення, який підтримує цю плавну взаємодію між джерелом живлення від вітрогенератора і мережею.

Тому обрано модель перемикача KG316T з технічними характеристиками 220 В, 50 Гц, яка повністю відповідає вхідним параметрам двигуна змінного струму, що використовується для роботи водяного насоса. Таким чином, нам потрібно два таких перемикача, один для управління виходом вітрової турбіни, а інший для виходу електромережі, як показано на рисунку 2.2.

3.10 Результати розрахунків

Підсумок результатів наведено в таблиці 3.2. Таблиця результатів починається з проєктних значень водонапірної башти, далі йдуть показники

енергозбереження та потужності генерації однієї водонапірної башти, а також потужності генерації башт у штаті Міссурі та США, після чого наведено короткий підсумок інших показників водосховища, таких як об'єм та витрати.

Таблиця 3.2 - Таблиця результатів

Показник:	Результати:
Висота водонапірної башти h_p	40 м
Висота рівня води в резервуарі h_s	10 м
Площа резервуара для води	113 м ²
Ємність однієї водонапірної вежі	69,5 кВт·год
Потужність однієї водонапірної вежі	10 кВт
Об'єм резервуара	1130 м ³
Кількість людей, яких обслуговує водонапірна башта	1500 осіб
Швидкість потоку води, що використовується для наповнення резервуара	0,026 м ³ /сек
Швидкість потоку води, що використовується для генерування електроенергії	0,022 м ³ /сек
Витрата води, що використовується для комунальних потреб	0,013 м ³ /сек
Потужність, необхідна для насоса	10,24 кВт
Обрана вітротурбіна	FZY10KW
Обраний гідроагрегат	T30-10SCT4/-Z

3.11 Висновки до розділу

1. На основі аналізу стандартних проектних характеристик міської водонапірної башти (висота 40 м, площа резервуара 113 м²) розраховано загальний об'єм резервуара, який становить 1130 м³. Для забезпечення стабільної роботи системи об'єм води розподілено на дві рівні частини: 565 м³ — для виробництва електроенергії та 565 м³ — для комунального водопостачання.

2. Розраховано гідравлічні параметри системи: витрата води для виробництва електроенергії становить $0,022 \text{ м}^3/\text{с}$ (при викачуванні протягом 7 годин), витрата води для комунальних потреб — $0,013 \text{ м}^3/\text{с}$ (протягом 12 годин), а витрата на заповнення резервуара — $0,026 \text{ м}^3/\text{с}$ (нічне заповнення протягом 12 годин). Визначено, що одна водонапірна башта може забезпечувати водопостачанням 1500 осіб при середньодобовому споживанні $0,38 \text{ м}^3$ води на одну особу.

3. Визначено потужність, необхідну для роботи водяного насоса, який здійснює підйом води на висоту 40 м. Розрахункове значення становить 10,24 кВт.

4. Проведено розрахунок необхідної вихідної потужності вітрової турбіни, яка має забезпечувати роботу насосної установки в нічний період (12 годин). Розрахункова потужність становить 11,6 кВт. На підставі цього обрано модель вітрогенератора FZY10KW виробництва Qingdao Windwings Wind Turbine Co. Ltd. номінальною потужністю 15 кВт, діапазоном напруги 220–240 В та частотою 50 Гц.

5. Для перетворення потенційної енергії води в електричну енергію обрано гідроагрегат на базі турбіни Турго моделі T30-10SCT4/-Z.

6. Для забезпечення автоматичного керування режимами роботи системи обрано мікрокомп'ютерний таймер-перемикач KG316T (220 В, 50 Гц), який забезпечує плавне перемикання між живленням від вітрогенератора та електричною мережею.

7. Таким чином, результати розрахунків третього розділу підтверджують технічну можливість реалізації гідроакumuлюючої системи на базі існуючих водонапірних башт. Запропонована система дозволяє акумулювати електричну енергію у вигляді потенційної енергії води, підвищуючи стабільність та передбачуваність роботи вітроенергетичної установки. Ключові технічні параметри системи зведено в таблицю результатів, яка демонструє її працездатність.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самопомога) [28]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою

або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15—20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрожувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання

потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

4.2 Зонування територій за ступенем небезпеки

З метою диференційованого підходу до планування запобіжних заходів здійснюється зонування територій країни, регіонів, міст і населених пунктів за територіями природного і техногенного ризиків.

Територія міста з урахуванням переважного функціонального призначення поділяється на селітебну, виробничу і ландшафтно-рекреаційну.

Селітебна територія має таке призначення: розміщення житлового фонду, громадських будівель і споруд (в т.ч. науково-дослідних комплексів), а також окремих комунальних і промислових об'єктів, які не вимагають утворення санітарно-захисних зон; будівництво шляхів міського сполучення, вулиць, площ, парків, бульварів та інших місць загального користування.

Виробничу територію призначено для розміщення промислових підприємств і пов'язаних з ними об'єктів, комплексів наукових установ з дослідними виробництвами, комунально-складських об'єктів, споруд зовнішнього та приміського транспорту.

Ландшафтно-рекреаційна територія включає міські ліси, лісопарки, лісозахисні зони, водойми, сільськогосподарські угіддя, які разом з парками і скверами селітебної території формують систему відкритого простору. Крім того, на територіях виділяються небезпечні зони.

Зона можливого небезпечного землетрусу – територія, в межах якої інтенсивність сейсмічного впливу становить сім і більше балів (визначається за

картами сейсмічного районування відповідно до ДБН).

Зона вірогідного затоплення – територія, межі якої можуть бути вкриті водою внаслідок стихійного лиха або руйнування гідротехнічних споруд.

Зона вірогідного катастрофічного затоплення – територія, на якій можлива загибель людей, сільськогосподарських тварин і рослин пошкодження або знищення матеріальних цінностей (в першу чергу будівель і споруд), а також збитки навколишньому середовищу.

Зона можливих небезпечних геологічних явищ – територія, у межах якої передбачається виникнення небезпечних геологічних явищ, що становлять загрозу життю і здоров'ю людей, завдають збитків економіці.

Зона можливого радіоактивного забруднення – територія або акваторія, на якій є можливим забруднення поверхні ґрунту, будівель і споруд, атмосфери, води. продуктів харчування радіоактивними речовинами, яке може викликати перевищення нижнього критичного значення доз опромінення населення.

Зона можливого хімічного зараження – територія. В межах якої внаслідок пошкодження або руйнування ємностей з хімічно небезпечними речовинами можливий викид в довкілля цих речовин в концентраціях або кількостях, які становлять загрозу для людей , тварин і рослин впродовж певного періоду.

Зона можливих руйнувань – територія міст. Інших населених пунктів і ОГ, на якій можливе виникнення надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі, який складає 30 кПа і більше, а також сейсмічний вплив, що спричиняє руйнування будівель, споруд, комунікацій.

Зона можливого утворення завалів – частина зони можливих руйнувань, яка включає ділянки розташування будівель і споруд з прилеглою до них місцевістю, де слід очікувати обвалення будівельних конструкцій та утворення завалів.

Позаміська зона – територія, розташована за межами зон можливих руйнувань, можливого радіоактивного та хімічного забруднення, вірогідного кас трофічного затоплення, і може бути використана для евакуації населення.

Можливе часткове або повне накладання двох і більше зон можливої небезпеки. На такі території запобіжні заходи проводяться від усіх видів небезпек відповідно до накладених зон.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра на тему «Аналіз можливості використання гідроакumuлюючої системи для вітроенергетичної установки» проведено аналіз можливості модернізації існуючих водонапірних башт України для створення систем накопичення енергії з метою підвищення стабільності роботи вітроенергетичних установок. На підставі виконаного аналізу, проектування та розрахунків можна зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Проведено аналітичний огляд сучасних технологій зберігання електричної енергії, виробленої вітроенергетичними установками. Досліджено технології короткочасного зберігання (маховики, суперконденсатори, магнітні надпровідники) та довгострокового зберігання (акумулятори, стиснене повітря, водневі паливні елементи, теплове зберігання, гідроакumuлювання).

2. Встановлено, що на території України функціонує близько 2100 водонапірних башт із сумарним об'ємом ~ 833 тис. м^3 . Визначено основні типи башт: металеві башти Рожновського (ВБР) об'ємом 15–160 м^3 та міські залізобетонні башти об'ємом 200–2000 м^3 .

3. Розроблено конструкцію системи зберігання енергії на базі водонапірної башти, яка передбачає розподіл об'єму резервуара на дві функціональні зони: робочу зону рівня h_r для підтримання необхідного тиску водопостачання та зону накопичення h_s для зберігання електричної енергії. Запропонована концепція дозволяє використовувати існуючу інфраструктуру водопостачання без її повної модернізації, забезпечуючи подвійне функціональне призначення водонапірної башти.

4. Виконано технічний розрахунок ємності системи для стандартної міської водонапірної башти. Визначено, що енергоємність повного об'єму становить 139 кВт·год, а фактична ємність зберігання (половина об'єму) — 69,5 кВт·год. Потужність системи при розрядженні протягом 7 годин становить 10 кВт для однієї башти.

5. Виконано розрахунок гідравлічних параметрів системи: загальний об'єм резервуара — 1130 м³; витрата води для виробництва електроенергії — 0,022 м³/с; витрата води для комунальних потреб — 0,013 м³/с; витрата води на заповнення резервуара — 0,026 м³/с. Потужність, необхідна для роботи водяного насоса при підйомі води на висоту 40 м, становить 10,24 кВт.

6. Проведено розрахунок необхідної вихідної потужності вітрової турбіни, яка має забезпечувати роботу насосної установки. Розрахункова потужність становить 11,6 кВт. Обрано модель вітрогенератора FZY10KW номінальною потужністю 15 кВт. Для перетворення потенційної енергії води в електричну енергію обрано гідроагрегат T30-10SCT4/-Z.

7. Запропоновано встановлення вітрогенератора на вершині водонапірної башти або поруч з нею, що дозволяє створити повністю автономний енергетичний комплекс з відновлюваного джерела. Це забезпечує подвійне використання башти: як опору для вітрогенератора та як резервуар для накопичення енергії.

8. Запропонована система гідроакумулювання на базі водонапірної башти є технічно реалізованою та екологічно чистою. Вона дозволяє ефективно вирішувати проблему переривчастості вітрової енергії, підвищувати стабільність електропостачання та створювати основу для розвитку локальних мікромереж з відновлюваних джерел енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.
3. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
4. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204.
5. Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції

"Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 11-12.

6. Коваль В. П., Зінь П. М. Підвищення енергоефективності низьконапірних мікрогес невеликої потужності з трубними осьовими гідротурбінами // Тези XIII МНПК „Актуальні задачі сучасних технологій“, Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року. 2024. С. 285–286.
7. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336
8. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval, Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.
9. Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., Ortjohann, E., Schultze, E., Tuckey, A., & Zimmermann, J. (2007, April). Increasing renewable energy penetration in isolated grids using a flywheel energy storage system. In 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (pp. 195-200). IEEE.
10. Zhai, N. S., Yao, Y. Y., Zhang, D. I., & Xu, D. G. (2006, October). Design and optimization for a supercapacitor application system. In 2006 International Conference on Power System Technology (pp. 1-4). IEEE.
11. Hsu, C. S., & Lee, W. J. (1992, May). Superconducting magnetic energy storage for power systems application. In 1992 IEEE Conference Record of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (pp.

- 28-34). IEEE.
12. International Energy Agency. (2005). Variability of wind power and other renewables: management options and strategies. International Energy Agency.
 13. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій"*, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.
 14. Wald, M. L. (2010). Wind drives growing use of batteries. *New York Times*. Published 28th July.
 15. Al-Badi, A. H., Yousef, H., AlAamri, O., AlAbdusalam, M., AlShidi, Y., & AlHarthy, N. (2014, May). Performance of a stand-alone renewable energy system based on hydrogen energy storage. In 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP) (pp. 356-359). IEEE.
 16. LACAL, A. R., FITZGERALD, N., & LEAHY, P. (2012). Pumped-hydro energy storage: Potential for transformation from single dams.
 17. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакumuлюючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль / *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.*
 18. Schuh, J. K. (2023, March). Utilizing water towers for pumped storage hydropower. In 2023 IEEE Power and Energy Conference at Illinois

- (PESCI) (pp. 1-7). IEEE.
19. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .
 20. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.
 21. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214.
 22. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.
 23. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.
 24. Orobchuk V. Development and research of Wi-Fi network for receiving

- and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern.: TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
25. Du Plooy, J. P. (2015). *Development of a converter-fed reluctance synchronous generator wind turbine controller* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
26. Benzon, D. S., Aggidis, G. A., & Anagnostopoulos, J. S. (2016). Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present. *Applied Energy*, 166, 1-18.
27. Nasir, B. A. (2013). Design of micro-hydro-electric power station. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2(5), 39-47.
28. 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.