МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1454
спеціальності 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика»

освітньої програми Гідроенергетика

Масловець В.С.

Керівник к.т.н., доцент Радченко В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф. Саблін О.І.

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика»
(код та назва)
Освітня програма Гідроенергетика
(назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
«____» _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
(прізвище, ім'я, по батьков)

1. Тема роботи (проекту) «Дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України»
керівник роботи Радченко В.В., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «27» лютого 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи «03» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити 1. Теоретичні основи та аналіз сучасного стану гідроенергетики 2. Методика дослідження роботи гідроелектростанції. 3. Дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України 4. Моделювання роботи гідроелектростанції.
5. Перелік графічного матеріалу
презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Радченко В.В., доц., к.т.н.		
2	Радченко В.В., доц., к.т.н.		
3	Радченко В.В., доц., к.т.н.		
4	Радченко В.В., доц., к.т.н.		

7. Дата видачі завдання 23.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи та аналіз сучасного стану гідроенергетики	30.09.2025	
2	Методика дослідження роботи гідроелектростанції	15.10.2025	
3	Дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10МВт в умовах водотоків малих річок України	13.11.2025	
4	Моделювання роботи гідроелектростанції	28.11.2025	

Студент _____ (підпис) В.С. Масловець (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка 79 с., 6 рис., 22 табл., 30 літературних джерел.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню режимів роботи та оцінці ефективності використання гідроенергетичного потенціалу малих річок.

Основна мета дослідження – дослідити режими роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України з використанням технології подвійного живлення.

У першому розділі проаналізована наукова та технологічна література останніх досягнень у сфері гідроенергетики малих річок, стан сучасної гідроенергетики на даний час, світові та вітчизняні тенденції розвитку галузі, а також перспективи малої гідроенергетики в Україні.

У другому розділі розглянуто методичні підходи до оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок, зокрема визначення загального, технічного, екологічного та економічно обґрунтованого потенціалів. Наведено алгоритм прогнозування гідроресурсів та методи розрахунку основних технічних параметрів гідроелектростанції

У третьому розділі проведено дослідження гідрологічних характеристик річки Південний Буг, виконано розрахунок гідроенергетичного потенціалу для шести створів та визначено найбільш ефективну ділянку. Здійснено розрахунок параметрів електрообладнання ГЕС на базі машини подвійного живлення та оцінено ефективність її роботи в умовах змінного стоку

В четвертому розділі була розроблена математична модель роботи гідротурбіни. Матеріал, викладений у цьому розділі, слугує теоретичною основою для математичного моделювання електромеханічних систем гідроакумулювальних електростанцій. Також проведено моделювання і дослідження режимів роботи електромеханічної системи гідроакумулювальної електростанції з використанням технології подвійного живлення.

Результатом роботи є обґрунтування техніко-економічної доцільності використання асинхронізованих машин подвійного живлення на малих ГЕС річки Південний Буг та розроблена імітаційна модель, яка підтверджує стійкість системи та можливість ефективного регулювання потужності в підсинхронному і надсинхронному режимах

ГІДРОЕНЕРГЕТИКА ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ ПОТУЖНІСТЬ МАЛІ РІЧКИ ТУРБІНА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ABSTRACT

The explanatory note comprises 79 pages, 6 figures, 22 tables, and 30 references. The master's qualification thesis is devoted to the study of operating modes and the assessment of the efficiency of utilizing the hydropower potential of small rivers.

The main objective of the research is to investigate the operating modes of a 10 MW hydropower plant under the conditions of small rivers in Ukraine using doubly fed technology.

The first chapter analyzes scientific and technological literature on recent achievements in small river hydropower, the current state of modern hydropower, global and domestic development trends, and prospects for small hydropower in Ukraine. The second chapter presents methodological approaches to assessing the hydropower potential of small rivers, including the determination of total, technical, ecological, and economically feasible potentials. An algorithm for forecasting water resources and methods for calculating the main technical parameters of a hydropower plant are provided. The third chapter investigates the hydrological characteristics of the Southern Bug River, calculates the hydropower potential for six sites, and identifies the most efficient section. The parameters of the hydropower plant electrical equipment based on a doubly fed machine are determined, and its performance under variable flow conditions is evaluated. The fourth chapter develops a mathematical model of hydroturbine operation and investigates the operating modes of a pumped-storage system.

The results substantiate the technical and economic feasibility of using doubly fed asynchronous machines at small hydropower plants on the Southern Bug River and present a simulation model that confirms system stability and the possibility of efficient power regulation.

HYDROPOWER, HYDROPOWER PLANT, POWER CAPACITY, SMALL RIVERS, TURBINE, ENERGY EFFICIENCY, PUMPED-STORAGE HYDROPOWER.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ 12
1.1 Стан сучасної гідроенергетики: світові та вітчизняні тенденції розвитку 12
1.2 Перспективи малої гідроенергетики в Україні 17
1.3 Особливості гідроенергетики малих річок 23
1.4 Висновки до розділу 1 30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ 32
2.1. Методичні підходи до оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок 32
2.2. Методи розрахунку параметрів гідроелектростанції 40
2.3. Висновки до розділу 2 47
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 10 МВт В УМОВАХ ВОДОТОКІВ МАЛИХ РІЧОК УКРАЇНИ 48
3.1. Характеристика вибраної річки та умов її водотоку 48
3.2. Розрахунок гідроенергетичного потенціалу річки 52
3.3 Розрахунок параметрів електрообладнання ГЕС на базі машини подвійного живлення 55
3.4. Оцінка ефективності роботи ГЕС 58
3.5. Висновки до розділу 3 59
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ 60
4.1. Математична модель роботи гідротурбіни 60
4.2 Аналіз результатів моделювання 63
4.3. Висновки до розділу 4 73
ВИСНОВКИ 74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 76

ВСТУП

Актуальність роботи. В умовах глобальних кліматичних змін та виснаження викопних видів палива світ переходить до стратегії сталого розвитку, що базується на відновлюваних джерелах енергії. Для України це питання набуло критичного значення не лише через екологічні зобов'язання перед європейською спільнотою, але й через гостру потребу в забезпеченні енергетичної незалежності та безпеки. Внаслідок руйнування об'єктів критичної інфраструктури та централізованої генерації виникає нагальна потреба у децентралізації енергосистеми. Розвиток розподіленої генерації, зокрема малої гідроенергетики, дозволяє підвищити стійкість об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, забезпечити живлення локальних споживачів в умовах блекаутів та зменшити втрати при транспортуванні електроенергії.

Україна володіє значним невикористаним гідроенергетичним потенціалом малих річок, який оцінюється у 12,5 млрд кВт·год/рік. На відміну від великих ГЕС, малі станції не потребують створення масштабних водосховищ, що мінімізує їхній вплив на довкілля та соціальну сферу. Однак на сьогодні технічно досяжний потенціал використовується лише частково. Для дипломного проєкту обрано річку Південний Буг, яка є стратегічно важливою артерією для гідроенергетики рівнинної частини України. Її технічний потенціал і коефіцієнт використання гідроенергетичного ресурсу є одними із найвищих у регіоні. Це створює надійну базу для впровадження нових генеруючих потужностей.

Однією з головних проблем малої гідроенергетики на рівнинних річках є значна сезонна нерівномірність стоку та коливання напору води. Традиційні синхронні гідрогенератори, що жорстко прив'язані до частоти мережі (50 Гц), в таких умовах працюють неефективно, оскільки не можуть змінювати швидкість обертання турбіни для підтримки максимального ККД. Це призводить до недовиробітку електроенергії та пришвидшеного зносу обладнання.

Вирішенням цієї проблеми є використання асинхронізованих машин подвійного живлення (МПЖ). Ця технологія дозволяє гідроагрегату працювати зі змінною частотою обертання що забезпечує:

– максимальний відбір потужності турбіни при змінних напорах і витратах води;

– можливість активного керування потоками реактивної потужності, що стабілізує напругу в місцевій мережі;

– зниження вартості силової електроніки, оскільки перетворювач частоти розраховується лише на частину потужності (потужність ковзання), а не на повну потужність генератора.

Таким чином, актуальність роботи зумовлена необхідністю науково-технічного обґрунтування та впровадження високоефективних електромеханічних систем на базі машин подвійного живлення для раціонального освоєння гідропотенціалу річки Південний Буг, що сприятиме підвищенню енергоефективності та надійності енергопостачання регіону.

Метою роботи є дослідження режимів роботи та підвищення ефективності гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України з використанням технології подвійного живлення.

Об’єкт дослідження – електромеханічні процеси перетворення енергії в гідроагрегатах малих гідроелектростанцій.

Предмет дослідження – режими роботи та системи керування гідроагрегатом на базі машини подвійного живлення в умовах гідрологічного режиму річки Південний Буг.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні та світі.

2. Виконати оцінку гідроенергетичного потенціалу річки Південний Буг та обґрунтувати вибір найбільш ефективної ділянки для розміщення ГЕС .

3. Розрахувати параметри основного електрообладнання ГЕС, зокрема асинхронізованого генератора (машини подвійного живлення) та перетворювача частоти.

4. Розробити математичну модель та провести дослідження режимів роботи електромеханічної системи ГЕС у середовищі моделювання (PLECS) .

Методи досліджень. У процесі дослідження використовуються методи теоретичного аналізу, статистичної обробки даних (для розрахунку гідрологічних характеристик річки), математичного моделювання та комп'ютерного моделювання (в середовищі PLECS для дослідження динамічних режимів роботи машини подвійного живлення.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у наступному:

1. Уточнено оцінку технічного гідроенергетичного потенціалу річки Південний Буг на основі методу сумарного поділянкового обліку з урахуванням сучасних гідрологічних даних.

2. Набула подальшого розвитку математична модель електромеханічної системи з машиною подвійного живлення, що дозволяє досліджувати роботу станції як у підсинхронному, так і в надсинхронному режимах при змінному навантаженні.

3. Обґрунтовано ефективність використання перетворювача частоти неповної потужності (на потужність ковзання) для регулювання гідроагрегатів на малих річках України.

Практичне значення. Отримані результати та розроблена модель можуть бути використані при проєктуванні нових та модернізації існуючих малих ГЕС на рівнинних річках України. Запропоноване технічне рішення щодо використання машини подвійного живлення дозволяє знизити вартість силового обладнання (зменшення потужності перетворювача) та забезпечити стабільну генерацію електроенергії зі змінною швидкістю обертання турбіни, що підвищує загальну ефективність використання гідроресурсу річки Південний Буг .

Особистий внесок. Автором самостійно проведено аналіз гідрологічних

даних річки Південний Буг, визначено найбільш енергоефективну ділянку русла, виконано розрахунок параметрів генератора та перетворювача, а також розроблено імітаційну модель системи керування ГЕС у середовищі PLECS та проаналізовано перехідні процеси.

Апробація результатів. Основні результати дослідження були представлені на науково-технічних конференціях кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем, а також перевірені шляхом комп’ютерного моделювання.

Структура магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 30 найменувань і вміщує 75 сторінки основного тексту, 6 рисунків, 22 таблиці, усього 79 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Стан сучасної гідроенергетики: світові та вітчизняні тенденції розвитку

У сучасних умовах глобального потепління, виснаження традиційних енергетичних ресурсів та забруднення навколишнього середовища дедалі більшої актуальності набуває розвиток відновлюваної енергетики. Одним з провідних її напрямів є гідроенергетика – екологічно чисте та відновлюване джерело енергії, що вже сьогодні забезпечує значну частину енергетичного балансу багатьох країн, зокрема України. Частка відновлюваних джерел енергії в загальному енергозабезпеченні України складає лише біля 3%, а електрозабезпеченні – 6%, переважно за рахунок великої гідроенергетики, потенціал якої практично вже використаний [3]. Особливої уваги потребує використання потенціалу малої гідроенергетики.

Гідроенергетика – це один із видів відновлюваної енергетики, в основі якого лежить використання енергії води, що накопичується в греблях або тече в руслах річок, для виробництва електроенергії на гідроелектростанціях. Вона відіграє важливу роль у переході до сталого розвитку, сприяє підвищенню енергоефективності, забезпеченню енергетичної безпеки та зменшенню викидів вуглецю. Використання гідроенергії відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки, адже дозволяє значно скоротити обсяг викидів вуглекислого газу в атмосферу. Це відкриває значний потенціал для збільшення частки екологічно чистої енергії, особливо в умовах посилення міжнародного тиску щодо боротьби зі змінами клімату. Окрім того, розвиток гідроенергетики позитивно впливає на національну промисловість, стимулюючи її модернізацію та зростання.

На сучасному етапі гідроенергетика активно розвивається, особливо шляхом будівництва великих гідроелектростанцій із багатофункціональними водосховищами. Такий розвиток спостерігається у багатьох країнах світу і пов'язаний із необхідністю задовольнити зростаючі потреби в електроенергії,

воді для побуту, промисловості та сільського господарства, а також забезпечити захист від паводків.

У структурі енергетики гідроелектростанції відіграють важливу роль як гнучкі, маневрені потужності, які ефективно доповнюють великі базові станції – теплові (ТЕС) та атомні (АЕС). З 1950 до 2000 року світове виробництво електроенергії зросло в 14 разів і сягнуло 14 100 млрд кВт·год, із яких гідроенергетика забезпечила 2650 млрд кВт·год, або приблизно 19% від загального обсягу. За той же період споживання водних ресурсів у світі зросло більш ніж у п’ять разів – до 6000 км³.

Переважна більшість існуючих гідроелектростанцій в Україні є енергетичними установками великої потужності з власними водосховищами, розташованими в основному руслі річок Дніпро і Дністер. Деякі станції використовують свої водосховища в комплексі з гідроакумулюючими станціями (ГАЕС).

В Україні велика частка гідроелектростанцій припадає саме на малі ГЕС, потужність яких не перевищує 10 МВт. До них також відносять міні-ГЕС (100–1000 кВт) та мікро-ГЕС (до 100 кВт) – згідно з міжнародною класифікацією. Залежно від того, як використовуються водні ресурси та формується напір, гідроелектростанції поділяються на такі типи: руслові, пригреблеві, деривaційні, гідроакумулюючі та припливні.

Розвинені країни широко використовують гідроенергетику, що зумовлено значними перевагами гідроелектростанцій, такими як екологічність, надійність, довговічність і здатність швидко реагувати на зміну енергетичного навантаження. На даний час найбільшими виробниками гідроенергії, включно з гідроакумулюючими станціями (ГАЕС) в абсолютних значеннях є Китай, Канада, Бразилія та США.

У зв’язку з введенням в об’єднаних енергосистемах великих базисних ТЕС та АЕС різко зросла роль у забезпеченні надійного енергопостачання високоманеврених ГЕС та ГАЕС, що покривають пікову частину графіка навантажень і виконують функції аварійного та навантажуючого резервів

енергосистеми. Це спричинило також широке будівництво ГАЕС у світі, потужність яких до 2000 р. досягла 125 млн. кВт, у тому числі у Японії – 24 млн. кВт, у США – 18,9 млн. кВт, в Італії – 6,9 млн. кВт, у Франції – 5,9 млн. кВт, у Німеччині – 5,7 млн. кВт. Найбільші ГАЕС, що експлуатуються: у США Бас Каунтрі – потужністю 2.1 млн. кВт, Корнуол (I і II) – 2,2 млн. кВт, Ладингтон – 2,06 млн. кВт; в Англії Дінорвік – 1,8 млн. кВт, у Франції Гранд Мезон – 1,8 млн. кВт. Введені в експлуатацію перші агрегати на найбільших ГАЕС, що будуються: Kannagawa (2,82 млн. кВт) – в Японії, Huizhou (2,4 млн. кВт) – у Китаї, Дністровської (2,28 млн. кВт) – в Україні.

Однак у розвинених країнах вже освоєно більшу частину економічно доцільного гідропотенціалу, зокрема в Європі це 75 %, у Північній Америці – близько 70 %, і можливості для будівництва великих гідроелектростаній (ГЕС) практично вичерпані. У той же час Африка (21 % світових гідроенергетичних ресурсів) та Азія (39 %) вносять у світовий виробіток гідроелектроенергії лише 5 і 18 %, відповідно. Південна Америка і Австралія разом узяті, маючи приблизно 15 % ресурсів, дають лише 11 % виробленої у світі гідроелектроенергії. Тож можна прогнозувати, що нові великі ГЕС будуватимуть в основному в Африці, Азії та Південній Америці, бо на інших континентах вони вже побудовані [3].

На 2008 р. у світі потужність ГЕС досягла 887 млн. кВт, а вироблення – 3050 млрд. кВт·год, у Китаї потужність ГЕС склала 171 млн. кВт, вироблення – 684 млрд. кВт·год, і він вийшов на перше місце у світі, у США відповідно – 78,2 млн. кВт та 270 млрд. кВт·год, у Канаді – 72,7 млн. кВт та 350 млрд. кВт·год.

Величезний набутий досвід послужить подальшому розвитку гідроенергетики у XXI столітті.

Величезний набутий досвід послужить подальшому розвитку гідроенергетики у XXI столітті, зокрема в напрямі розширення малої гідроенергетики, яка набуває дедалі більшого значення в контексті децентралізації енергопостачання, розвитку регіонів та використання локальних водних ресурсів.

Мала гідроенергетика – це використання енергії невеликих річок і потоків для вироблення електроенергії на гідроелектростанціях потужністю, як правило, до 10 МВт. Вона є важливим елементом сталого енергетичного розвитку, оскільки поєднує в собі екологічність, економічну доцільність та енергетичну незалежність для окремих територій.

Серед малих ГЕС найпоширенішими є:

– руслові та пригреблеві, які працюють за рахунок створеного напору води (перепаду рівнів);

– деривaційні, що використовують кінетичну енергію води без будівництва гребель.

Найтиповішими проектами, які реалізовуються в Україні, є малі ГЕС з греблями, загатами або деривaційними водоводами. Такі об’єкти можуть працювати як із водосховищем, так і без нього. Основна ідея – не споживати воду як ресурс, а використовувати її гравітаційну або кінетичну енергію.

З екологічної та економічної точок зору використання малих ГЕС є доцільним. Вони дозволяють зменшити споживання викопного палива (газу, нафти, вугілля), знизити викиди парникових газів і покращити енергетичну безпеку, особливо у віддалених регіонах. До основних переваг малих ГЕС належать:

– використання чистої, відновлюваної енергії води;

– підвищення енергонезалежності окремих територій;

– низька собівартість виробленої електроенергії;

– відсутність забруднення повітря;

– висока гнучкість і здатність швидко реагувати на зміну навантаження.

Однак малі ГЕС мають і певні недоліки, пов’язані з екологічним впливом. Серед основних проблем:

– шкода для рибного світу через відсутність або неефективність рибоходів;

– зменшення водності річок і пересихання окремих ділянок;

– підвищений ризик паводків;

– замулення водосховищ;

– можливе забруднення навколишньої території;

– погіршення природного вигляду через наявність деривaційних каналів.

Таким чином, розвиток малої гідроенергетики потребує зваженого підходу – із врахуванням як її переваг, так і потенційних екологічних ризиків.

У більшості розвинених країн мала гідроенергетика вже добре освоєна. У Європейському Союзі (ЄС) на поточний час в експлуатації перебуває понад 800 ГВт гідроенергетичних потужностей з річним обсягом виробництва електроенергії близько 7080 ТВт·год. За оцінкою Міжнародного енергетичного агентства, 5 % світового потенціалу гідроенергетики реалізуються через МГЕС1.

Серед країн провідне місце посів Китай (47 ГВт), друге – Японія (4 ГВт), третє – США (3,4 ГВт). На початок 2009 року сумарна потужність МГЕС зросла до 85 ГВт, лідером залишився Китай (51 ГВт). У першу п’ятірку увійшли Японія (3,3 ГВт), США (3 ГВт), Італія (2,6 ГВт), Бразилія (1,8 ГВт), Німеччина (1,4 ГВт).

Країни, що розвиваються, також активно впроваджують малу гідроенергетику. Китай є світовим лідером у цій галузі: тут на малі ГЕС припадає близько 35 млн кВт потужності, що дозволяє виробляти 110 млрд. кВт·год електроенергії щорічно. У країні триває активне будівництво нових станцій.

В Індії потенціал малої гідроенергетики оцінюється у 15 млн кВт. Тут уже працює понад 400 станцій загальною потужністю більше 0,5 млн кВт, і планується звести ще понад 4000 малих ГЕС. У Бразилії вже працюють малі ГЕС сумарною потужністю понад 1,9 млн. кВт, у процесі будівництва – ще 1 млн кВт, а в перспективі – ще майже 7 млн кВт [3].

1.2 Перспективи малої гідроенергетики в Україні

Україна має потужні ресурси гідроенергії малих рік. Загальний гідроенергетичний потенціал малих рік України становить близько 12,5 млрд. кВт-год., що складає близько 28% загального гідропотенціалу всіх рік України. У найближчій перспективі планується збудувати кілька сотень малих ГЕС у Закарпатській області, у Івано-Франківській області, за різними даними, планується будівництво від півсотні до півтори сотні малих ГЕС, до двох десятків заплановано у Львівській та Чернівецькій областях.

В Україні сумарна потужність малих ГЕС, які наразі експлуатуються, перевищує 100 МВт. Проте понад 100 об'єктів потребують реконструкції або повторного введення в експлуатацію. Деякі малі ГЕС збудовані на річці Південний Буг, зокрема – поблизу міста Ладижин на Вінниччині.

Річний гідроенергетичний потенціал малих річок за областями України наведений на рисунку 1.1.

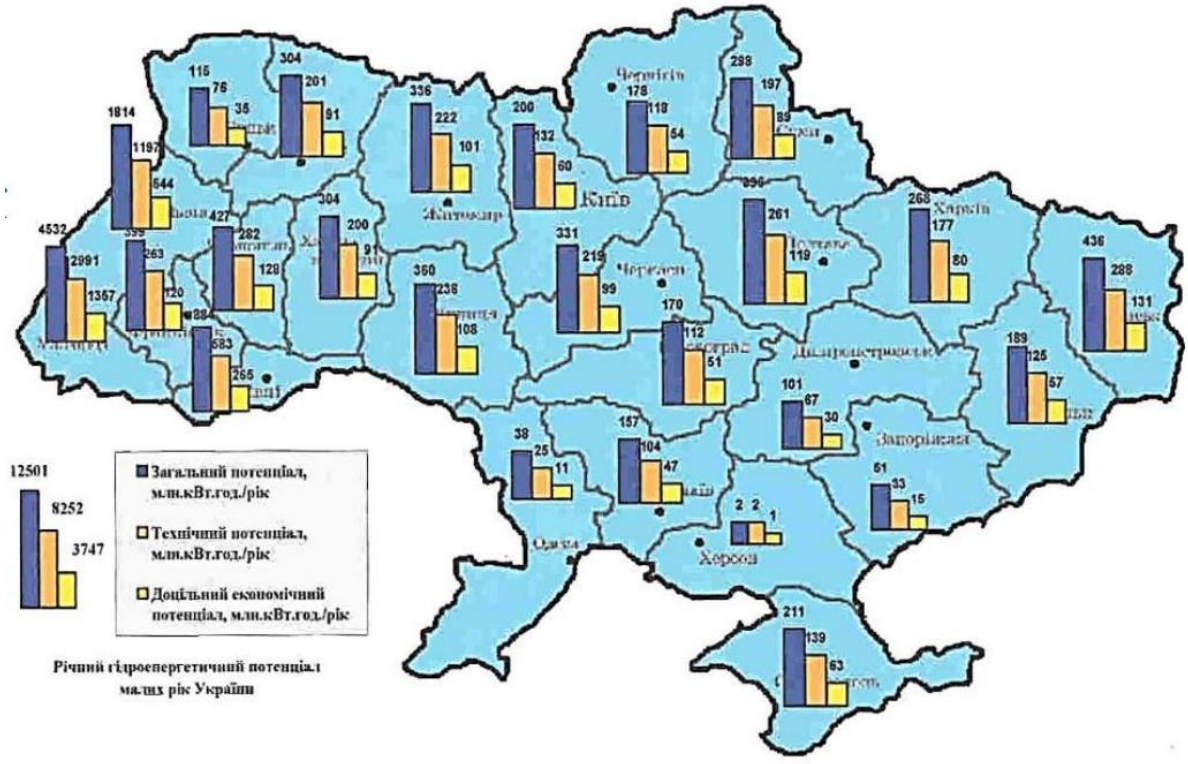


Рисунок 1.1 – Річний гідроенергетичний потенціал малих річок за областями України [5]

В таблиці 1.1 наведені задні про гідроенергетичний потенціал малих річок України.

Таблиця 1.1 – Гідроенергетичний потенціал малих річок України

Загальний потенціал		Технічний потенціал		Доцільно економічний потенціал	
млрд. кВт*год/рік	млн. т у.п./рік	млрд. кВт*год/рік	млн. т у.п./рік	млрд. кВт*год/рік	млн. т у.п./рік
12,5	4,5	8,3	3,0	3,7	1,3

Загальний гідроенергетичний потенціал малих рік Карпатського регіону (Закарпатська, Чернівецька, Івано-Франківська та Львівська області) складає 7628,7 млн. кВт-год/рік (таблиця 2.1), або 61 % загального. Найбільший гідроенергетичний потенціал малих рік України зосереджено у Закарпатській області (36 % загального).

Останнім часом деякими науковцями були проведені дослідження щодо визначення технічного гідроенергетичного потенціалу малих річок України, зокрема, у 2015 році в Інституті відновлювальної енергетики НАНУ буда виконана дисертаційна робота Мороз А.В. «Технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок України» [3], в якій було зроблено спробу визначити цей технічний потенціал за екологічних та природоохоронних обмежень, що ґрунтуються на критеріях екологічної цінності території та на принципах збереження навколишнього середовища і різноманіття іхтіофауни річок. Обґрунтовано та формульовано кількісні показники використання стоку річки для виробництва електроенергії в межах 10-90% забезпеченості річного стоку (за винятком: санітарного попуску; витрат в межень, повені і паводки; забезпечення безперервного функціонування рибоходів, регулювання потужності гідроелектростанції за величиною стоку, оперативні заходи з регулювання водного потоку через гідроспоруди) та обмежень на використання території для спорудження малих ГЕС (національні природні парки,

заповідники, пам'ятки природи, місця покладів корисних копалин та мінеральних вод, історико-культурні території, земельні ділянки спеціального призначення). Застосовано басейновий принцип визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок.

На період до 2030 року потенціал малої гідроенергетики України оцінений в Енергетичній стратегії 2006 р. на рівні 1140 МВт потужності з річним обсягом виробництва електроенергії 3,34 млрд. кВт · год/рік. Згідно з останніми дослідженнями приблизна кількість технічно допустимих гідроенергетичних ресурсів становить 3-15 % від основного природного потенціалу. За оцінками науково-дослідних інститутів «Український гідроенергетичний проєкт» і «Український гідроенергетичний проєкт», а також матеріалів Атласу водних ресурсів загальний потенціал природної гідроенергетики малих річок України складає приблизно 12,5 мільярд кВт/годин на рік [4].

Згідно зі стратегією розвитку галузі, до 2030 року планується збільшити потужність малих ГЕС до 1040 МВт. Чинне законодавство України – зокрема закони «Про альтернативні джерела енергії» та «Про зелений тариф» - сприяє залученню інвестицій у цю сферу.

Первинним джерелом енергії для малої гідроенергетики є гідропотенціал малих річок; верхня межа потужності гідроенергетичного обладнання становить 10 МВт. Згідно з міжнародною класифікацією за нормативом ООН, до малих гідроелектростанцій (МГЕС) відносять гідроелектростанції потужністю від 1 до 10 МВт, до міні ГЕС – від 100 до 1 000 кВт, до мікро ГЕС – не більше 100 кВт. Україні до мікро ГЕС відносять гідроелектростанції потужністю менше 200 кВт.

В Україні налічується понад 63 тисячі малих рік та водотоків2728 загальною довжиною 135,8 тисяч км, з них близько 60 тисяч (95%) – дуже малі (довжина менше 10 км), їхня сумарна довжина – 112 тисяч км, тобто середня довжина такого водотоку – 1,9 км. Більшість малих рік довжиною менше 10 км мають площу водозбору від 20,1 до 500 км^2 (87% усієї кількості і 72% всієї довжини малих рік України).

Малих рік із площею водозбору від 50,1 до 100 км^2 налічується 890 (28% усієї кількості), а 797 річок (25%) мають площу водозбору 20,1 – 50 км^2. За площею водозбору малі річки України розподіляються таким чином: площа водозбору 10 км^2 і менше- 10916 річок(17,3% всіх малих річок); площа водозбору 50,1 – 100 км^2 – 10647 річок (1б,9%); площа водозбору 101 – 200 км^2 – 10591 річок (16,8%). Річкова мережа належить до водозборів річок Вісли, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, межиріччя Дунай – Дністер – Південний Буг, Дніпра, Сіверського Дінця, регіонів Приазов'я. Близько 98% території України належить до басейнів Чорного і Азовського морів і 2% до басейну Балтійського моря. Із загальної кількості річок 28% припадає на водозбір Дніпра, 26% – Дунаю, 24% – Дністра, 9% – Південного Бугу, решта 13% – на інші території.

Найбільша густота річкової мережі в Карпатах. Здебільшого вона становить понад 0,5 км/км^2, в окремих районах – 1,5 км/км^2 (для основних територій України – 0,10-0,15 км/км^2) їх загальний середньорічний стік становить 16 млрд. м3 . Приблизно половина його припадає на Закарпаття [6].

Загальний технічно доцільний потенціал виробництва електроенергії малими ГЕС в Україні перевищує 3 млрд. кВт·год. Більша частина невикористаних ресурсів зосереджена в Карпатському регіоні, де планується будівництво нових станцій з багатофункціональними водосховищами. Зокрема, на річці Тересва ведеться будівництво каскаду станцій загальною потужністю 16 МВт.

При використанні гідропотенціалу малих річок України можна досягти значної економії паливно-енергетичних ресурсів, причому розвиток малої гідроенергетики сприятиме децентралізації загальної енергетичної системи, чим вирішить ряд проблем в енергопостачанні віддалених і важкодоступних районів сільської місцевості.

Мала гідроенергетика є найбільш освоєною з нетрадиційних відновлювальних джерел електроенергії, що дозволяє використати значний гідроенергетичний потенціал малих рік і приток, систем водопостачання, іригації з видачею електроенергії в енергосистему, а в багатьох випадках забезпечити

локальне електропостачання віддалених районів або населених пунктів, особливо в недостатньо розвинених країнах і в країнах, що розвиваються, з обмеженою системою централізованого електропостачання. До переваг малих ГЕС відносяться порівняно невеликий об’єм інвестицій і короткий термін будівництва, що дозволяє прискорити отримання прибутку, забезпечити мінімальну дію на довкілля, надійність і близькість до споживача. До об’єктів малої гідроенергетики відносяться малі ГЕС згідно міжнародної класифікації потужністю до 30 МВт (в Швейцарії, Україні не більше 10 МВт), міні-ГЕС – від 0,1 до 1,0 МВт, мікро-ГЕС – не більше 0,1 МВт [2].

Станом на 2025 рік на території України в експлуатації знаходилось 120 малих ГЕС сумарною потужністю близько 83 МВт. Середньорічний обсяг виробництва електроенергії малими ГЕС складає біля 250 тис. МВт год/рік. Підлягає відновленню біля 12 МВт. За наведеної інформації абсолютне значення технічного потенціалу гідроенергетичних ресурсів малих річок (річний обсяг виробництва електроенергії) знаходиться на рівні 1270 млн. кВт-год/рік, з них освоєно біля 250 кВт-год/рік. Відповідні значення потужності малих ГЕС складають (станом на кінець 2024 року): загальна потужність – 375 МВт, знаходиться в експлуатації – 83 МВт, підлягає відновленню – 12 МВт, залишається неосвоєним – 280 МВт (рис. 1.2).

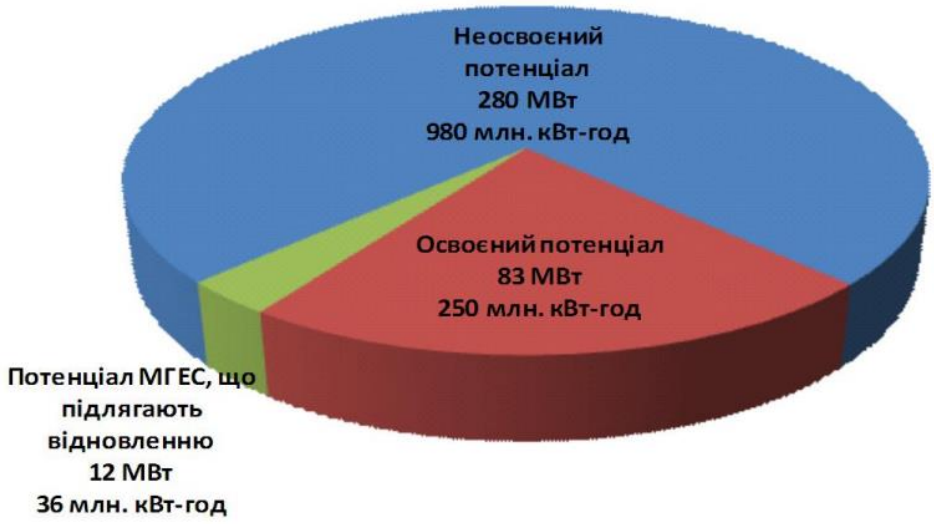


Рисунок 1.2 – Освоення технічного гідроенергетичного потенціалу малих річок України

Якщо в найближчі роки не буде проведено суттєвих змін у сфері гідроенергетики України, її негативний вплив на довкілля лише посилюватиметься. Основні проблеми включають втрату біорізноманіття в річкових екосистемах, зменшення рибних запасів через порушення шляхів міграції риби, а також невиконання міжнародних зобов'язань України, зокрема Рамкової конвенції про Карпати та Угоди про асоціацію з ЄС. Додатково ситуацію ускладнюють перевитрати бюджетних коштів через «зелений» тариф, зростання соціальної напруги в місцях будівництва ГЕС, втрата туристичної привабливості річкових територій, зменшення інвестиційної привабливості інших галузей та дефіцит водних ресурсів у зв'язку з кліматичними змінами. Значні втрати води також відбуваються через випаровування з водосховищ, що ще більше загострює проблему в умовах глобального потепління.

Малі гідроелектростанції можуть експлуатуватися до 50 років без істотних витрат на заміну обладнання. З урахуванням обмеженості гідроресурсів в світі можна припустити, що в період до 2030 року темпи розвитку малої гідроенергетики помітно знизяться, але при цьому буде підтримуватися диверсифікація малої гідроенергетики. При темпі зростання в 4,5 – 4,7% виробництво електроенергії на малих ГЕС досягне до 2030 року 770-780 ТВт · год, що становитиме понад 2% всього виробництва електроенергії в світі [5].

Отже, можна сказати, що мала гідроенергетика в доступній для огляду перспективі залишається одним з найважливіших і конкурентоспроможних поновлюваних джерел енергії. Україна має значний потенціал використання ресурсів малих річок. Використання гідропотенціалу малих річок України дає змогу значно економити паливно-енергетичних ресурси. Розвиток малої енергетики сприяє децентралізації загальної системи, що вирішує ряд проблем з електроживленням віддалених і важкодоступних районів і об'єктів. Вирішення проблем розвитку малої гідроенергетики України має достатній науково-технічний потенціал і значний досвід і галузі проєктування і розробки конструкцій гідротурбінного обладнання. Українські підприємства мають

значний виробничий потенціал для оснащення малих ГЕС необхідним обладнанням українського виробництва.

Розвиток малої гідроенергетики в Україні є не лише перспективним напрямом у контексті енергетичної незалежності, але й важливим чинником екологічної безпеки та сталого розвитку регіонів. Дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок дозволяє обґрунтувати ефективні технічні рішення для раціонального використання гідроресурсів країни.

1.3 Особливості гідроенергетики малих річок

Гідроенергетика малих річок має свої особливості, які відрізняють її від великих ГЕС. Вона характеризується меншою потужністю, але має потенціал для децентралізованого виробництва електроенергії, особливо у віддалених районах. Малі ГЕС можуть бути екологічно більш дружніми, якщо їх будівництво та експлуатація здійснюються з урахуванням вимог екологічного законодавства.

Малі гідроелектростанції (ГЕС) можуть використовувати енергетичний потенціал невеликих і середніх річок, а також окремих ділянок великих річок. Крім того, вони можуть працювати на базі різних гідротехнічних об’єктів, які не призначені для енергетики, наприклад: водосховищ, каналів для зрошення або судноплавства, водопровідних споруд чи каналів, що відводять воду для потреб АЕС, ТЕС або очисних споруд.

Річки можна поділяти на великі, середні та малі залежно від їх географічних характеристик, таких як довжина, площа басейну, об’єм стоку. Також їх поділяють за масштабами можливого використання у різних сферах, наприклад, для гідроенергетики, транспортування води чи зрошення. Малі та середні річки – це ті, що мають невелику площу басейну, яка протягом усього русла річки залишається стабільною за кліматичними та геологічними умовами.

На рисунку 1.3 наведений принцип роботи гідроакумулюючої електростанції.

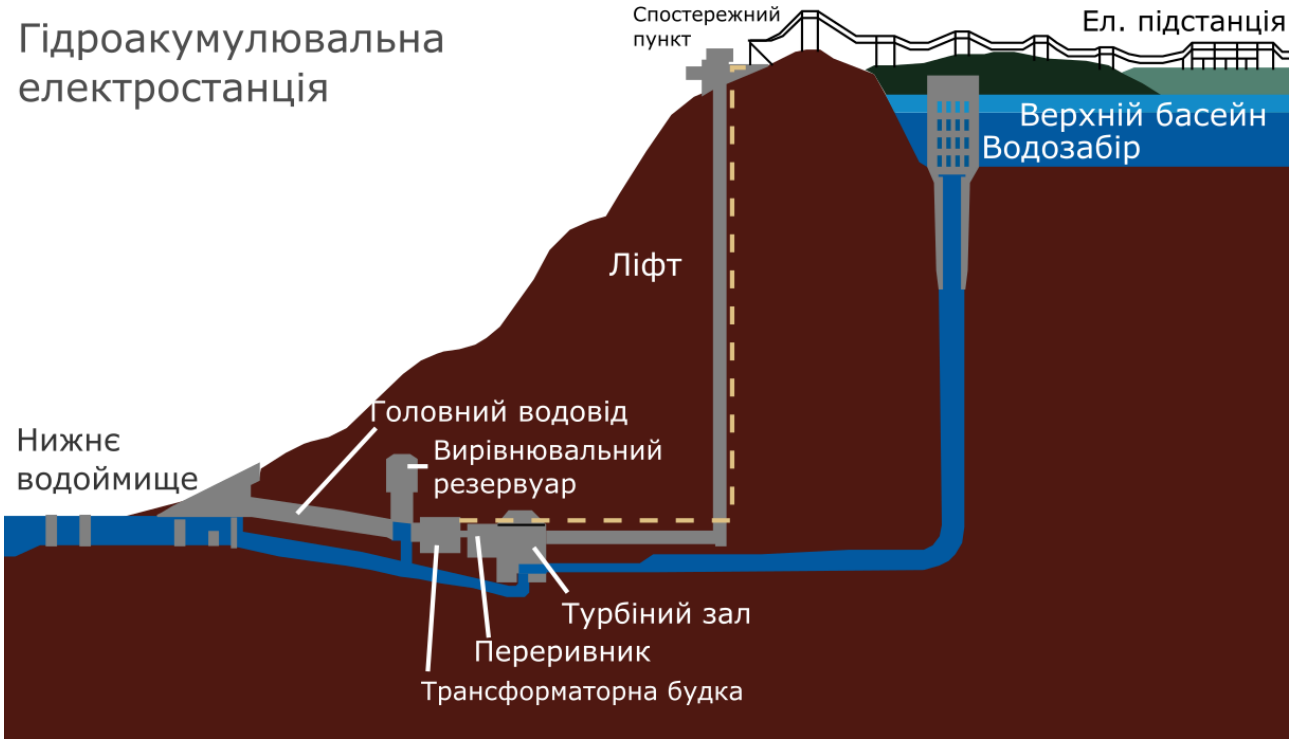


Рисунок 1.3 – Принцип роботи гідроакумулюючої електростанції

Турбіни на гідроелектростанціях поділяються на два основні типи: імпульсні та реактивні.

В імпульсних турбінах робоче колесо обертається за рахунок струменів води, що потрапляють на його лопаті, при цьому саме колесо знаходиться в повітрі.

Натомість у реактивних турбінах колесо повністю занурене у воду і знаходиться в герметичному корпусі. Завдяки особливій формі лопатей, на них виникає різниця тиску, яка змушує колесо обертатися – подібно до того, як підйомна сила діє на крила літака.

Імпульсні турбіни краще підходять для малих гідроелектростанцій, оскільки мають низку переваг: вони менш чутливі до твердих домішок у воді, простіші в обслуговуванні та виготовленні, запчастини до них легше знайти, а

також вони працюють ефективніше при неповному навантаженні. Проте головний недолік імпульсних турбін – це їхня непридатність для роботи при низьких напорах, бо для ефективної передачі енергії доведеться суттєво збільшити швидкість обертання, що ускладнює роботу з генератором. Для середніх і високих напорів краще підходять крос-флоу турбіни, турго-турбіни та пелтонові турбіни з кількома струменями.

Пелтонова турбіна (рис. 1.4) має круглий диск, по краю якого закріплені спеціально сформовані ковші. Вода подається під великим тиском через одне або кілька сопел і спрямовується струменями прямо на ковші, змушуючи їх обертатися. Кожен ковш розділений на дві частини, щоб вода не потрапляла в «мертву зону» по центру і не заважала ефективному відхиленню струменя.

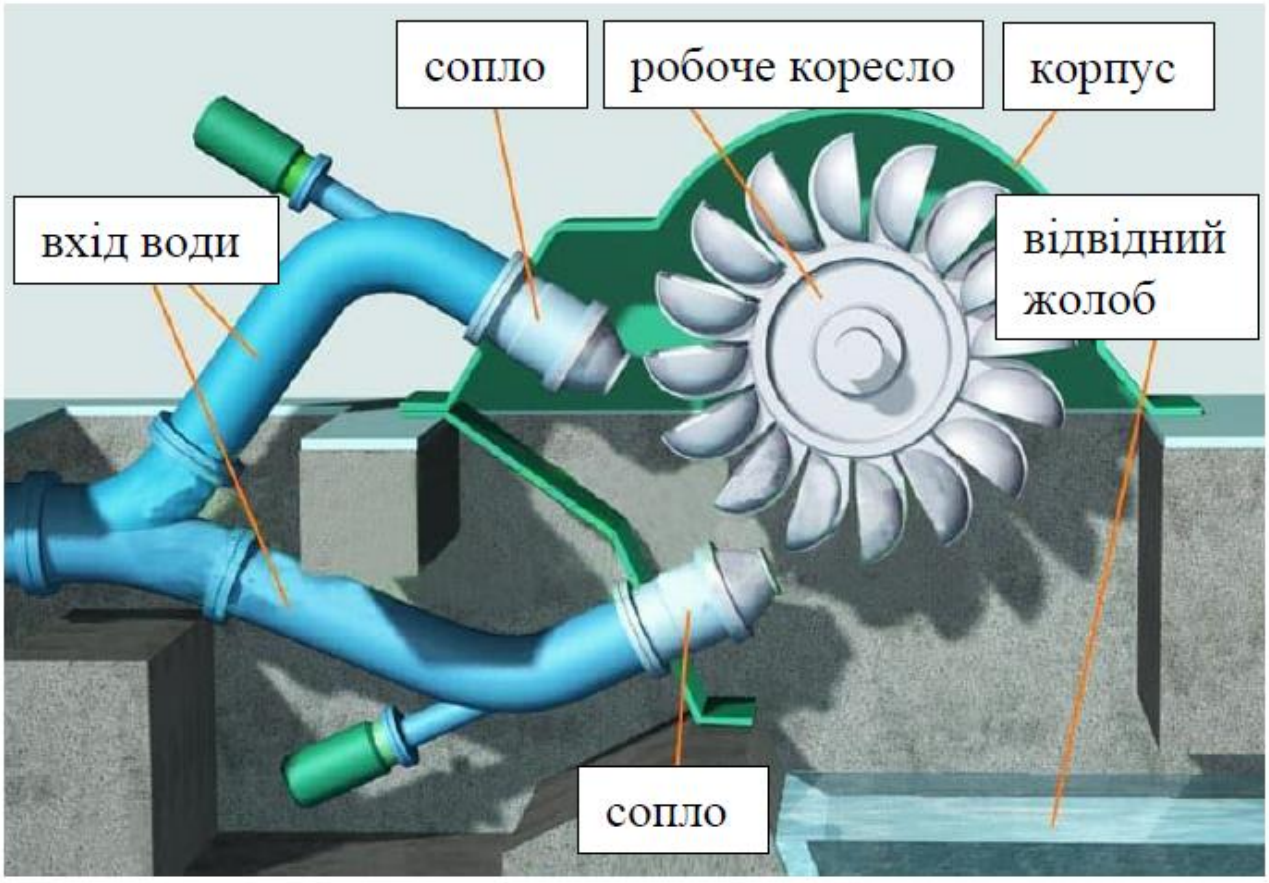


Рисунок 1.4 – Схема Пелтонової турбіни [9]

Особлива форма нижнього вирізу ковша дозволяє наступному ковшу плавно входити в струмінь, ще до того, як попередній повністю відійде. Це забезпечує безперервне передавання енергії і зменшує втрати. Струмінь води відхиляється ковшем приблизно на 165 градусів, що є оптимальним кутом: він достатній для ефективної передачі енергії, але недостатній, щоб відбитий струмінь заважав наступному ковшу.

Турго-турбіна – це імпульсна турбіна, подібна до Пелтонової, але пристосована до роботи на вищих швидкостях. Її конструкція дозволяє водяному струменю проходити через колесо: він потрапляє з одного боку і виходить з іншого, не створюючи перешкод наступним струменям. Завдяки цьому турбіна має менший діаметр колеса, але може виробляти стільки ж енергії, як і більша Пелтонова турбіна. Менші розміри й вища швидкість обертання дозволяють у деяких випадках з’єднувати турбо-турбіну з генератором напряму, без застосування дорогих редукторів. Турго-турбіни ефективні при різних швидкостях потоку та можуть монтуватися горизонтально або вертикально. Проте їхні робочі колеса складніші у виготовленні, а лопаті — крихкіші, ніж ковші у Пелтоновій турбіні.

Крос-флоу турбіна (іноді зветься Michell-Banki) має циліндричне колесо з двома дисками, з'єднаними вигнутими лопатями. Її вал завжди розташований горизонтально. Вода надходить через прямокутне сопло на всю ширину колеса, вдаряється об лопаті, проходить крізь колесо і вдруге взаємодіє з лопатями на виході, віддаючи залишок енергії. Хоча вона класифікується як імпульсна, у роботі цієї турбіни присутні й ознаки реактивного принципу дії, тому її можна вважати гідроагрегатом змішаного типу.

Вортекс-турбіна (вихрова турбіна) належить до реактивних і працює на основі створення вихору у воді. Вода надходить у спеціальний резервуар і, закручуючись, створює вихровий потік, який обертає турбіну. Такий тип установки особливо добре підходить для місць з дуже малим напором води, що робить її ідеальною для використання в малих гідроелектростанціях.

Принцип роботи вихрової турбіни зображений на рис. 1.5 полягає в тому, що вода потрапляє у відкритий резервуар або канал і створює спіральний потік, який приводить у рух робоче колесо турбіни. Цей вихровий рух дозволяє ефективно використовувати енергію води навіть при дуже низькому напорі, приблизно від 1 до 2 метрів. Вихровий потік створює постійний і стабільний рух води, що дозволяє турбіні працювати безперервно.

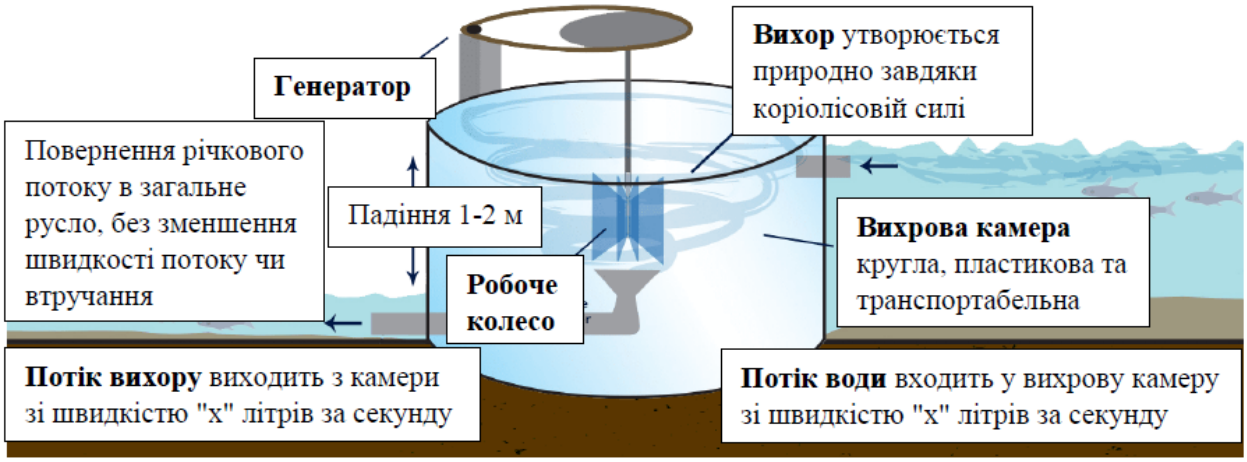


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення роботи вихрової турбіни [10]

Вихрова (вортекс) турбіна має низку переваг, які роблять її особливо привабливою для використання на малих гідроелектростанціях. Передусім, вона вирізняється простою конструкцією, що значно знижує витрати на її виготовлення, встановлення та подальше обслуговування. Така турбіна може ефективно працювати навіть при низькому напорі води, що робить її придатною для використання на малих річках або ділянках з незначним перепадом висоти.

Ще одна важлива перевага — екологічність. Завдяки роботі у відкритому резервуарі немає потреби в складних гідротехнічних спорудах, як у випадку з традиційними ГЕС. До того ж вихрова турбіна майже не порушує природне середовище річки, не заважає міграції риби та зберігає водну екосистему, що робить її безпечною для флори та фауни.

Завдяки цим особливостям вихрову турбіну вважають оптимальним варіантом для невеликих гідроелектростанцій, де немає можливості створити

високий напір, а також у випадках, коли важлива мінімізація впливу на природу.

Усі типи турбін, незалежно від конструкції, працюють за подібним принципом: потік води спрямовується на лопаті, внаслідок чого ті починають обертатися. Механічна енергія обертання передається на генератор, який перетворює її на електричну. Турбіни можуть мати різні технічні параметри, виконуватись із металу чи залізобетону та розраховуватись на різні рівні тиску води – від низького до високого.

Сучасне виробництво гідротурбін розвивається з урахуванням ряду важливих напрямів:

– основна мета – зробити турбіни більш економічними та надійними під час експлуатації.

– постійно зростає швидкість роботи гідротурбін, що дозволяє досягати потрібної потужності при менших розмірах обладнання, це, своєю чергою, зменшує вартість обладнання і будівництва ГЕС;

– підвищується енергоефективність турбін, а також середній коефіцієнт корисної дії всіх агрегатів;

– покращуються характеристики, які зменшують явище кавітації, що дозволяє уникнути пошкоджень у проточній частині турбіни та знизити рівень її розташування відносно водозабору, це зменшує обсяги земляних і будівельних робіт;

– зменшуються коливання тиску в середині турбіни, що особливо актуально для турбін із радіально-осьовими колесами, а також знижується рівень вібрацій;

– активно впроваджується тенденція до об’єднання декількох одиничних потужностей у більші гідроагрегати. Це дозволяє зменшити кількість установок, підвищити їх ККД і скоротити витрати на обладнання та спорудження будівель ГЕС.

Якщо на ГЕС потрібно працювати при різних напорах, то для досягнення найкращої ефективності доцільно використовувати декілька типів гідротурбін

або змінювати робочі колеса. У таких випадках важливо провести техніко-економічне обґрунтування, щоб вибрати оптимальний варіант для конкретних умов.

Загальна класифікація гідротурбін за діапазоном напорів представлена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Застосування гідротурбін у відповідності з напорами

Типи гідротурбін	Діапазон напорів *H*, м	Одинична максимальна потужність N, МВт	Діаметр турбіни максимальний *di*, м
Реактивні гідротурбіни			
Осьові капсульні, трубчасті та інші гідроагрегати	2-20	До 50	8
Вертикальні поворотно- лопатеві турбіни	5-80	250	10,5
Пропелерні	6-80	150	9
Двухперові	30-100	250	8
Діагональні	30-200	300	8
Радіально-осьові	30-700	800	10
Оборотні			
Осьові	2-15	30	8
Діагональні	20-100	300	7,5
Радіально-осьові одноступінчасті	30-600	450	9,5
Активні гідротурбіни			
Ковшові	300-2000	350	7,5
Похило -струменеві	50-400	50	4
Дворазові	3-200	-	-
«Сфиндекс»	200-1500	-	-

Отже, на сьогодні існує велика різноманітність типів гідротурбін, які поділяються на активні та реактивні. Багато з них здатні забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії навіть за умов повільного течії річки або в разі несприятливого клімату.

1.4 Висновки до розділу 1

Аналіз сучасного стану гідроенергетики в Україні та світі свідчить про її динамічний розвиток, незважаючи на наявні виклики – економічні, технічні та екологічні. Українська гідроенергетика, навіть в умовах військових дій і часткового руйнування інфраструктури, продовжує відігравати важливу роль у забезпеченні країни електроенергією. Високі показники виробництва електроенергії демонструють її стратегічну значущість у формуванні енергетичного балансу.

Особливої уваги заслуговує сегмент малої гідроенергетики, оскільки Україна має значний потенціал для його розвитку – країна багата на малі річки, які за належної технічної реалізації можуть бути ефективно використані для генерації енергії. Це дозволяє не лише децентралізувати енергопостачання, а й зміцнити енергетичну безпеку у віддалених регіонах.

Актуальність дослідження роботи гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах водотоків малих річок України полягає в наступному:

По-перше, потужність у 10 МВт є типовою для середньої малої ГЕС, яка може бути реалізована на більшості малих річок із відносно стабільним гідрологічним режимом. Такі станції здатні забезпечувати електроенергією малі міста, селища чи виробничі підприємства.

По-друге, використання малих річок дозволяє мінімізувати витрати на будівництво великих гідротехнічних споруд, що особливо актуально в умовах обмеженого фінансування та зростаючого попиту на екологічно чисту енергію.

По-третє, сучасні конструкції турбін, такі як вортексні, крос-флоу, турго та пелтонові, дозволяють адаптувати обладнання до конкретних гідрологічних умов, забезпечуючи високу ефективність навіть при невеликих напорах та витратах води.

Крім того, малі ГЕС мають низький рівень екологічного впливу, особливо за умов використання новітніх технологій. Наприклад, вихрові турбіни

практично не порушують біорізноманіття, не перешкоджають міграції риби, не змінюють русло річки і не потребують створення великих водосховищ.

Однак, для успішного розвитку галузі необхідно вирішувати низку проблем:

– вдосконалити механізми державної підтримки та стимулювання інвестицій у сектор малої гідроенергетики;

– забезпечити відповідність екологічним стандартам;

– налагодити локальне виробництво обладнання та підвищити якість проєктування.

У цьому контексті дослідження особливостей роботи ГЕС потужністю 10 МВт на малих річках є надзвичайно важливим. Воно дозволяє визначити оптимальні конструктивні та технологічні рішення для адаптації електростанції до конкретних умов рельєфу, клімату і гідрології, а також забезпечити її надійну, довготривалу й екологічно безпечну експлуатацію. Такий підхід сприятиме сталому розвитку енергетичної системи України й зміцненню енергетичної незалежності країни.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1. Методичні підходи до оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок

У літературі є декілька підходів щодо тлумачень «гідроенергетичного потенціалу» [21, 24-26]. Можна виділити чотири категорії гідроенергетичного потенціалу: загальний (природний теоретичний), екологічний, технічно можливий, економічно обґрунтований гідроенергетичний потенціал.

Найбільш загальним і ключовим показником, що відображає гідроенергетичні можливості водотоку, є загальний гідроенергетичний потенціал**,** який характеризує повний теоретичний обсяг енергії річкового стоку. Для його визначення розраховують потужність енергетичного ресурсу води.

За висновками низки дослідників [21, 25], найточніші та найбільш обґрунтовані результати забезпечує метод сумарного поділянкового обліку**.** Він передбачає оцінювання потужності всіх окремих ділянок річки, що можуть бути залучені до енергетичного використання.

Відбір таких ділянок здійснюють за критеріями:

– наявність відносно рівномірного похилу (наприклад, порожисто-водоспадні відтинки з похилом $I > 30\%$);

– значна бічна приточність, що змінює гідравлічний режим річки.

Для кожної вибраної ділянки обчислюють її загальну потужність (N, кВт) за формулою:

$$N = g \cdot \left(\frac{Q_1 + Q_1}{2}\right) \cdot (H_1 - H_2), \qquad (2.1)$$

де g – прискорення вільного падіння (g = 9,81 м/с^2);

Q_1 і Q_2 – витрати води на початку та в кінці ділянки м^3/с;

H_1 і H_2 – абсолютні відмітки на початку та в кінці ділянки, м. Сумарна потужність усіх ділянок складає загальний енергетичний потенціал річки і визначається як:

$$N_{\text{заг}} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + \cdots + N_n - \sum N_i, \qquad (2.2)$$

де N_1, N_2, N_3 – потужності кожної з ділянок.

Варто також відзначити, що для кожної ділянки річки можна встановити потенціальні річні запаси гідроенергії (Е, кВт · год/рік):

$$\text{E} = T \cdot g\left(\frac{Q_1 + Q_1}{2}\right) \cdot (H_1 - H_2), \qquad (2.3)$$

де Т – кількість годин в році.

Вираз T·g в розрахункових потенціальних запасах гідроенергії приймається рівним 85935.

Відомо, що повністю реалізувати загальний гідроенергетичний потенціал річок неможливо [24], оскільки цьому перешкоджає низка чинників, серед яких:

– значні площі затоплення, що виникають під час створення водосховищ ГЕС;

– екологічна недоцільність або економічна нерентабельність будівництва гідроелектростанцій на окремих водотоках;

– енергетичні втрати під час виробництва електроенергії (включно з внутрішнім тертям, гідромеханічними втратами та втратами в обладнанні);

– природні та техногенні втрати води з водосховищ, такі як випаровування та водозабори;

– зниження напору у гідротехнічних спорудах;

– додаткові втрати напору, пов’язані з формуванням кривої підпору;

– неможливість залучення до енергетичного використання верхів’їв і пригирлових частин річок;

– заборона використовувати ділянки річок, що належать до природно-заповідного фонду;

– обмеження, пов’язані з геологічними, геоморфологічними та

– орографічними особливостями басейну, які роблять енергетичне використання річки недоцільним або неможливим.

Зазначені фактори посилюються впливом екологічних проблем, які супроводжують гідроенергетичне використання річок. Це особливо стосується гірських та передгірних водотоків, де необґрунтоване з екологічної точки зору освоєння водних ресурсів може спричинити незворотні зміни в природних екосистемах.

У зв’язку з цим під час визначення гідроенергетичного потенціалу необхідно враховувати втрати, що виникають через екологічні та техніко-економічні обмеження — наявність територій природно-заповідного фонду в межах водозбору, розвиток небезпечних геолого-геоморфологічних процесів тощо. Розрахунок здійснюють у два етапи: спочатку визначають екологічний потенціал, а вже потім – технічно можливий.

Під екологічним гідроенергетичним потенціалом (ЕкГП) розуміють ту частину ЗГП, з якої вилучено енергетичні можливості ділянок річок, що мають високу природоохоронну цінність і не можуть використовуватися в промислових чи енергетичних проєктах. ЕкГП є важливою складовою ЗГП, необхідною для коректної оцінки гідроенергетичних ресурсів регіонів, зокрема річок Українських Карпат. Його запровадження зумовлене необхідністю збереження водних екосистем та узгодження стану водотоків із вимогами Водної рамкової директиви ЄС [6], що передбачає мінімізацію антропогенного навантаження.

Крім того, при оцінці водних ресурсів слід брати до уваги ключові положення Директиви ЄС «Про оцінку та управління ризиками наводнень» [5].

Для визначення екологічного гідроенергетичного потенціалу (ЕкГП) пропонується враховувати такі основні критерії:

– наявність природоохоронних об’єктів у межах річкового басейну, до

яких належать гідрологічні та ландшафтні заказники, регіональні ландшафтні парки, національні природні парки, заповідники тощо;

– співвідношення середньорічного та мінімального стоку ($Q_{сер}/Q_{мін}$).

У верхів'ях річок, попри значні ухили русла (що забезпечує великий напір), обсяг стоку води невеликий, тому його енергетичне використання можливе лише за умови дотримання співвідношення $Q_{сер}/Q_{мін}$ у межах 1/5 – 1/7. Це означає, що стік у верхній частині водотоку має становити 14–20 % від загального стоку [17]. Якщо співвідношення перевищує ці межі, оцінка гідроенергетичних ресурсів для таких ділянок не проводиться.

Технологічний підхід до визначення екологічного гідроенергетичного потенціалу майже повністю відповідає методиці розрахунку загального потенціалу. Тому при оцінюванні ЕкГП основну увагу зосереджують на ділянках річок, які не відповідають співвідношенню $Q_{сер}/Q_{мін}$, а також на тих, що розташовані в межах територій природно-заповідного фонду.

Частина загального гідроенергетичного потенціалу, з якої виключено ЕкГП та можливі втрати потужності водотоку, зумовлені природними й антропогенними особливостями території, становить технічно можливий гідроенергетичний потенціал (ТМГП). Під ТМГП розуміють ту частину гідроенергетичних ресурсів, яку реально й технічно можливо використовувати в енергетичних цілях (тобто економічно доцільно).

Згідно з [25], технічно можливий потенціал визначають на основі величини водних ресурсів, яка коригується на ризики втрат, пов'язаних із фільтрацією, випаровуванням, неможливістю повного регулювання стоку (слабка зарегульованість річки), потенційними водозаборами, відсутністю інфраструктури, комунікацій чи ліній електропередач тощо.

Рівень ТМГП також залежить від геологічних умов:

– наявності тектонічних розломів, активних тектонічних рухів, землетрусів силою 8–9 балів і більше, карстових процесів, зсувів і селів;

– гідрогеологічних особливостей – глибини залягання підземних вод;

– орографії басейну – крутизни схилів;

– фізичних характеристик ґрунтів – схильності до суфозії, просідання, набрякання та інших факторів.

Суттєвим елементом, що зменшує ТМГП, є і екологічний гідроенергетичний потенціал. У такому разі загальна формула визначення ТМГП має вигляд:

$$E_{ТМГП} = E_{ЗГП} - E_{ЕкГП} - E_{ВТРАТ}, \quad (2.4)$$

де $E_{ТМГП}$ – енергія технічно можливого гідроенергетичного потенціалу;

$E_{ЗГП}$ – енергія загального гідроенергетичного потенціалу;

$E_{ЕкГП}$ – енергія екологічного гідроенергетичного потенціалу;

$E_{ВТРАТ}$ – ризик втрати гідроенергопотужності, пов'язаних із втратами водних ресурсів, небезпечними геологічними та гідрогеологічними процесами, небезпечною екзогенною діяльністю, антропогенним впливом, тощо.

Варто зазначити, що величина $E_{ВТРАТ}$ включає в себе велику кількість невідомих дескрипторів, що створює певні ризики утворення похибки при визначенні даного показника.

Величина технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок істотно змінюється залежно від умов виробництва та використання гідроенергії. Найточніше його можна визначити лише під час розроблення детальних схем і проєктів енергетичного освоєння річок [21]. Однак цей процес є надзвичайно складним, навіть коли йдеться лише про орієнтовну оцінку потенційної потужності водотоків у межах окремого басейну чи регіону.

Тому для встановлення ТМГП застосовують кілька підходів.

Одним із таких підходів є метод визначення коефіцієнта використання загального гідроенергетичного потенціалу K_1 [24]. Цей коефіцієнт відображає, яку частку загального потенціалу річки можна реально використати в технічних

цілях. Залежно від величини потенційної енергії річок виділяють чотири групи водотоків, кожній з яких відповідає певне значення коефіцієнта K_1.

– група I – крупні річки з потенційною енергією > 10000 млн. кВт. год. K_1 = 0,75-0,85. А для річок з малими похилами K_1 = 0,3-0,5;

– група II – великі річки з потенціальною енергією 1000-10000 млн. кВт. год. К1 = 0,50-0,75. Для річок, що протікають у районах зрошення, K_1 = 0,25-0,45;

– група III – середні річки з потенціальною енергією 15-1000 млн. кВт. год. K_1 = 0,4-0,5. З деривaційними облаштуваннями K_1 = 0,3;

– група IV – малі річки з потенціальною енергією.

Економічно ефективний (обґрунтований) гідроенергетичний потенціал ($E_{ЕГП}$) визначається з урахуванням економічної доцільності використання гідроенергоресурсів, яка формується під впливом низки змінних факторів. Передусім це потреба у виробництві гідроенергії та умови її подальшого використання.

Другий чинник пов’язаний із тим, що використання технічно можливого потенціалу може забезпечити перехід регіону від імпортера електроенергії до її експортера навіть за умов дотримання екологічних вимог та стандартів виробництва. Важливо також враховувати можливість глибокої модернізації існуючих ГЕС та МГЕС, що дасть змогу суттєво збільшити їхню продуктивність.

Разом з тим для реалізації таких завдань необхідно розробити детальне економічне обґрунтування виробництва та споживання гідроенергії як у короткостроковій, так і у довгостроковій перспективі з урахуванням регіональних планів розвитку.

Важливою складовою подальшого використання енергетики річок є також формування прогнозу їх потенціалу, що дозволить створити належні передумови для обґрунтованого гідроенергетичного освоєння водних ресурсів уже на сучасному етапі.

Розроблена схема визначення гідроенергетичного потенціалу ґрунтується на аналітичній послідовності виконання робіт, що дозволило сформувати

алгоритм оцінки та прогнозування гідроенергетичних ресурсів річок (рис. 2.1).

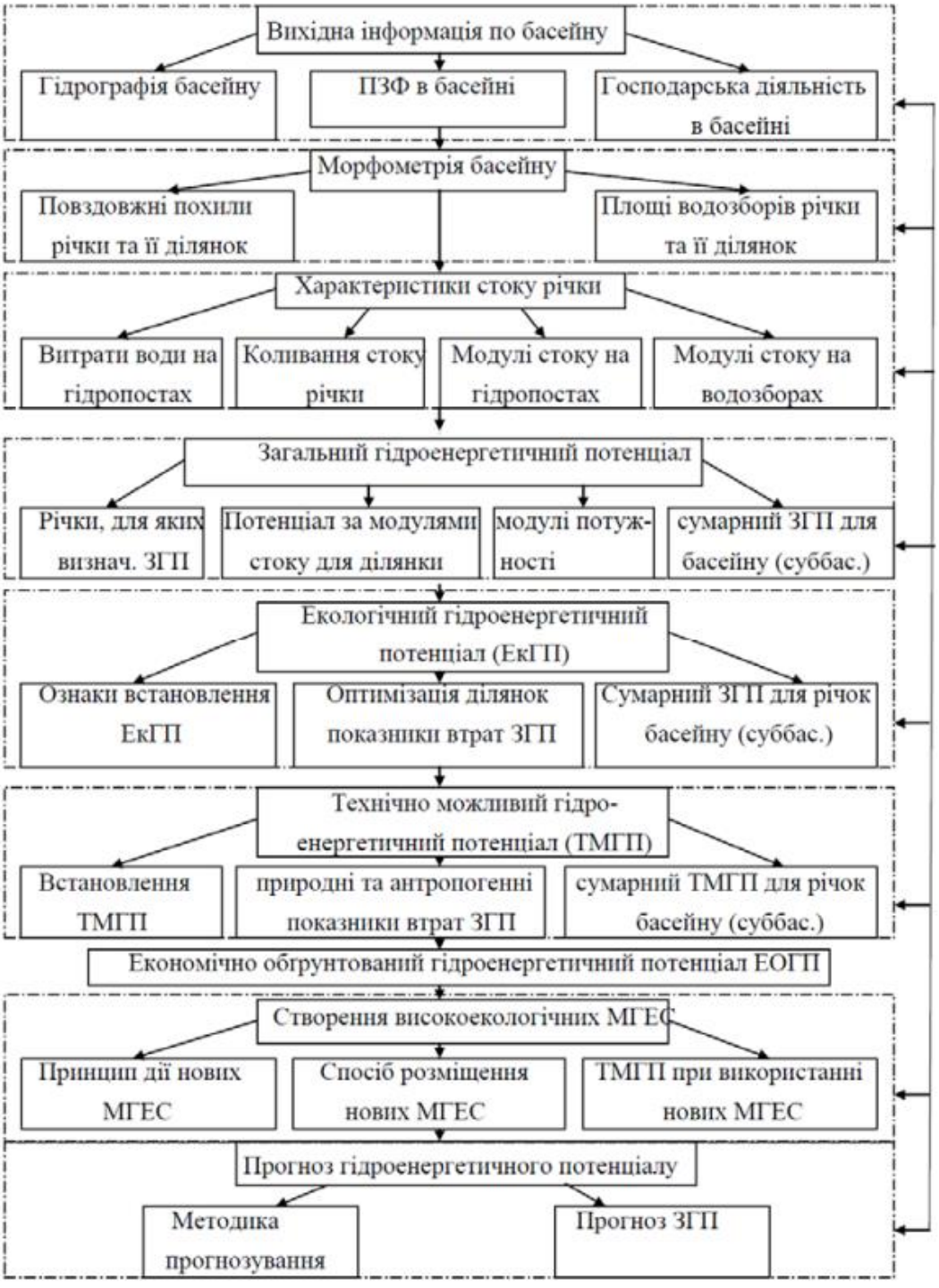


Рисунок 2.1 – Алгоритм встановлення та прогнозу гідроенергетичного потенціалу річок

Послідовність операцій, наведена в алгоритмі, є логічною та нескладною у реалізації, а також не вимагає значних фінансових витрат. Важливим елементом

цієї схеми є екологічне обґрунтування та впровадження екологічно безпечних технологій виробництва гідроенергії.

Алгоритм доцільно застосовувати для комплексної оцінки гідроенергетичних ресурсів водотоків окремого регіону або, що ще краще, у межах усього річкового басейну. Він передбачає детальний аналіз вихідних даних про басейн та його річкову мережу – гідрографію, природоохоронні території, характер господарської діяльності, морфометрію басейну та параметри водного стоку.

На основі зібраної інформації послідовно визначаються чотири категорії гідроенергетичного потенціалу:

- загальний (теоретичний природний);
- екологічний;
- технічно можливий;
- економічно ефективний (обґрунтований).

Після цього формується концепція створення екологічно безпечних малих ГЕС, визначаються їх технічні особливості, оптимальні місця розташування та уточнюється технічно можливий потенціал при їх використанні.

Завершальним етапом є прогнозування змін загального гідроенергетичного потенціалу, що можуть виникнути через варіації водності, спричинені кліматичними змінами. Оскільки обсяги стоку змінюються в довготривалій перспективі, то й гідроенергопотужність річок також зазнає коливань. У маловодні періоди вона може суттєво відрізнятися від показників багатоводних фаз і бути нижчою від середньорічних значень. Такі відмінності часто не враховуються при оцінюванні гідроенергетичного потенціалу, що призводить до неповного уявлення про реальні можливості гідроенергетичного використання річкових ресурсів. Тому необхідно враховувати можливі сценарії зміни водності, щоб забезпечити ефективне використання водних ресурсів.

2.2. Методи розрахунку параметрів гідроелектростанції

Гідроелектростанції малої потужності – це устаткування, яке засноване на гідроенергетичних установках потужністю від 1 до 3000 кВт. Установки для малої гідроенергетики класифікують за потужністю на:

– устаткування для міні гідроелектростанції потужністю до 100 кВт;

– устаткування для мікро гідроелектростанцій потужністю до 1000 кВт.

Конструкція малої ГЕС базується на гідроагрегаті, який включає енергоблок, водозабірний пристрій і елементи управління. Залежно від того, які гідроресурси використовуються малими гідростанціями, їх ділять на декілька категорій:

– руслові або пригребельні станції з невеликими водосховищами;

– стаціонарні міні ГЕС, що використовують енергію вільної течії річок;

– ГЕС, що використовують існуючі перепади рівнів води на різних об’єктах водного господарства;

– мобільні міні ГЕС в контейнерах, із застосуванням пластикових труб або гнучких армованих рукавів.

Принцип роботи турбіни в усіх типах конструкцій практично однаковий: вода під тиском подається на лопаті турбіни, змушуючи її обертатися. Обертальна енергія передається на гідрогенератор, який виробляє електроенергію. Турбіни підбираються для конкретних об’єктів за технічними характеристиками, основним серед яких є тиск води. Крім того, вибір турбіни залежить від типу камери, що входить до комплекту – сталевої або залізобетонної.

Принцип роботи приливної електростанції наступний: в затоці будується гребля, що відділяє частину його від океану. Під час приливу і відливу по різні сторони греблі утворюється перепад рівнів води, вода спрямовується через греблю у бік нижнього рівня і приводить в рух реверсивні турбіни, що обертаються то в один (під час приливу), то в інший бік (рис. 2.2).

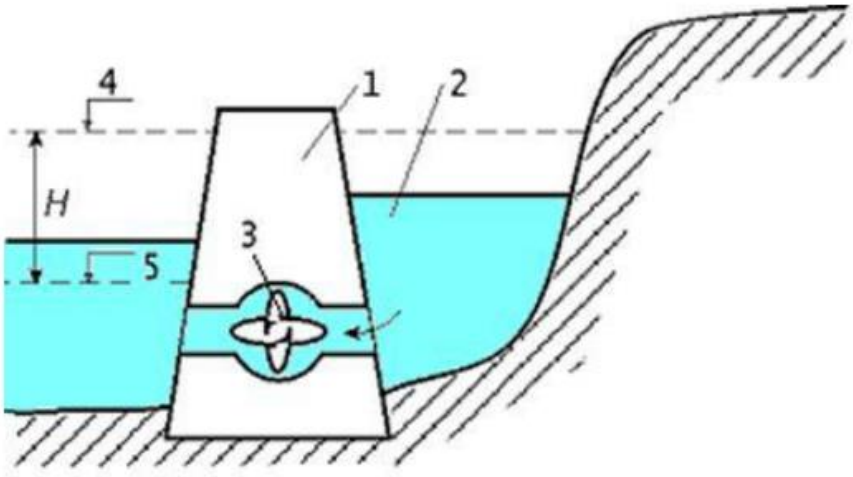


Рисунок 2.2 – Принцип роботи приливної електростанції:
1 – гребля; 2 – басейн; 3 – реверсивна турбіна; 4 – найбільший рівень приливу;
5 – рівень відливу

В порівнянні із звичайною ГЕС приливна електростанція має ряд переваг:

1. Окрім відсутності необхідності створення водосховища робота ПЕС не залежить від водності року.

2. Приливи і відливи, змінюючи один одного, мають постійну для кожного місяця енергію.

3. Привабливі приливні електростанції і тим, що капітальні вкладення на їх будівництво не перевищують витрат на спорудження гідроелектростанцій.

4. При цьому собівартість будівництва електростанції на 1 МВт електроенергії, що виробляється на ПЕС, може обійтися у п'ятеро дешевше, ніж на ТЕС.

Практика експлуатації підтвердила екологічну безпеку приливних електростанцій:

– греблі ПЕС біологічно проникні: пропуск риби через ПЕС відбувається практично безперешкодно, основна кормова база риби планктон: на ПЕС гине 5-10% планктону, а на ГЕС – 83-99%;

– зниження солоності води в басейні ПЕС, що визначає екологічний стан морської фауни і льоду складає 0,05-0,07%, тобто практично невідчутно;

– льодовий режим в басейні ПЕС пом’якшується: в басейні зникають тороси і передумови до їх утворення, не спостерігається нажимної дії льоду на 28 споруду, розмив дна і рух наносів повністю стабілізуються протягом перших двох років експлуатації;

– наплавний спосіб будівництва дає можливість не зводити в створах ПЕС тимчасові великі будівельні бази, споруджувати перемички і інше, що сприяє збереженню довкілля в районі ПЕС;

– виключений викид шкідливих газів, золи, радіоактивних і теплових відходів, розробку, транспортування, переробка, спалювання і захоронення палива, запобігання спалюванню кисню повітря, затоплення територій, загроза хвилі прориву;

– ПЕС не загрожує природі і людині, а зміни в районі її експлуатації мають лише локальний характер, причому, в основному, в позитивному напрямі.

Водна енергія річкового стоку – це енергія, якою володіє вода, стікаючи під дією сили тяжіння по руслу, що має поздовжній уклон (падіння). У природному стані водний потік безперервно здійснює роботу, яка витрачається на подолання зовнішніх та внутрішніх сил тертя, взаємодію потоку з руслом, переміщення наносів, розмив русла тощо. Водна енергія річкового стоку відноситься до механічної форми енергії, вона безперервно відновлюється внаслідок кругообігу води в природі. Силою, яка здійснює роботу водного потоку, є власна вага води. Робота визначається різницею рівнів води на початку і наприкінці аналізованої ділянки довжини водотоку L (рис. 2.3).

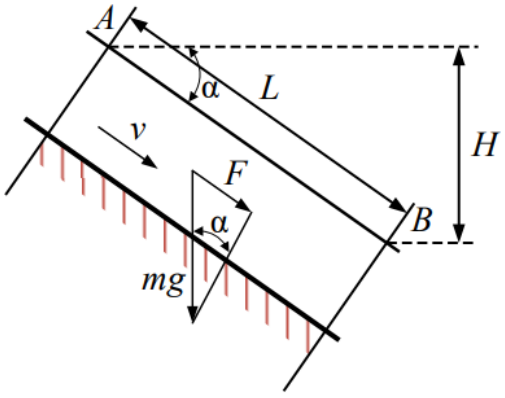


Рисунок 2.3 – Схема визначення потужності водотоку

Ця робота, що здійснюється силою потягу води F на елементарній ділянці АВ, дорівнює:

$$A_{AB} = F \cdot L = mg \cdot \sin(\alpha)\, L = \rho g \omega L \cdot \sin(\alpha)\, L, \qquad (2.5)$$

де g – прискорення вільного падіння;

ρ – щільність води;

m – маса води.

З урахуванням енергетичних характеристик водотоку (витрати $Q = \omega \cdot v$ та падіння річки на ділянці (напору) $H = L \cdot sin(\alpha)$) робота, або енергія ділянки водотоку EAB має вигляд:

$$A_{AB} = E_{\text{AB}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \text{H} \cdot t, \qquad (2.6)$$

Потужність водного потоку на ділянці АВ:

$$N_{AB} = \frac{E_{\text{AB}}}{t} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \text{H}, \qquad (2.7)$$

Якщо виразити час t в секундах, щільність ρ = 1000 кг⁄м^3, g = 9,81 м/с^2 і виразити Q в м^3/с, а H – в метрах, то можна отримати потужність в кіловатах:

$$N_{AB} = 9{,}81 \cdot Q \cdot H \qquad (2.8)$$

Енергія ділянки водотоку за рік складе, кВт·год:

$$E_{AB} = 8760 \cdot 9{,}81 \cdot Q \cdot H \qquad (2.9)$$

За поздовжнім профілем всієї річки та даними по її стоку можна визначити потенційну потужність річки (водотоку) від витоку до гирла, так звану кадастрову потужність, кВт

$$N = 9{,}81 \cdot \sum_{k-1}^{n} Q_k \cdot H_k, \qquad (2.10)$$

де Q_k – середня на багаторічну витрату води на k-й ділянці, м^3/с;

H_k – падіння річки на дільниці k, м;

n – кількість ділянок.

Потенційна річна енергія річки визначається за формулою, кВт·год,

$$\mathrm{E} = 8760 \cdot 9{,}81 \cdot \sum_{k-1}^{n} Q_k \cdot H_k, \qquad (2.11)$$

Формули (2.10) та (2.11) використовуються для визначення потенційної потужності та енергії водотоку. Річковий стік, енергетичний потенціал якого можна використовувати, є гідроенергетичним ресурсом. Гідроенергетичні ресурси поділяються на потенційні (теоретичні), технічні та економічні. Потенційні гідроенергетичні ресурси (теоретичні) визначаються у припущенні, що весь стік буде використовуватися для вироблення електроенергії без втрат при перетворенні водної енергії на електричну, тобто, при ККД, що дорівнює одиниці.

Технічні гідроенергетичні ресурси (технічний потенціал) – частина валового потенціалу річкового стоку, яка технічно може бути використана або використовується.

Технічні гідроенергетичні ресурси враховують неминучі втрати: гідравлічні (у водопровідному тракті), електромеханічні (в обладнанні), втрати води на випаровування з водосховищ та фільтрацію тощо. Крім того, частина ділянок річки у верхів'ї та гирлі практично не використовується.

Економічні гідроенергетичні ресурси – це частина гідроенергетичних ресурсів, використання яких економічно виправдано.

Економічний гідроенергетичний потенціал змінюється у часі залежно від соціальних, економічних та екологічних умов.

Визначення гідроенергетичного потенціалу водотоку.

За вихідними даними визначаємо довжини ділянок водотоку між створами

$$L_{дi} = L_i + 1 - L_i, \quad (2.12)$$

де Li, Li+1 – відстань від джерела водотоку до створів, що є межами ділянок, м.

Різниця рівнів вільної поверхні у межах ділянки рівна

$$H_{дi} = \downarrow \text{РВ}_i - \downarrow \text{РВ}_{i+1}, \quad (2.13)$$

де $\downarrow \text{РВ}_i$, $\downarrow \text{РВ}_{i+1}$ – відмітки рівнів води на початку і у кінці створів, м.

Визначаємо витрати у створах і середню витрату на ділянці

$$Q_i = q \cdot F\ 1000\ ,$$

$$Q_{\text{ді}} = \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2}, \quad (2.14)$$

де q – середньорічний модуль стоку.

Визначаємо фактичні (із урахуванням втрат) напір і витрату на кожній ділянці:

$$\text{Н}_{\text{ді}}^{\text{ф}} = \text{Н}_{\text{ді}} \cdot (1 - \Delta\text{Н}),$$

$$Q_{\text{ді}}^{\text{ф}} = Q_{\text{ді}} \cdot (1 - \Delta Q), \quad (2.15)$$

Значення напорів та витрат річки необхідні для подальшого визначення енергетичних параметрів водотоку.

Оцінка зміни потужності малою ГЕС при коливаннях витрати води і тиску.

Як зміниться потужність малої ГЕС, якщо тиск водосховища Н в посушливий період зменшиться в n разів, а витрата води Q скоротиться на m.

Втрати в гідротехнічних спорудах, водоводах, турбінах і генераторах вважати постійними.

Відомо, що потужність ГЕС (Вт) можна визначити по простому рівнянню:

$$N = 9{,}81 \cdot Q \cdot \text{Н} \cdot \eta, \text{Вт} \qquad (2.16)$$

де Q – об'ємна витрата води в $м^3/с$;

Н – тиск води ГЕС в м;

η – ККД ГЕС, що враховує втрати в гідравлічних спорудах водоводах, турбінах, генераторах. Для малих ГЕС η≈0,5. ККД гідротурбін змінюється в межах 0,5÷0,9.

Потужність ГЕС після змін визначається:

$$N = 9{,}81 \cdot Q(1-m)\eta \cdot \text{Н}/n \qquad (2.17)$$

Зміна потужності:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{9{,}81 \cdot Q \cdot \text{Н} \cdot \eta}{9{,}81 \cdot Q(1-m)\eta \ \text{Н}/n}, \qquad (2.18)$$

Оцінка приливного потенціалу басейну.

Використовуючи формулу Л.Б. Бернштейна, оцінити приливний потенціал басейну $Е^{пот}$ (кВт·год), якщо його площа F ($км^2$), а середня величина приливу $R_{ср}$ (м). Завдання присвячено оцінці енергетичного потенціалу $Е_{пот}$ приливної енергії океанічного басейну, що має площу F, якщо відома середня величина приливної хвилі $R_{ср}$. У науковій літературі існує декілька рівнянь, що дозволяють визначити приливний потенціал басейну. Одне з них запропоноване вітчизняним ученим Л.Б. Бернштейном:

$$E_{\text{пот}} = 1{,}97 \cdot 10^6 R_{\text{ср}}^2 F, \qquad (2.19)$$

Після проведення розрахунків будується кадастрові графіки гідроресурсів водотоку.

2.3. Висновки до розділу 2

Загальний гідроенергетичний потенціал визначається як сума потенціалів усіх характерних ділянок річки, які відрізняються між собою величиною стоку та напором води. Екологічний гідроенергетичний потенціал розраховується як частина загального потенціалу, з якої виключено ті ділянки водотоку, використання яких для гідроенергетичних цілей могло б спричинити негативні екологічні наслідки.

Технічно можливий гідроенергетичний потенціал визначається як обсяг гідроенергопотужності річки або групи річок конкретного регіону чи басейну, який теоретично може бути використаний для виробництва гідроенергії з урахуванням втрат, пов’язаних із забезпеченням екологічних умов, а також ризиків, що зумовлені природно-антропогенними факторами.

Економічно ефективний (обґрунтований) гідроенергетичний потенціал встановлюється як сукупність гідроенергопотужностей річок регіону, які доцільно використовувати з економічної точки зору у межах гідроенергетичного плану. Аналітична послідовність виконання робіт із визначення різних видів гідроенергетичного потенціалу річок дозволила розробити алгоритм оцінки та прогнозування потенціалу, який доцільно застосовувати при оцінюванні цих показників за басейновим принципом.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 10 МВт В УМОВАХ ВОДОТОКІВ МАЛИХ РІЧОК УКРАЇНИ

3.1. Характеристика вибраної річки та умов її водотоку

Згідно з основними положеннями гідрології, територію України поділяють на шість гідрологічних зон, до складу яких входять річки з подібними гідрографічними та орографічними характеристиками місцевості

На основі проведеного аналізу гідрологічних характеристик стоку малих річок за весь період спостереження були обрані наступні основні річки для кожної зони:

– Поліська гідрологічна зона – р. Тетерів;

– Західна гідрологічна зона – р. Західний Буг;

– Правобережно-Дніпровська гідрологічна зона – р. Південний Буг;

– Лівобережно-Дніпровська гідрологічна зона – р. Псел;

– Сіверськодонецько-Приазовська гідрологічна зона – р. Оскіл;

– гідрологічна зона Українських Карпат: Тисо-Латорицька гідрологічна область – р. Тересва; Дністровсько-Прутська гідрологічна область – р. Стрий.

Басейн річки Південний Буг повністю розташований у межах України. Він знаходиться у південній частині країни та простягається через лісостепову і степову природні зони. До основних гідрологічних параметрів річки належать: довжина – 806 км, площа басейну – 63,7 тис. км², середньорічний стік – 108 м³/с [12].

Територія басейну охоплює дві великі геоморфологічні області: верхня та середня частини розміщені в межах Волинсько-Подільської та Придніпровської височин, тоді як нижня частина лежить у межах Причорноморської низовини. Відтак басейн Південного Бугу умовно поділяють на два гідрологічні райони — Подільський і Причорноморський.

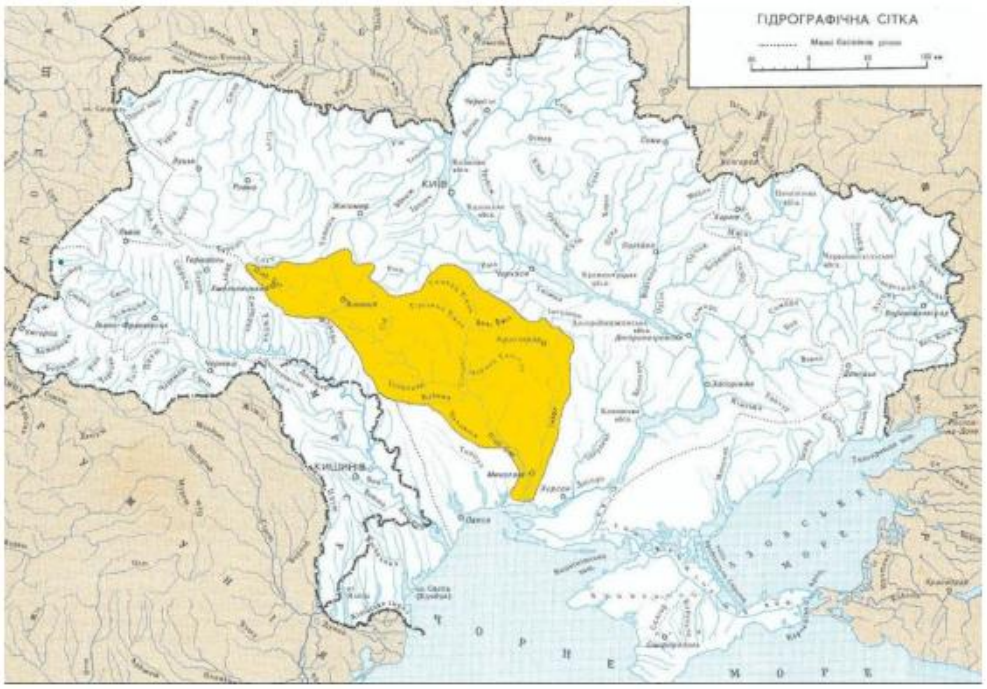


Рисунок 3.1 – Межі басейну стоку річки Південний Буг [12]

Річка вирізняється значною зарегульованістю стоку. У її басейні створено понад 8 тисяч штучних водойм. Тут налічується 188 водосховищ із загальною площею водного дзеркала 30,8 тис. га та сумарним об'ємом 897 млн м³. Безпосередньо на Південному Бузі споруджено 16 руслових водосховищ загальним обсягом 303 млн м³.

Попри значне антропогенне навантаження, у басейні річки ще збереглися мало змінені природні ділянки з унікальними ландшафтами, флорою і фауною Поділля, гранітно-степового Побужжя та причорноморських рівнин [12].

Південний Буг є найбільш оптимальним варіантом для будівництва ГЕС потужністю до 10 МВт, оскільки:

– технічний потенціал річки Південний Буг складає 27,735 МВт з річним обсягом виробництва електроенергії близько 94,34 ГВт·год.

– на його ділянках це реально здійснити через стабільний стік, хороші геологічні умови для створення напору;

– на річці вже працюють ГЕС із подібною потужністю: Ладижинська ГЕС (7,5 МВт) та Олександрівська ГЕС (11,5 МВт);

– річка багаторазово описана у гідрологічних дослідженнях.

Значення гідрологічних характеристик стоку річки Південний Буг наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення гідрологічних характеристик стоку річки Південний Буг

№ п.п	Річка – пункт	Басейн	Площа водозбору, км²	Відстань від гирла, км	Середня багаторічна витрата води, м³/с	Середній річний модуль стоку, л/с·км²
1	Південний Буг – с. Пирогівці	лиман Бузький	827	712	4,65	5,62
2	Південний Буг – с. Лелітка		4000	641	14,3	3,58
3	Південний Буг – с. Селище		9100	550	33,3	3,66
4	Південний Буг – с. Тростянчик		17400	369	48,1	2,76
5	Південний Буг – с. Підгір’я		24600	220	60,2	2,45
6	Південний Буг – Первомайська ГЕС		27300	196	41,3	1,51
7	Південний Буг – м. Первомайськ		44000	195	73,3	1,67
8	Південний Буг – смт. Олександрівка		46200	132	89,1	1,93

У результаті проектних досліджень та досвіду будівництва малих ГЕС на річці Південний Буг відомі всі можливі місця для розташування станцій потужністю до 10 МВт (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Малі ГЕС на річці Південний Буг

ГЕС	Потужність, кВт
Ладижинська (діюча)	7500
Сабарівська (діюча)	1050
Брацлавська (діюча)	400
Глибочанська (діюча)	6130
Чернятська (діюча)	1400
Сандрацька (діюча)	640
Новокостянтинівська (діюча)	525
Щедрівська (діюча)	640
Березівська (діюча)	300
Савранська (діюча)	450
Гайворонська (діюча)	5700
Сутиська (діюча)	1400
Первомайська	600
Костянтинівська	400
Мигійська (діюча)	600
Всього	27735

За результатами даного дослідження були отримані наступні значення коефіцієнтів використання гідроенергетичного ресурсу для всіх базових річок, що наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення коефіцієнтів використання гідроенергетичного ресурсу річки Південний Буг

Річка	Гідрологічна зона	Перепад висоти вертикального профілю, м	Природний потенціал, млн. кВт·год/рік	$K_{евр}$
Південний Буг	Правобережно-Дніпровська	316	647,7	0,15

3.2. Розрахунок гідроенергетичного потенціалу річки

Алгоритм визначення гідроенергетичного потенціалу водотоку:

1) необхідно визначити ділянку річки, яка має найбільший енергетичний потенціал та встановити її технічний потенціал;

2) потрібно розрахувати теоретичний гідроенергетичний потенціал водотоку;

3) необхідно побудувати кадастрові графіки гідроресурсів.

Вхідні дані (табл. 3.5):

– середньорічний модуль стоку q = 5 (л⁄с) на 1 км^2.

– втрати витрати стоку річки ΔQ = 6 (%).

– втрати напору ΔH = 6 (%).

– ККД гідроелектростанції $\eta_{\text{ГЕС}}$ = 0,82.

Таблиця 3.5 – Вихідні дані

№ створів	Відмітки рівнів води ↓РВ, м	Відстань від джерела L, км	Площа басейну F, тис. км^2
1	2190	22	5,5
2	1454	48	11
3	1022	76	1206
4	693	104	20
5	470	125	25
6	124	170	40

Розрахунки зведені в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Визначення гідроенергетичного потенціалу водотоку

№ створу	↓РВ, м	L, км	F, тис. км^2	$L_{ді}$, км	$H_{ді}$, м	$Q_і$, м^3/с	$Q^{ді}$, м^3/с	$H^{ф}_{ді}$, м	$Q^{ф}$, м^3/с	$N_{ді}$, кВт	$N_{ві}$, кВт	$N_{ді}$/, кВт
1	2190	22	5,5	26	736	27,5	41,25	691,84	38,78	263,16	0	10,12
2	1454	48	11	28	432	55	67,5	406,08	63,45	252,76	263,16	9,03
3	1022	76	16	28	329	80	90	309,26	84,60	256,66	515,93	9,17
4	693	104	20	21	223	100	112,5	209,62	105,75	217,46	772,59	10,36
5	470	125	25	21	223	125	112,5	209,62	105,75	217,46	990,05	10,83
6	124	170	40	45	346	200	162,5	325,24	152,75	487,36	1477,4	10,83

Визначаємо ділянку водотоку, яка є найбільш ефективною з енергетичної точки зору, шляхом знаходження ділянки з найбільшим співвідношенням $N_{ді}/L_{ді}$ (згідно з розрахунками, представленими в таблиці 3.6 (це ділянка 5-6).

Технічний потенціал цієї ділянки дорівнює:

$$N_{т} = 9{,}81 \cdot Q^{ф}_{ді} \cdot Н^{ф}_{ді} \cdot \eta_{ГЕС} =$$

$$= 9{,}81 \cdot 162{,}5 \cdot 325{,}24 \cdot 0{,}82 = 425{,}15 \text{ (тис. кВт)}, \qquad (3.1)$$

де $Q_{ді\ ф}$, $H_{ді\ ф}$ – витрата і напір найбільш ефективної у енергетичному відношенні ділянки;

$\eta_{ГЕС}$ – коефіцієнт корисної дії гідроелектростанції.

Розраховуємо теоретичний гідроенергетичний потенціал всього водотоку.

$$Е_{п} = 8760 \cdot \sum_{i=1}^{K} N_{ді} = 8760 \cdot 4452{,}6 = 39{,}0 \text{ (млрд. кВт} \cdot \text{год)}. \qquad (3.2)$$

де 8760 год – число годин використання гідроелектростанції;

К – кількість ділянок водотоку.

Будуємо кадастрові графіки гідроресурсів водотоку (рис. 3.2)

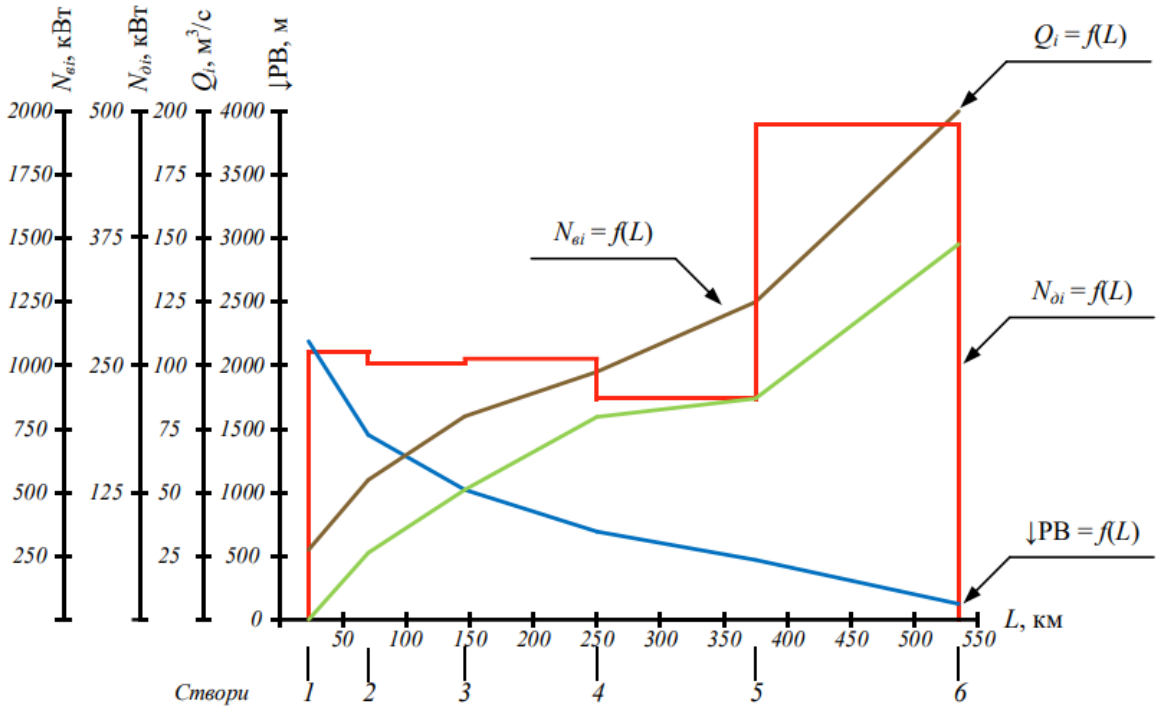


Рисунок 3.2 – Кадастрові графіки гідроресурсів водотоку

Зі збільшенням відстані від джерела (від 22 до 170 км) спостерігається закономірне зростання площі водозбору (F) з 5,5 до 40 тис. км², що призводить до збільшення розрахункових витрат води (Q_i) та загальної потужності ділянок.

На основі розрахунку лінійної щільності потужності (N_{di}/L_{di}) встановлено, що найбільш енергетично ефективною є ділянка 5-6 (між 125 км та 170 км).

Ця ділянка має найвищий показник питомої потужності – 10,83 кВт/км.

Потужність цієї окремої ділянки (N_{di}) є найбільшою серед усіх розрахованих і становить 487,36 кВт.

Висока ефективність ділянки 5-6 обумовлена поєднанням значного перепаду висот (H_{di} = 346 м) та найбільшої витрати води на цьому відрізку.

Аналіз стовпчика накопиченої потужності (N_{vi}) показує динаміку зростання енергетичного потенціалу вздовж русла. До початку останньої ділянки (створ 6) сумарна потужність попередніх каскадів вже становила 1477,4 кВт.

Розрахункові дані підтверджують доцільність розміщення гідроенергетичних об'єктів саме в нижній течії досліджуваної ділянки (створ 5-6), де поєднання напору та витрати води забезпечує максимальну генерацію електроенергії при найвищому коефіцієнті ефективності використання довжини русла.

3.3 Розрахунок параметрів електрообладнання ГЕС на базі машини подвійного живлення

Використання машини подвійного живлення (МПЖ) дозволяє станції працювати зі змінною частотою обертання валу, забезпечуючи максимальний ККД гідротурбіни при змінах напору та можливість регулювання активної та реактивної потужності в мережі. Машини подвійного живлення дозволяє змінювати частоту обертання турбіни, що критично важливо для ефективної роботи при змінному напорі та витраті води, а також для режимів ГЕС.

Схема обмоток машини подвійного живлення наведена на рис. 3.3, де індексом s позначено параметри та змінні статора, а індексом r – параметри та змінні ротора.

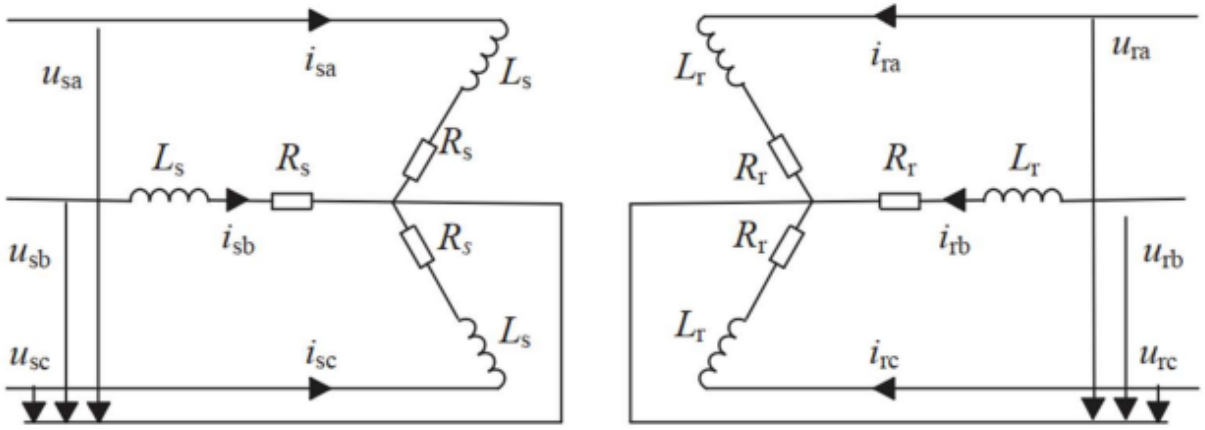


Рисунок 3.3 – Схема обмоток машини подвійного живлення

На основі гідроенергетичних розрахунків приймаємо до встановлення гідроагрегат із наступними характеристиками:

– розрахункова активна потужність P_{nom} = 500 кВт.

– номінальна напруга мережі U_{nom} = 0,4 кВ (стандартна напруга для генерації малої потужності до 1 МВт).

– частота мережі f_1 = 50 Гц

– коефіцієнт потужності cosφ = 0,9 (регульований).

– ККД генератора η = 0,94 (типове значення для машин такої потужності).

– визначення параметрів статора.

– машина подвійного живлення підключається статором безпосередньо до мережі 0,4 кВ.

Повна розрахункова потужність статора:

$$S_{st} = \frac{P_{пот}}{cos\varphi} = \frac{500}{0{,}9} \approx 555, кВт. \qquad (3.3)$$

Номінальний струм статора:

$$I_{st} = \frac{P_{пот}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot cos_{\varphi} \cdot \eta_{ген}} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}94} = 853 \text{ А}. \qquad (3.4)$$

Розрахунок швидкісних режимів та параметрів ротора.

Для забезпечення роботи турбіни в зоні максимального ККД при змінному напорі обираємо діапазон регулювання швидкості обертання

Синхронна частота обертання. Приймаємо машину з кількістю пар полюсів p=4 (тихохідна турбіна):

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \frac{об}{хв}. \qquad (3.5)$$

Діапазон регулювання (ковзання s). Для ефективної роботи малої ГЕС достатнім є діапазон регулювання

Максимальне ковзання: s_{max} = 0,3.

Діапазон обертів валу:

$$n_{min} = n_0 \cdot (1 - s_{max}) = 750 \cdot 0{,}7 = 525 \frac{\text{об}}{\text{хв}}; \quad (3.6)$$

$$n_{\max} = n_0 \cdot (1 + s_{max}) = 750 \cdot 1{,}3 = 975 \frac{\text{об}}{\text{хв}}. \quad (3.7)$$

Розрахунок потужності перетворювача частоти (ПЧ). Перетворювач частоти в схемі МПЖ підключається до ротора і пропускає лише потужність ковзання.

Активна потужність ротора. Максимальна потужність, що проходить через перетворювач, пропорційна максимальному ковзанню:

$$\text{P}_{r_max} \approx P_{\text{пот}} \cdot |s_{max}| = 500 \cdot 0{,}3 = 150 \text{ кВт}. \quad (3.8)$$

Розрахункова повна потужність перетворювача. Враховуючи необхідність регулювання реактивної потужності та можливі перевантаження, вводимо коефіцієнт запасу $k_{zap} = 1{,}2$:

$$S_{conv} = P_{r_max} \cdot k_{zap} = 150 \cdot 1{,}2 = 180 \text{ кВА}. \quad (3.9)$$

Вибір обладнання.

Для реалізації системи керування обираємо перетворювач частоти на базі IGBT-транзисторів із номінальною потужністю 200 кВт (найближче стандартне значення).

Розрахунок показав, що використання машини подвійного живлення дозволяє застосувати перетворювач частоти потужністю 200 кВт для керування гідроагрегатом потужністю 500 кВт. Це знижує вартість силової електроніки в 2,5 рази порівняно з повнопотужним перетворювачем, забезпечуючи при цьому гнучкість керування та високий ККД у діапазоні швидкостей 525–975 об/хв.

3.4. Оцінка ефективності роботи ГЕС

Ефективність роботи майбутніх малих ГЕС на річці Південний Буг оцінювалася за комплексом показників, що включають технічні параметри обладнання, ступінь використання гідрологічного ресурсу та режимні характеристики роботи станцій.

1. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП)

На основі даних про технічний потенціал річки, який складає 27,735 МВт, та прогнозований річний виробіток електроенергії 94,34 ГВт·год, розраховано число годин використання встановленої потужності ($T_{вик}$):

$$T_{вик} = \frac{E_{річ}}{N_{вст}} = \frac{94340}{27,735} = 3401 \frac{год}{рік}. \quad (3.3)$$

Це відповідає коефіцієнту використання встановленої потужності:

$$КВВП = \frac{3401}{8760} \cdot 100\% = 38,8\ \%. \quad (3.4)$$

Отримане значення (38,8%) є характерним для малих ГЕС в умовах гідрологічного режиму рівнинних річок України та свідчить про достатню економічну доцільність експлуатації.

2. Ефективність гідросилового обладнання

У розрахунках прийнято значення ККД гідроелектростанції = 0,82 (82%). Цей показник враховує втрати в турбінах, генераторах та трансформаторах. Такий рівень ККД відповідає сучасному технічному рівню обладнання для малої гідроенергетики, забезпечуючи мінімізацію втрат енергії при трансформації гідравлічної енергії потоку в електричну.

3. Ступінь використання природного потенціалу

Згідно з аналізом гідрологічних зон (табл. 6), річка Південний Буг характеризується найвищим серед досліджуваних рівнинних річок коефіцієнтом

використання гідроенергетичного ресурсу K= 0,15. Це суттєво перевищує показники інших річок і підтверджує, що обрана річка має найкращі передумови для ефективного освоєння гідропотенціалу.

4. Вибір оптимального розташування

Проведений аналіз лінійної щільності потужності (N_{di}/L_{di}) по руслу річки дозволив виявити найбільш енергоефективну ділянку (створи 5–6) з показником 10,83 кВт/км. Концентрація перепаду висот (H = 346 м на ділянці 5–6) при максимальних витратах води дозволяє отримати найбільшу питому потужність, що мінімізує капітальні витрати на одиницю виробленої енергії.

3.5. Висновки до розділу 3

Визначено, що обсяг технічно досяжного потенціалу гідроенергетичних ресурсів для основних малих річок знаходиться у межах 3-15% його загального природного потенціалу. Отримані кількісні значення коефіцієнтів використання гідроенергетичного ресурсу надають підстави для оцінки досяжного обсягу виробництва електроенергії малими ГЕС на території України на основі результатів розрахунку природного гідроенергетичного потенціалу малих річок.

Комплексна оцінка свідчить про високу ефективність проєкту. Поєднання високого коефіцієнта використання ресурсу (0,15), достатнього числа годин роботи на повну потужність (3401 год/рік) та оптимального вибору створів забезпечує надійну основу для генерації електроенергії в обсязі 94,34 ГВт·год на рік.

Таким чином, для дипломного проєкту обрано річку Південний Буг, оскільки вона є однією з найбільш перспективних для розвитку малої гідроенергетики з уже підтвердженим технічним потенціалом. Поєднання високої ефективності, наявних гідрологічних даних та існуючого досвіду експлуатації робить цей об'єкт оптимальним для інженерних розрахунків.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

4.1. Математична модель роботи гідротурбіни

Конструкція електричної машини подвійного живлення подібна до асинхронної машини з фазним ротором. Як статор, так і ротор оснащені симетричними трифазними обмотками. При описі та моделюванні такої машини зазвичай приймають такі припущення:

– статор і ротор мають трифазні симетричні обмотки;

– обмотки фаз розташовані на відстані 120 електричних градусів одна від одної;

– магніторушійна сила рівномірно розподілена синусоїдально у повітряному зазорі;

– не враховуються ефекти насичення магнітного кола, скінефект обмоток, втрати в сталі та вплив температури на параметри машини [13].

У статичній трифазній системі координат деякі змінні залежать від кутового положення ротора, що ускладнює математичну модель і застосування методів керування. Для спрощення опису та аналізу роботи машини застосовують перехід до двофазної обертової системи координат d-q, яка обертається разом із ротором. У цій системі змінні стають сталими в часі для даного положення ротора, що значно полегшує розрахунки та проєктування систем керування. Саме в цій системі будується подальший математичний опис машини, що дозволяє більш ефективно моделювати динаміку, обчислювати струми та напруги, а також реалізовувати сучасні алгоритми векторного керування.

Рівняння напруг статора в системі координат d-q приймають вигляд:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - w_s \psi_{sd},$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} - w_s \psi_{sq}, \quad (4.1)$$

де ω_s – швидкість обертання магнітного поля статора;

i_{sd} та i_{sq} – компоненти струму статора;

ψ_{sd} та ψ_{sq} – компоненти потокозчеплення статора.

Рівняння напруг ротора:

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (w_s - w_r)\psi_{rq},$$
$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} - (w_s - w_r)\psi_{rd}, \quad (4.2)$$

де ω_r – кутова швидкість ротора;

i_{rd} та i_{rq} – компоненти струму ротора;

ψ_{rd} та ψ_{rq} – компоненти потокозчеплення ротора.

Рівняння потокозчеплень статора:

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd},$$
$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \quad (4.3)$$

де L_m – взаємоіндуктивність.

Рівняння потокозчеплень ротора:

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd},$$
$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}. \quad (4.4)$$

Рівняння руху ротора:

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_m - vw_r), \tag{4.5}$$

де J – момент інерції;

ν – коефіцієнт в'язкого тертя;

T_e – електромагнітний момент електричної машини;

T_m – механічний момент.

Електромагнітний момент, створюваний машиною подвійного живлення, виражається рівнянням:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_s}\left(\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rd}\right), \tag{4.6}$$

де p_n – кількість пар полюсів електричної машини.

Активна потужність статора:

$$P_s = \frac{3}{2}\left(u_{sq} i_{sq} + u_{sd} i_{sd}\right) \tag{4.7}$$

Реактивна потужність статора:

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(u_{sq} i_{sd} + u_{sd} i_{sq}\right) \tag{4.8}$$

Механічна потужність машини:

$$P_m = w_r T_c = \frac{3}{2} p_n w_r \frac{L_m}{L_s}\left(\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq}\right), \tag{4.9}$$

З урахуванням виразів цих можна визначити потужність статора через електромагнітний момент:

$$\mathrm{P}_s = \frac{P_m}{1-s} = \frac{w_r T_e}{1 - \frac{w_s - w_r}{w_s}} = w_s T_e. \qquad (4.10)$$

4.2 Аналіз результатів моделювання

Для моделювання електромеханічної системи гідроакумулювальної електростанції з використанням технології подвійного живлення доцільно застосувати спеціалізований програмний комплекс PLECS. Це програмне забезпечення призначене для високоточного моделювання, аналізу й симуляції широкого спектра електротехнічних та енергетичних систем, забезпечуючи можливість відтворення їхньої структури на всіх рівнях – від джерел енергії до кінцевих споживачів.

Середовище PLECS містить розгалужені бібліотеки компонентів, що дозволяють детально описувати та досліджувати електричні, механічні, електромагнітні й термічні процеси, а також реалізовувати повноцінні системи автоматичного керування. Інструментарій комплексу дає змогу будувати складні багатофізичні моделі, поєднувати силову частину з керуючими алгоритмами та аналізувати динамічні режими роботи системи в реальному часі.

Інтеграція з MATLAB/Simulink, що спрощує розробку та тестування алгоритмів керування. Підтримка Model-Based Design, яка дозволяє переходити від моделі до прототипу контролера. Висока швидкість обчислень завдяки оптимізованому симулятору, що робить можливим роботу зі складними електромеханічними схемами. Гнучкі інструменти для аналізу перехідних процесів, енергетичних втрат, КПД, навантажувальних режимів і взаємодії між підсистемами. Таким чином, PLECS є потужним засобом для моделювання електромеханічних комплексів гідроакумулювальних електростанцій,

забезпечуючи високу точність, наочність та можливість поглибленого дослідження роботи системи в різних експлуатаційних умовах.

Модель включає взаємопов’язані підсистеми, зокрема:

– електричну мережу;

– силовий трансформатор;

– активно-індуктивний фільтр;

– перетворювальний модуль, систему керування;

– насос-турбіну;

– електричну машину.

Загальну структуру моделі, призначеної для дослідження електромеханічної системи на основі машини подвійного живлення, подано на рис. 4.1.

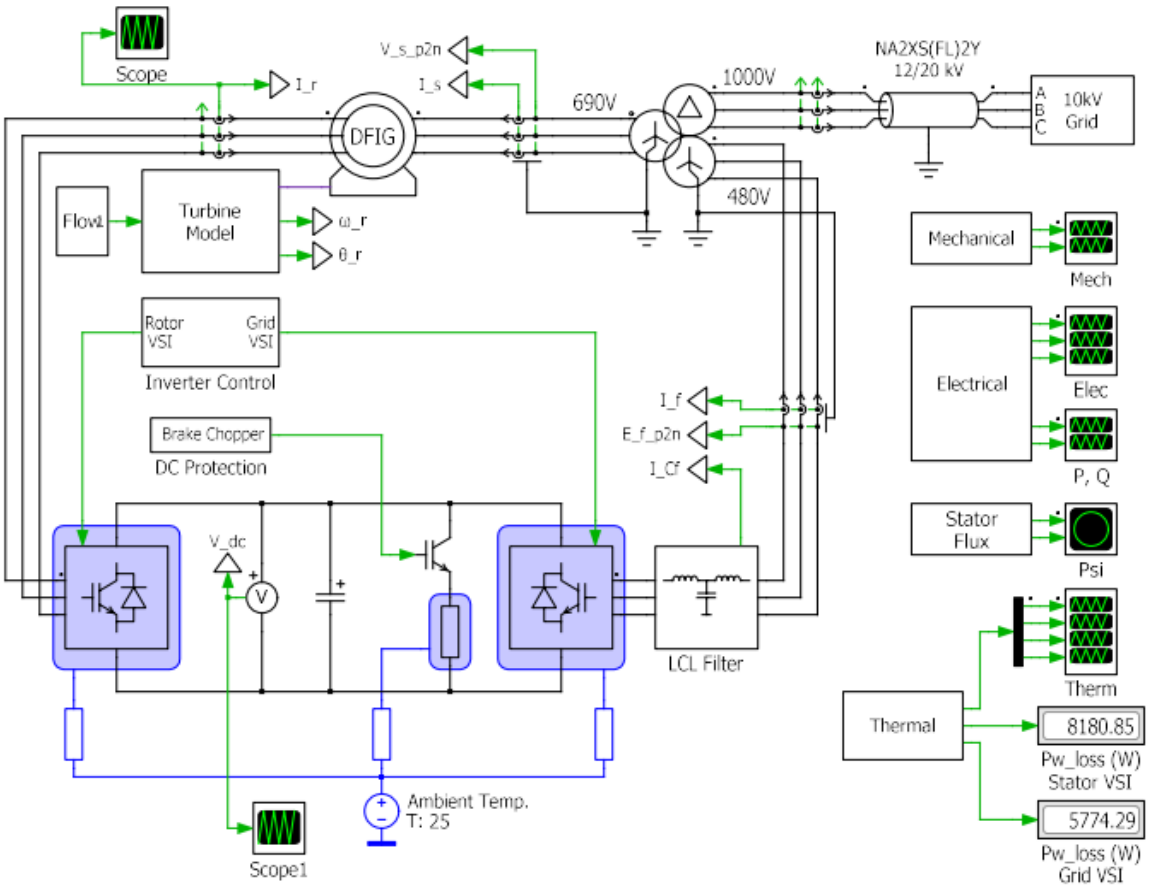


Рисунок 4.1 – Розроблена модель гідроакумулювальної електростанції, що використовує машину подвійного живлення як основний електромеханічний агрегат

Для опису роботи машини подвійного живлення застосовано еквівалентну схему заміщення. Об’єднавши електричну та механічну частини, отримано повну модель машини подвійного живлення, зображену на рис. 4.2.

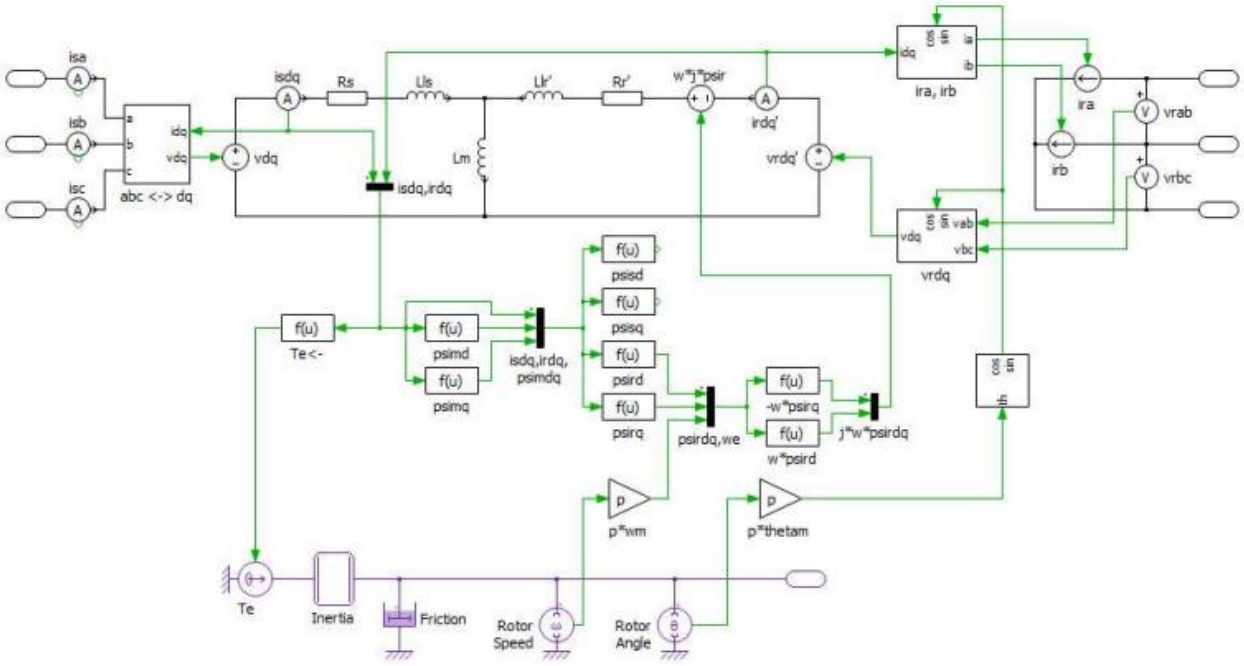


Рисунок 4.2 – Модель машини

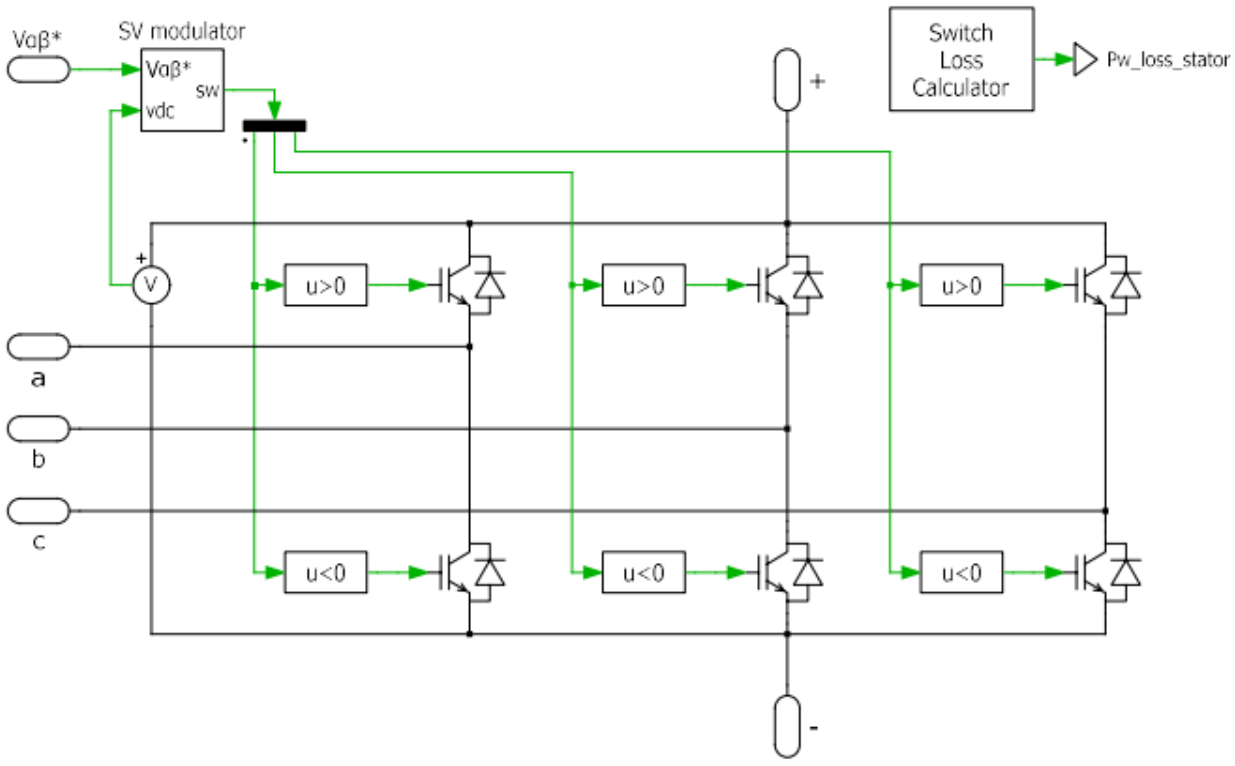


Рисунок 4.3 – Модель перетворювача

Алгоритм керування реалізовано у двох взаємодіючих підсистемах: підсистемі керування перетворювачем, підключеним до мережі (рис. 4.4), та підсистемі керування перетворювачем з боку ротора (рис. 4.5).

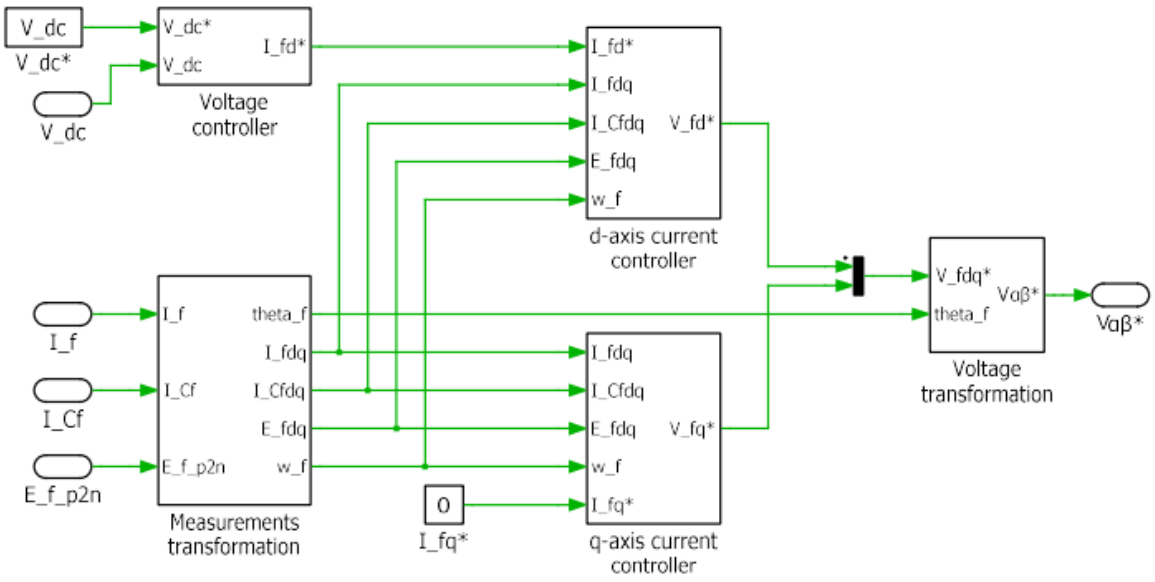


Рисунок 4.4 – Підсистема керування перетворювачем з боку мережі

Подана схема представляє структуру керування перетворювачем з боку мережі, побудовану у системі координат d–q. Вона складається з кількох функціональних блоків, які забезпечують регулювання напруги на шині постійного струму, перетворення виміряних величин, а також керування струмами по d- та q-осях.

Схема реалізує класичний векторний контроль перетворювача з боку мережі, що включає:

- стабілізацію напруги постійної шини через d-компоненту;
- підтримання реактивної потужності або роботи з cosφ = 1 через q-компоненту;
- перетворення виміряних величин у d–q координати;
- генерацію керуючих напруг для ШІМ перетворювача.

Підсистема керування перетворювачем з боку мережі (рис. 4.5) містить блок перетворення величин, що виконує трансформацію вхідних сигналів

системи керування до обертової системи координат d–q. У її складі також працюють регулятор напруги та регулятори струму по d- і q-осях, за допомогою яких формується керуючий вплив у вигляді напруг уздовж відповідних осей. Після цього сигнали проходять через блок зворотного перетворення напруг, який переводить їх до стаціонарної системи координат a–b.

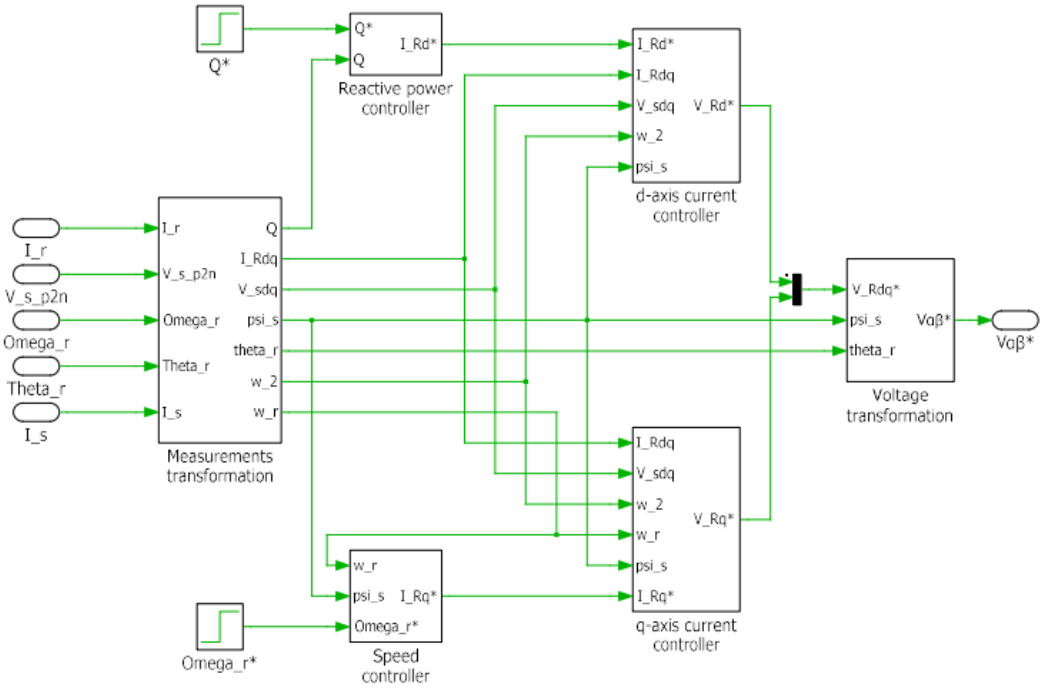


Рисунок 4.5 – Підсистема керування перетворювачем з боку ротора

Підсистема керування перетворювачем з боку ротора (рис. 4.6) має аналогічні блоки перетворення координат на вході та виході. Крім того, вхідний блок виконує оцінювання реактивної потужності електричної машини. Формування керуючих сигналів – напруг по осях d та q – здійснюється в регуляторах струмів, що працюють у відповідних каналах. Додатково реалізовано регулятори реактивної потужності та кутової швидкості.

Для подальшого аналізу проведено симуляцію роботи системи в синхронному режимі за номінальних умов: при напорі 50 м, витраті 4,5 м³/с та нормальному режимі електричної мережі. У цьому режимі гідроагрегат працює як генератор, а системі керування необхідно забезпечити умову нульової

реактивної потужності. Результати симуляції подано на рис. 4.6 – 4.7.

З графіка на рис. 4.7 видно, що ротор обертається із синхронною кутовою швидкістю 157 рад/с. На етапі пуску спостерігаються коливання кутової швидкості з амплітудою до 1,6 рад/с, які поступово затухають. Момент, у свою чергу, також проявляє початкові коливання, причому їх амплітуда є більшою, ніж відхилення кутової швидкості, але зрештою графік входить у зону усталеного значення близько 13 000 Н·м.

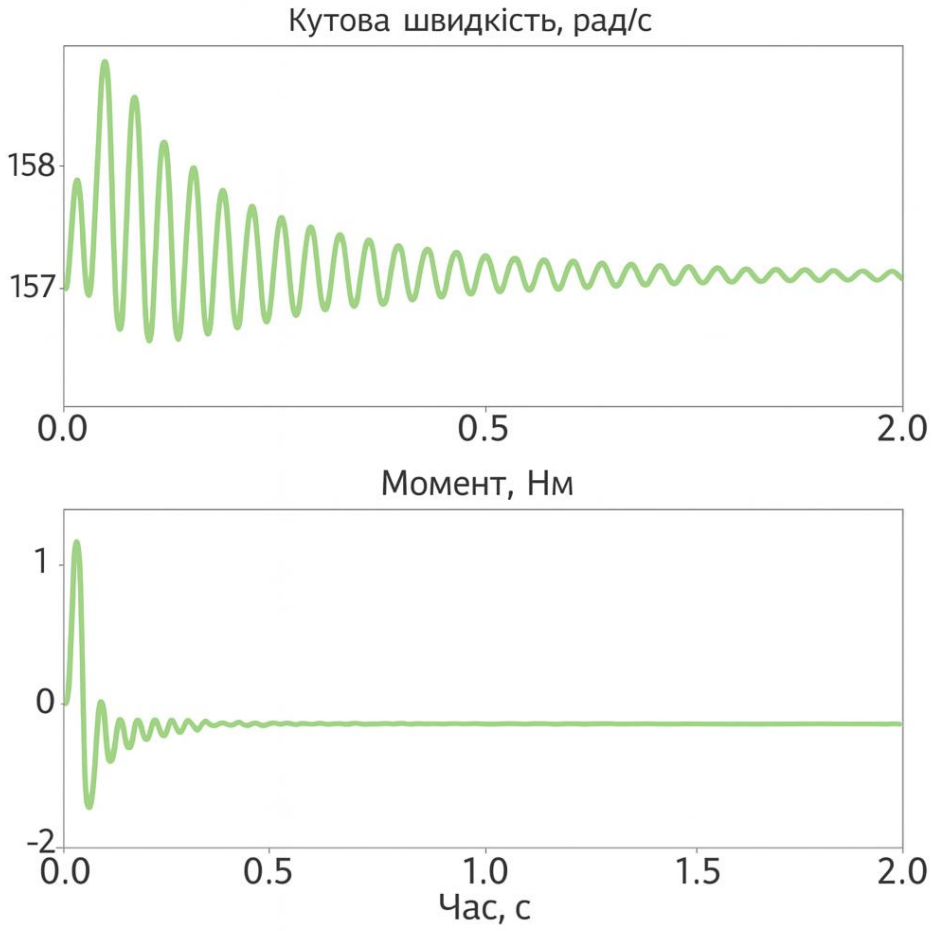


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси зміни моменту та кутової швидкості машини подвійного живлення під час роботи в синхронному режимі генерування

Коливання механічних змінних двигуна спричинені процесами в насос-турбіні.

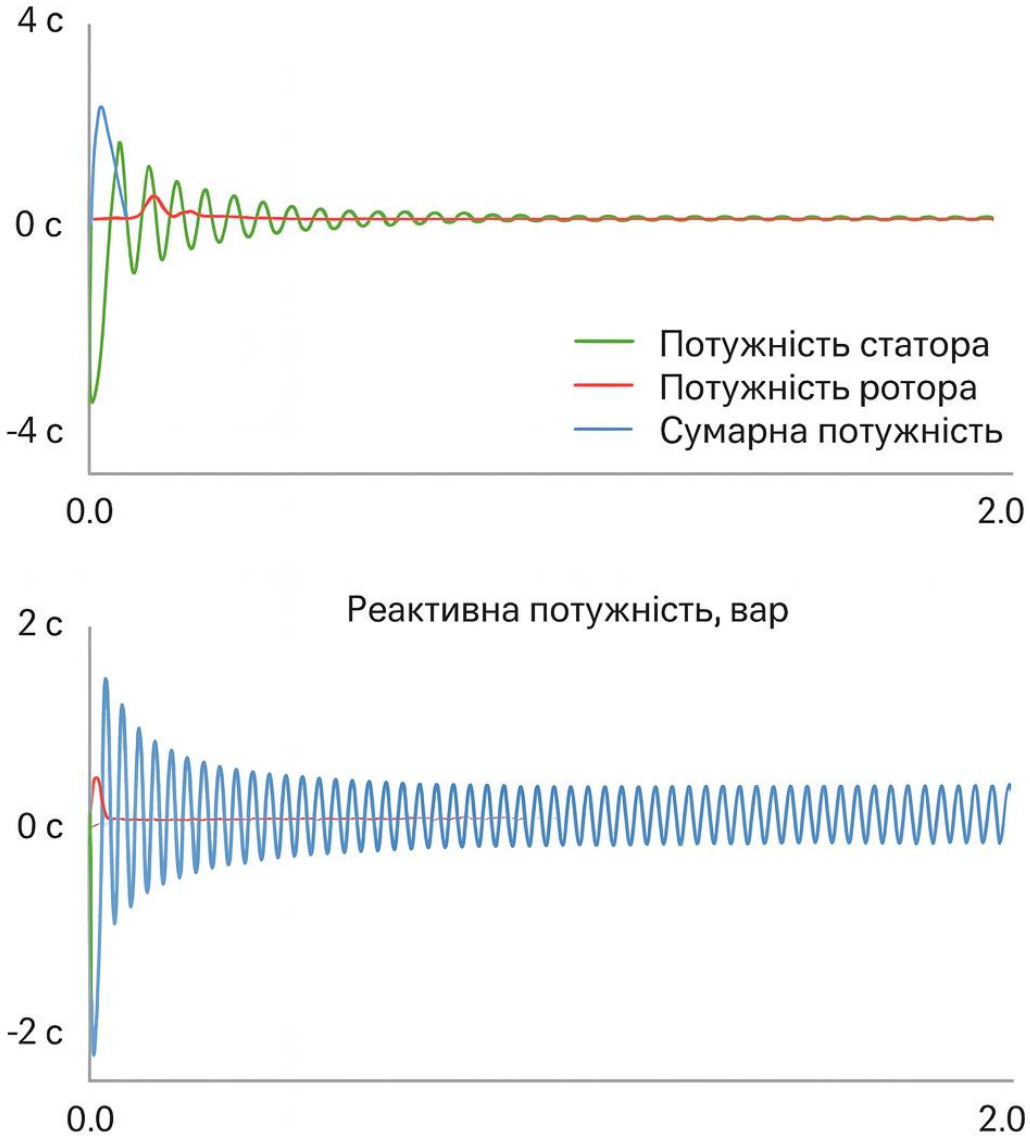


Рисунок 4.7 – Перехідні процеси потужності статора, ротора та всієї машини при генеруванні в синхронному режимі

З рис. 4.7 можна відзначити характерні особливості регулювання активної та реактивної потужності в системі. На початковому етапі роботи спостерігаються коливання реактивної потужності, однак система достатньо швидко стабілізується. Тривалість перехідного процесу для сумарної активної потужності електричної машини становить близько 0,25 с. Реактивна потужність утримується на заданому рівні, що забезпечує необхідний коефіцієнт потужності. В усталеному режимі активна та реактивна потужність ротора дорівнюють нулю, що зумовлено синхронним режимом роботи при нульовому

ковзанні. Таким чином, сумарна активна потужність машини подвійного живлення дорівнює потужності статора і становить 2 МВт.

На рисунку 4.8 подано графік зміни напруги в ланці постійного струму під час перехідного процесу. Усталене значення напруги відповідає раніше розрахованим 950 В. На початку роботи спостерігається короткочасне перевищення цієї напруги, яке не становить небезпеки для елементів перетворювача. Під час перехідного процесу напруга зменшується до мінімального значення 755 В, після чого поступово стабілізується і через 0,75 с виходить на рівень 950 В.

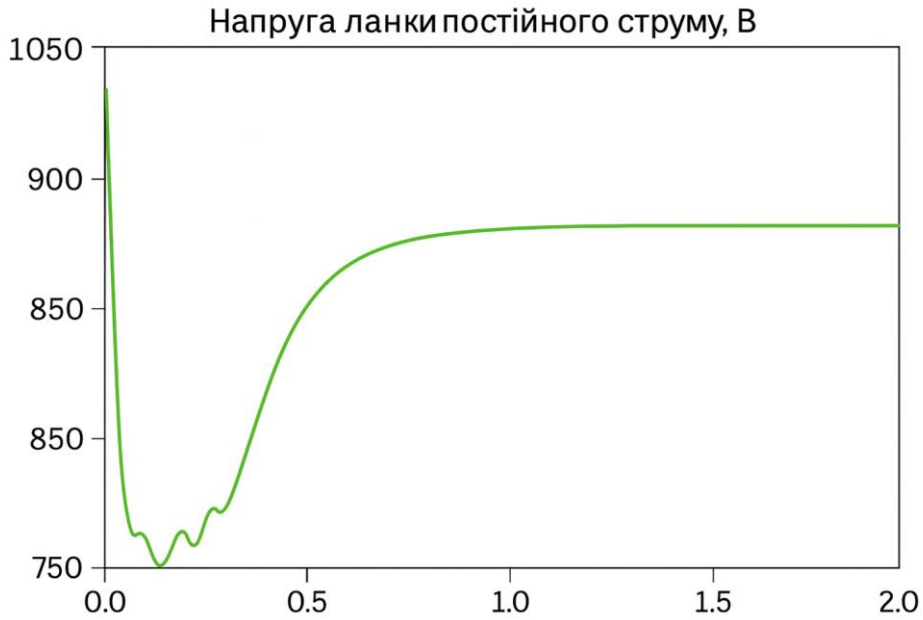


Рисунок 4.8 – Перехідний процес напруги в ланці постійного стуму при генеруванні в синхронному режимі

Можна відзначити, що система керування пріоритетно виконує регулювання активної потужності. Це пояснюється тим, що перехідні процеси за показником потужності проходять значно швидше, ніж зміна інших параметрів системи, таких як струм, напруга чи кутова швидкість. Таким чином, саме потужність визначає динамічну реакцію системи та характер її стабілізації у перші моменти роботи.

Для подальшого аналізу було проведено дослідження функціонування системи як у підсинхронному, так і в надсинхронному режимах під час генерування електричної потужності. Початково система працює у досинхронному режимі, коли швидкість обертання ротора є меншою за синхронну. У момент часу t = 5 с до системи прикладається стрибкоподібна зміна завдання, що приводить до переходу в надсинхронний режим, тобто в область, де частота обертання ротора перевищує синхронну.

Такий перехід дозволяє оцінити здатність системи до адаптації, ефективність регуляторів і стійкість при різких змінах навантаження або параметрів керування. Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 4.9 – 4.11) демонструє характер зміни активної та реактивної потужності, електромагнітного моменту та швидкості обертання. Зокрема, можна простежити, як система демонструє швидке придушення перехідних коливань та повернення до сталого режиму після зміни типу роботи.

Отримані результати підтверджують ефективність застосованого алгоритму керування та його здатність забезпечувати стабільну генерацію потужності в умовах роботи як нижче, так і вище синхронної швидкості.

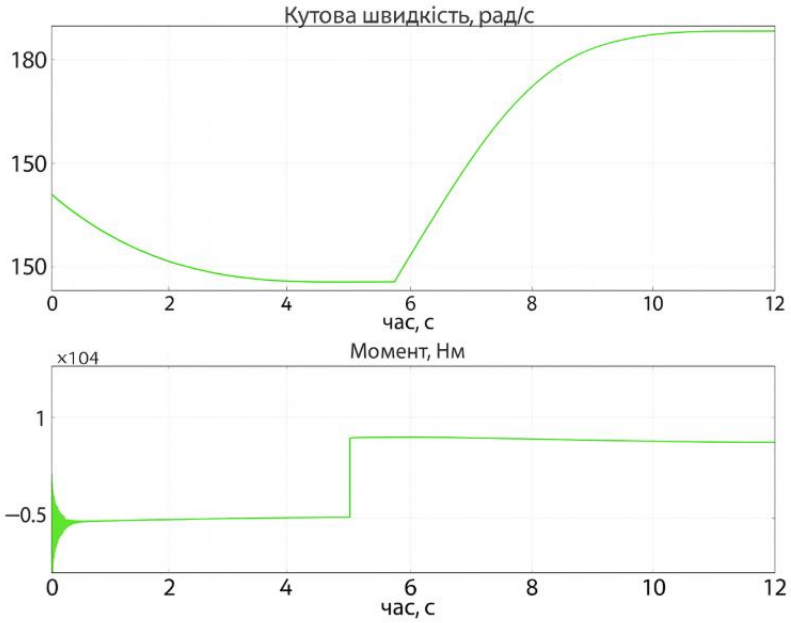


Рисунок 4.9 – Перехідні процеси моменту та швидкості машини подвійного живлення при генеруванні

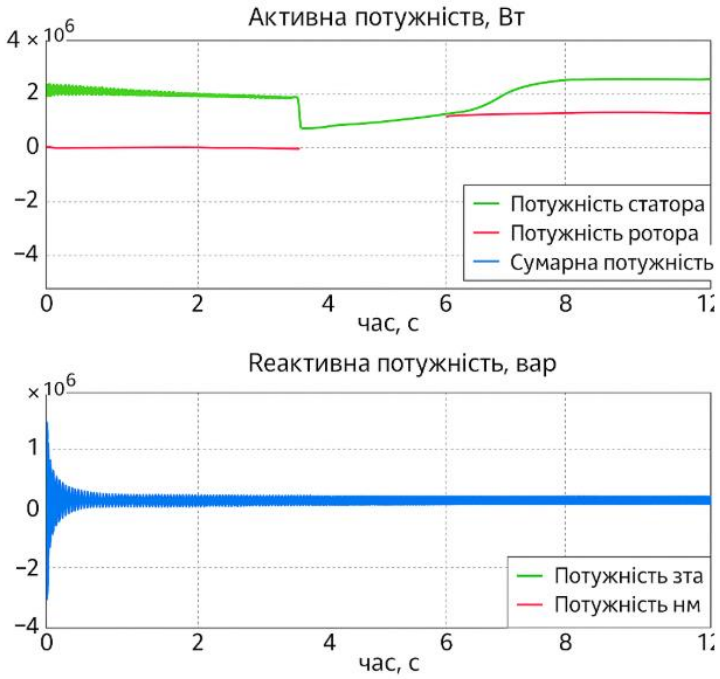


Рисунок 4.10 – Перехідні процеси потужності статора, ротора та всієї машини при генеруванні

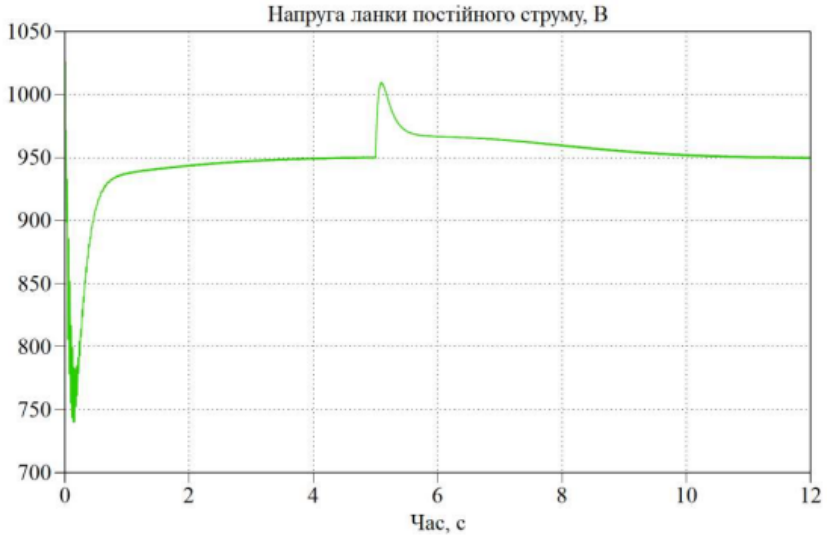


Рисунок 4.11 – Перехідний процес напруги ланки постійного струму при генеруванні

На рисунку 4.12 показано, що в досинхронному режимі роботи активна потужність ротора є від’ємною, що свідчить про споживання потужності з мережі. У цьому режимі сумарна активна потужність, яка генерується машиною

подвійного живлення, менша за потужність, що подається на статор. У надсинхронному режимі потужність ротора та потужність статора мають однаковий знак, і обидві віддають енергію в мережу.

4.3. Висновки до розділу 4

В даному розділі були розроблена математична модель роботи гідротурбіни та проведено моделювання і дослідження режимів роботи електромеханічної системи гідроакумулювальної електростанції з використанням технології подвійного живлення. Матеріал, викладений у цьому розділі, слугує теоретичною основою для математичного моделювання електромеханічних систем гідроакумулювальних електростанцій.

Система працює при швидкостях як нижчих, так і вищих за синхронну, проте перехідні процеси за швидкістю відбуваються повільно. У проведеному досліді швидкість роботи у досинхронному режимі становила 146 рад/с, а в надсинхронному – 175 рад/с. В обох режимах спостерігається більша тривалість перехідних процесів порівняно із синхронним режимом. При різкій зміні завдання відбулося різке зменшення генерованої потужності майже вдвічі, водночас спостерігався пік напруги в ланці постійного струму, який залишався в межах допустимих значень. Моделювання показало, що система підтримує кутові швидкості в межах ±30% від синхронної. Було підтверджено здатність системи швидко реагувати на зміни потреб мережі, а перехідні процеси по потужності мають задовільну якість. Також здійснюється регулювання реактивної потужності, що дозволяє контролювати коефіцієнт потужності.

Дослідження показує, що машини подвійного живлення в досинхронному режимі споживають енергію з мережі, а в надсинхронному – віддають її. Перехідні процеси при роботі поза синхронною швидкістю протікають повільніше, а піки напруги в ланці постійного струму залишаються в допустимих межах, що підтверджує стабільність системи при різких змінах навантаження.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання дослідження режимів роботи та оцінки ефективності гідроелектростанції потужністю 10 МВт в умовах малих річок України з використанням технології подвійного живлення. За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що гідроенергетичний потенціал малих річок України використовується недостатньо, хоча він становить близько 12,5 млрд. кВт·год/рік (28% від загального гідропотенціалу). Розвиток малої гідроенергетики є стратегічно важливим для децентралізації енергопостачання та забезпечення енергонезалежності віддалених регіонів·

2. Для реалізації проєкту обрано річку Південний Буг, яка характеризується стабільним стоком та найвищим коефіцієнтом використання гідроенергетичного ресурсу ($K_{евр}$ = 0,15) серед рівнинних річок. Технічний потенціал річки оцінюється у 27,735 МВт із можливим річним виробітком електроенергії 94,34 ГВт·год.

3. На основі методу сумарного поділянкового обліку визначено параметри водотоку для 6 створів. Виявлено, що найбільш енергетично ефективною є ділянка 5–6 (125–170 км від витоку), де питома потужність досягає 10,83 кВт/км. Це підтверджує доцільність розміщення генеруючих потужностей саме в нижній течії досліджуваної ділянки.

4. Обґрунтовано використання асинхронізованої машини подвійного живлення (МПЖ) як основного гідрогенератора. Це технічне рішення дозволяє турбіні працювати зі змінною частотою обертання, адаптуючись до коливань напору та витрати води, що неможливо для класичних синхронних генераторів.

5. Розрахунки показали, що для керування гідроагрегатом потужністю 500 кВт на базі МПЖ достатньо використовувати перетворювач частоти потужністю близько 200 кВт (розрахований лише на потужність ковзання). Це

дозволяє знизити вартість силової електроніки в 2,5 рази порівняно з системами на базі синхронних машин з повним перетворенням енергії[8].

6. Розроблена у середовищі PLECS імітаційна модель підтвердила працездатність системи в діапазоні регулювання швидкості p_m = 30% від синхронної[9]. Дослідження перехідних процесів показало, що система стійко працює як у підсинхронному (споживання енергії ротором), так і в надсинхронному (генерування енергії ротором) режимах, забезпечуючи швидку стабілізацію напруги та моменту при зміні навантаження[10].

7. Запропонована система керування дозволяє не лише ефективно виробляти активну потужність, але й регулювати реактивну потужність у мережі, що підвищує якість електропостачання та стійкість місцевої енергосистеми[11].

Таким чином, використання машин подвійного живлення на малих ГЕС річки Південний Буг є технічно виправданим та економічно доцільним рішенням, що дозволяє максимально ефективно реалізувати наявний гідропотенціал.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про електроенергетику». Верховна Рада України. URL: http://zakon1.rada.gov.ua/ laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80 (дата звернення 26.06.2025).

2. Постанова Кабінету Міністрів України №444 від 14.05.2008. Верховна Рада України. URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/444-2008-%D0%BF (дата звернення 26.06.2025).

3. Програма розвитку гідроенергетики України на період до 2026 р. URL: http://zakon0.rada.gov.ua/ laws/show/552-2016-%D1%80 (дата звернення 02.11.25).

4. Мороз А.В. Технічний потенціал гідроенегргетичних ресурсів малих річок України. / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – К, 2015. 21 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/aref.pdf (дата звернення 26.06.2025).

5. Small Hydropower Market Share Analysis Report, 2024-2033. Nova One Advisor – Market Research Reports & Consulting Firm. URL: https://www.novaoneadvisor.com/report/small-hydropower-market. (дата звернення 26.06.2025).

6. Плачкова С. Г. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Книга 5. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі. Київ, 2013 URL: http://energetika.in.ua/ua/books/book-5 (дата звернення 26.06.2025).

7. Галінський І. Б. Підвищення енергоефективності малої гідроенергетики на базі пропелерних гідротурбін і підвідних трубопроводів сифонного типу : дипломна робота магістра за спеціальністю «141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ І. Б. Галінський. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. 105 с.

8. Гідравлічні електричні станції: практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма «Електричні станції» / КПІ ім. Ігоря

Сікорського ; Укладачі: Денисюк П. Л., Болотний М. П., Бондаренко О. Л. - Електронні текстові дані (1 файл: 7,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 132с.

9. Філіпович Ю. Ю. Енергоресурси та гідрологічні основи гідроенергетики. Практикум: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. 196 с.

10. Самойленко Є. Г. Основи проектування гідроенергетичних вузлів : підручник. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. 388 с.

11. Самойленко Є. Г. Гідроенергетичне обладнання гідрота гідроакумулюючих електростанцій. – Запоріжжя : Видавництво ЗДІА, 2006. – 410 с.

12. Лутаєв В. В. Гідроелектростанції (Будівлі ГЕС з горизонтальними капсульними агрегатами) : навч. посібник / В. В. Лутаєв, С. В. Сунічук. – Рівне : НУВГП, 2013. 173 с.

13. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том І». Інститут проблем екології та енергозбереженн. / ред. С. Єрмілов. – Київ, 2018. 105 с. URL: https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf (дата звернення 26.06.2025).

14. Малі річки України: Довідник / [А. В. Яцик, Л. Б. Бишовець, Є. О. Богатов та ін.]; за ред. А. В. Яцика. - К.: Урожай, 1991. - 296 с. 28 Водний фонд України: Довідковий посібник./Паламарчук М.М. , Закорчевна Н.Б. Київ. 2006. 320 с.

15. Павлов Г.О., Кулагін Д.О. Оцінка гідроенергетичного потенціалу малих річок україни та стану і перспектив розвитку малої гідроенергетики. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 30 (69) Ч. 1 № 6 2019. С. 203-210. DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-1/37. (дата звернення 26.06.2025).

16. KCT is the world’s first patented vortex turbine. URL: https://www.kourispower.com/technology (дата звернення 26.06.2025).

17. Гідроенергетичний потенціал річок україни: розвінчання міфів : аналітичний документ / Р. Б. Гаврилюк, Г. К. Веремійчик, та ін. – Київ : Видавництво «Фенікс», 2018. 32 с.

18. Тарасенко М.Г., Зінь М.М. Підгайний Ю.Б. Переваги і проблеми кількісного розвитку малої гідроенергетики та шляхи їх розв'язання // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 2(85). – С. 31–40.

19. Obodovskyi, O., Danko, K., Pochaievets, O., Obodovskyi, Yu. (2016). Methods of assessment hydropower potential of the rivers (the example of Ukrainian Carpathians rivers). Visnyk Kyivskogo natsionalnogo universytetu, Geografiya [Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography], 1 (64), 5-12. DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2721.2016.64.1.

20. Ободовський О.Г. Методика встановлення гідроенергетичного потенціалу річок (на прикладі річок Українських Карпат) / О.Г. Ободовський, К.Ю. Данько, О.О. Почаєвець, Ю.О. Ободовський. – Вісник Київського університету. Сер. «Географія». – 2016. – Вип. 1(64). – С. 5-12.

21. Адаменко Т.І. Переосмислення водної безпеки для України / Т.І. Адаменко, А.О.Демиденко, М.І.Ромащенко, Г.М.Цвєткова та ін. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://mama86.org/images/publications/gwp/Rethinking_Water_Sequrity_ukr.pdf. (дата звернення 26.11.2025).

22. Small Hydropower Market Share Analysis Report, 2024-2033. Nova One Advisor – Market Research Reports & Consulting Firm. URL: https://www.novaoneadvisor.com/report/small-hydropower-market. (дата звернення 14.11.2025)

23. Zhu, Yuxin & Zhou, Yanlai & Xu, Chong-Yu & Chang, Fi-John. (2024). Optimizing complementary operation of mega cascade reservoirs for boosting hydropower sustainability. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 64. 103719. 10.1016/j.seta.2024.103719.

24. Пазич. С.Т. Фізика і техніка відновлюваної енергетики: Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023. 36 с.

25. Open AI. (2023). ChatGPT [велика мовна модель]. https://www.openai.com/chatgpt .

26. Держенергоефективності України [Електронний ресурс]: Гідроенергетика. Режим доступу: http://saee.gov.ua/uk/ae/hydroenergy/.

27. Кудря С.О. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії / С.О. Кудря, В.М. Еоловко. - Киев, 2019. 201 с.

28. Зінь М.М. Технічне й екологічне обґрунтування вибору типорозмірів гідротурбін для низьконапірних малих ГЕС // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4. – С. 94–101. 4. M. Zin, V. Koval, M. Tarasenko, I. Sysak. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24– 32.

29. V. Koval, M. Zin, L. Kostyk, O. Buniak. Ensuring the energy efficiency of heat supply energy systems functioning by justifying the choice of glazing units for the external enclosing structures of buildings // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 110. — No 2. — P. 57–67.

30. Зінь М.М. Технічне й екологічне обґрунтування вибору типорозмірів гідротурбін для низьконапірних малих ГЕС // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4. – С. 94–101.