

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Луканюк Тетяна Василівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.10
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка гідроенергетичного потенціалу малих річок України з
використанням сучасних вимірювальних систем

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Т. В. Луканюк

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Ващишак Ірина Романівна, доцент

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

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ В. С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірвальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Луканюк Тетяні Василівній

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка гідроенергетичного потенціалу малих річок України з використанням сучасних вимірвальних систем

керівник роботи доцент Ващишак Ірина Романівна, доцент _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ІФНТУНГ від "29" квітня 2025 року № 268/7

2. Строк подання студентом роботи "09" червня 2025 року _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Проаналізувати гідроенергетичний потенціал малих річок України.

2. Дослідити існуючі рішення оптимізації продуктивності водних шляхів для зменшення втрат енергії

3. Розглянути застосування сучасних вимірвальних систем для визначення водного ресурсу та його генеруючого потенціалу

4. Розрахувати енергетичну потужність за допомогою програмного забезпечення RETScreen Expert та порівняти із значенням, яке пораховане за формулою

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання “29” квітня 2025 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2025 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «Аналіз гідроенергетичного потенціалу малих річок України».	30.04.2025 – 08.05.2025 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «Застосування сучасних вимірювальних систем для визначення водного ресурсу та його генеруючого потенціалу».	09.05.2025 – 20.05.2025 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «Дослідження впливу характеристик потоку на роботу малої гідроелектростанції».	21.05.2025 – 29.05.2025 р.	
5	Оформлення роботи.	30.05.2025 – 06.06.2025 р.	

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Луканюк Т. В. «Оцінка гідроенергетичного потенціалу малих річок України з використанням сучасних вимірювальних систем». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2025.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена темі оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок України з акцентом на використанні сучасних вимірювальних систем. Структурно робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг становить 56 сторінок, включаючи 29 рисунків і 2 таблиці. Бібліографія охоплює 19 офіційних та наукових джерел.

Перший розділ роботи охоплює аналіз гідрографічних умов України та окреслює наявний стан розвитку малої гідроенергетики, особливу увагу приділено Карпатському регіону як найбільш перспективному в контексті висотного перепаду рельєфу та стабільної водності. У другому розділі розглянуто застосування сучасних вимірювальних технологій для отримання достовірних параметрів витрати води, напору, швидкості потоку, тривалості витрат і температурних коливань. Висвітлено ключові питання метрологічної точності, яка суттєво впливає на результати моделювання продуктивності ГЕС. Третій розділ зосереджено на практичному етапі реалізації гідроенергетичного проєкту: здійснено вибір конкретного місця встановлення малої гідроелектростанції, враховуючи природні, інфраструктурні та технічні чинники; проведено підбір основного обладнання, включно з гідротурбіною, генератором та системою регулювання.

Практичною цінністю виконаної роботи є можливість використання результатів для розроблення техніко-економічного обґрунтування будівництва малої ГЕС. Рішення, сформульовані у межах дослідження, базуються на реальних параметрах українських водних об'єктів, відповідають сучасним вимогам до

ефективності та екологічності і можуть бути застосовані як у проектній, так і в навчальній діяльності.

Ключові слова: ГІДРОЕНЕРГЕТИКА, ГІДРОТУРБИНА, МАЛІ РІЧКИ УКРАЇНИ, КАРПАТСЬКИЙ РЕГІОН, ККД, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ГІДРОПОТЕНЦІАЛ, МАЛА ГЕС, ВИТРАТА ВОДИ, НАПІР.

ABSTRACT

Lukaniuk T. V. “Assessment of the Hydropower Potential of Small Rivers in Ukraine Using Modern Measurement Systems”. Bachelor’s Thesis, manuscript form. Field of Study – 152 “Metrology and Information-Measuring Technologies”. – Ivano-Frankivsk, 2025.

The bachelor's qualification work focuses on assessing the hydropower potential of small rivers in Ukraine, with special emphasis on the use of modern measuring systems. The structure of the thesis includes an introduction, three main chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total length of the work is 56 pages, including 29 figures and 2 tables. The bibliography consists of 19 official and academic sources.

The first chapter provides an overview of Ukraine’s hydrological conditions and presents the current state of small-scale hydropower development. Particular attention is paid to the Carpathian region as one of the most promising areas due to its altitude gradient and consistent water flow. The second chapter examines the application of advanced measurement technologies for accurate data collection, including water discharge, head, flow velocity, duration of flow, and temperature fluctuations. It also addresses key issues related to metrological accuracy, which significantly affects the reliability of hydropower modelling. The third chapter is dedicated to the practical aspects of implementing a small hydropower project: selecting a suitable site based on environmental and technical criteria, and choosing the core equipment such as turbines, generators, and control systems.

The practical value of this work lies in the possibility of using its results as a basis for technical and economic justification for the construction of a small hydropower station. The proposed solutions are based on real data from Ukrainian water bodies, meet current energy efficiency and environmental sustainability standards, and can be applied both in engineering practice and academic settings.

Key words: HYDROPOWER, HYDRO TURBINE, SMALL RIVERS OF UKRAINE, CARPATHIAN REGION, EFFICIENCY, ENERGY PERFORMANCE, HYDROPOTENTIAL, SMALL HPP, WATER DISCHARGE, HEAD.

ЗМІСТ

Перелік основних позначень і скорочень символів	10
Вступ.....	11
Розділ 1. Аналіз гідроенергетичного потенціалу малих річок України	13
1.1. Загальний енергетичний потенціал малої гідроенергетики	13
1.2. Перспективні напрямки розвитку малої гідроенергетики в Україні	17
1.3. Оптимізація продуктивності водних шляхів для зменшення втрат енергії.....	20
1.4. Постановка задачі на виконання бакалаврської роботи.....	28
Розділ 2. Застосування сучасних вимірювальних систем для визначення водного ресурсу та його генеруючого потенціалу	30
2.1. Оцінка потоків за допомогою вимірювання витрат	30
2.1.1 Гідрометричний метод.....	31
2.1.2 Об'ємний метод	43
2.1.3 Стандарти вимірювань витрат та метрологічні вимоги до точності.....	44
2.2. Вимірювання характеристики течії потоку.....	45
2.2.1 Побудова гідрографу	45
2.2.2 Побудова кривої тривалості потоку	49
2.2.3 Вимірювання тиску (напору)	50
2.3. Оцінка потужності установки та вироблення енергії.....	56
2.3.1 Метрологічне забезпечення оцінки потужності та вироблення енергії	57
Розділ 3. Дослідження впливу характеристик потоку на роботу малої гідроелектростанції.....	61
3.1. Вибір місця розташування малої ГЕС	61
3.1.1 Географічне розташування та особливості річки Черемош	61
3.1.2 Створення напору.....	64
3.1.3 Вибір місця розташування малої ГЕС з використанням програмного забезпечення RETScreen Expert та Google Earth.....	67

	9
3.2. Підбір основного обладнання малої ГЕС	75
3.3. Оцінка гідропотенціалу малої ГЕС	80
Висновки	87
Перелік використаних джерел	88

GPS – Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)

HPP – Hydropower Plant (Гідроелектростанція)

IHA – International Hydropower Association (Міжнародна асоціація гідроенергетики)

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Система диспетчерського контролю та збору даних)

WMS – Water Measurement System (Система вимірювання водних ресурсів)

ГЕС – Гідроелектростанція

МГЕС – Мала гідроелектростанція

ККД – Коефіцієнт корисної дії

НВП – Науково-виробниче підприємство

ПГС – Потенціал гідроенергетичної системи

ТВ – Температурний вплив

ТГ – Турбогенератор

УЕБ – Український енергетичний баланс

ШП – Штучний пережат (гідротехнічна споруда)

Актуальність роботи

Мала гідроенергетика вважається одним із ключових елементів стратегії розвитку відновлюваної енергетики в Україні, насамперед через наявність значного гідропотенціалу, притаманного малим річкам, особливо у регіонах з вираженим рельєфом, таких як Карпати. Доцільність її впровадження зумовлена не лише екологічними міркуваннями, а й прагненням до підвищення енергетичної автономії регіонів, скорочення залежності від імпорتنих енергоносіїв та створення умов для сталого енергетичного розвитку. Разом з тим ефективне використання потенціалу малих річок неможливе без комплексного підходу до оцінки їх водних ресурсів. Сьогодні це вимагає впровадження точних методів вимірювання ключових гідрологічних параметрів, таких як витрата, напір і варіативність потоку. Застосування сучасних вимірювальних технологій дозволяє не лише покращити якість отриманих даних, але й підвищити точність моделювання продуктивності гідроелектростанцій, що, у свою чергу, забезпечує кращу адаптацію проєктів до реальних умов експлуатації. Саме тому необхідність модернізації методичних підходів до оцінки гідроенергетичного потенціалу малих річок сьогодні набуває особливої актуальності та вимагає комплексного науково-практичного осмислення.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування доцільності використання сучасних методів вимірювання витрати води з урахуванням втрат як більш точного підходу до оцінки гідроенергетичного потенціалу малих річок України порівняно з розрахунками, що базуються на усереднених або сталих значеннях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан гідроенергетичного потенціалу малих річок України;
- дослідити методи вимірювання витрати води, напору та інших характеристик потоку, що впливають на гідроенергетичну ефективність;
- розглянути метрологічні вимоги до точності вимірювань та обґрунтувати вибір відповідного обладнання для оцінки водного ресурсу;

- оцінити вплив параметрів водного потоку на ефективність роботи малої ГЕС;
- здійснити вибір місця розташування малої ГЕС;
- порахувати електричну потужність та зробити висновок щодо доцільності сучасних методів вимірювання при проектуванні малої ГЕС.

Об'єктом дослідження є гідроенергетичний потенціал р. Черемош та процеси, пов'язані з його оцінкою й використанням для виробництва електроенергії.

Предметом дослідження є розрахунок витрати води та швидкості потоку як більш точного підходу до оцінки гідроенергетичного потенціалу малих річок України порівняно з використанням усереднених або сталих значень.

Методи дослідження

У процесі виконання дослідження застосовувалися як теоретичні, так і практичні методи. До теоретичних належать аналіз наукових джерел щодо потенціалу малої гідроенергетики, оцінка гідрографічних умов та вивчення вимог до метрологічного забезпечення вимірювань. Серед практичних методів використовувалися розрахункові підходи для визначення енергетичної потужності, самостійне вимірювання витрати води, напору та розрахунок потужності ГЕС за допомогою програмного забезпечення RETScreen Expert з врахуванням втрат та метод порівняння отриманих значень.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення роботи полягає у формуванні комплексного підходу до оцінки гідроенергетичного потенціалу малих річок з використанням сучасних вимірювальних систем. Отримані результати можуть бути використані для проектування нових малих ГЕС, оптимізації їхньої роботи відповідно до реальних гідрологічних умов, а також для підвищення точності розрахунків у процесі енергетичного планування на регіональному рівні.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МАЛИХ РІЧОК УКРАЇНИ

1.1. Загальний енергетичний потенціал малої гідроенергетики

Мала гідроенергетика посідає важливе місце в структурі національної енергетичної системи України, яка нині активно трансформується в напрямку сталого розвитку й децентралізації. Потреба у зменшенні енергозалежності та мінімізації впливу на довкілля зумовлює актуальність пошуку екологічно безпечних джерел енергії, серед яких особливу роль відіграють малі гідроелектростанції (МГЕС).

Україна володіє значним гідроресурсним потенціалом, особливо в межах Карпатського регіону, де зосереджена велика кількість малих річок. Загальна чисельність таких водотоків перевищує 63 тисячі, а їх сукупна довжина становить понад 136 тисяч кілометрів [1]. Найбільш сприятливі умови для розвитку малої гідроенергетики спостерігаються у Львівській, Івано-Франківській, Чернівецькій та Закарпатській областях, де рельєф та гідрологічні показники відповідають вимогам для будівництва дериваційних гідроагрегатів.

Оцінки теоретичного потенціалу малих річок України коливаються в межах 12–14 ТВт·год на рік [2]. Водночас технічно досяжний потенціал, який враховує чинні технічні можливості, економічні обмеження та екологічні вимоги, становить близько 8–10 ТВт·год [3]. Реалістично оцінений економічний потенціал не перевищує 3–4 ТВт·год, однак навіть ці показники можуть суттєво вплинути на регіональний енергетичний баланс і забезпечити енергетичну автономію окремих громад [4].

Серед гірських регіонів Карпати мають найбільшу придатність до впровадження малої гідроенергетики завдяки значним перепадам висот та сталим гідрологічним характеристикам. Такі річки, як Прут, Черемош і Тиса, демонструють високі значення енергетичного потенціалу через ухили русел, що подекуди досягають 5–10 м/км. Подібні параметри ідеально відповідають умовам експлуатації турбін типу Пелтона [5]. Проте ефективне використання цих ресурсів

пов'язане з низкою викликів, серед яких сезонні коливання стоку, а також екологічні ризики.

У весняно-літній період можливі надмірні обсяги води через паводки, що створює сприятливі умови для генерації, тоді як узимку об'єми стоку значно знижуються. У зв'язку з цим виникає потреба в точному прогнозуванні та контролі витрат води. Для цього застосовуються інноваційні засоби вимірювання: гідроакустичні сенсори, автоматизовані метео- та гідрологічні пости, обладнані системами дистанційного збору даних [6].

Ще одним актуальним аспектом є вплив гідроенергетичних споруд на екологічний стан річкових екосистем. Зведення гребель і прокладання дериваційних каналів може змінити природний гідрологічний режим і ускладнити міграцію риб, погіршуючи якість водного середовища. У відповідь на ці загрози сучасне проектування МГЕС включає комплекс заходів для мінімізації впливу на довкілля. Серед них — спорудження рибоходів, використання безгреблевих технологій, зокрема гідрокінетичних турбін, що не перешкоджають руху водних організмів [7].

Станом на сьогодні в Україні діє орієнтовно 100 малих гідроелектростанцій загальною встановленою потужністю близько 200 МВт, що становить лише 0,5% від сумарної потужності національної енергосистеми [8]. Більшість об'єктів функціонує на базі обладнання, введеного в експлуатацію ще в другій половині ХХ століття, що зумовлює низьку енергоефективність і підвищену зношеність. Тому нагальною є потреба в модернізації існуючої інфраструктури та впровадженні високотехнологічних рішень.

Відповідні пріоритети закріплено в Енергетичній стратегії України до 2050 року, де передбачено оновлення діючих об'єктів, запуск модернізованих станцій із високим ступенем автоматизації, а також інтеграцію МГЕС у загальнодержавну систему постачання електроенергії [10]. Очікується, що ці заходи сприятимуть підвищенню частки «зеленої» енергетики та зміцненню енергетичної безпеки, особливо в гірських районах, де централізоване електропостачання є економічно необґрунтованим.

Поточна статистика підтверджує, що більшість діючих малих ГЕС розташовані саме в Карпатському регіоні, де природні умови найбільш сприятливі

для їхньої ефективної роботи. Наприклад, Тур'я-Полянська ГЕС, збудована на річці Тур'я в Закарпатті, має встановлену потужність 1,2 МВт і забезпечує електроенергією найближчі населені пункти [12]. Незважаючи на окремі успішні приклади, загальний внесок малої гідроенергетики в енергосистему залишається незначним, що обумовлено обмеженою кількістю нових проектів та недостатньою увагою до точного моніторингу гідроресурсів.

З метою ілюстрації практичної реалізації потенціалу у дипломі представлено приклади діючих малих ГЕС, розміщених на річках з високою водністю та значним ухилом русла — типовими умовами для гірських територій України (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Приклади малих ГЕС в Україні

Назва ГЕС	Річка	Область	Потужність, МВт	Рік введення
Тур'я-Полянська	Тур'я	Закарпатська	1.2	2011 рік
Слобідська	Черемош	Івано-Франківська	0,8	2014 рік
Верхньобистрянська	Ріка	Закарпатська	0,6	2016 рік
Сянська	Сян	Львівська	1.0	2018 рік
Косівська	Пістинька	Івано-Франківська	0,7	2020 рік

Використання новітніх вимірювальних технологій, зокрема гідроакустичних сенсорів, електромагнітних витратомірів, а також дронів для аерофотозйомки, відкриває нові можливості для підвищення точності оцінювання параметрів водного потоку, зокрема витрати, напору та інших характеристик. Зокрема, гідроакустичні методи дозволяють досягти похибки вимірювання на рівні не більше $\pm 1\%$, що істотно підвищує точність прогнозування енерговиробітку на малих ГЕС [13]. Водночас автоматизовані гідрологічні станції забезпечують безперервний збір даних у режимі реального часу, що дає змогу оперативно реагувати на зміни гідрологічного режиму та оптимізувати роботу станцій.

Розвиток малої гідроенергетики виконує також важливу функцію щодо управління паводковими ризиками та водночас слугує каталізатором для розвитку

місцевої інфраструктури. У гірських регіонах, зокрема в Карпатах, малі гідроелектростанції можуть виконувати роль акумулювальних елементів у складі мікроенергосистем, що дозволяє розвантажити центральні мережі. Проте реалізація повного потенціалу можлива лише за умов комплексного подолання низки проблем: технічного оновлення обладнання, реформування дозвільної системи, а також впровадження рішень, що мінімізують негативний вплив на довкілля.

Особливої актуальності набуває необхідність просторового аналізу потенціалу малих річок. Диференціація гідроенергетичних ресурсів за регіонами дозволяє виявити території з найбільш сприятливими умовами для розміщення малих ГЕС. Географічна структура ресурсного потенціалу є ключовим чинником для визначення інвестиційних пріоритетів та ефективного планування регіонального розвитку. На рисунку 1.1 подано розподіл гідроенергетичних можливостей малих річок України в розрізі адміністративно-територіальних одиниць. Така візуалізація дозволяє ідентифікувати зони з найвищою концентрацією ресурсів, що, своєю чергою, створює підґрунтя для розробки регіональних стратегій із урахуванням природних, соціально-економічних та технічних особливостей кожного регіону.

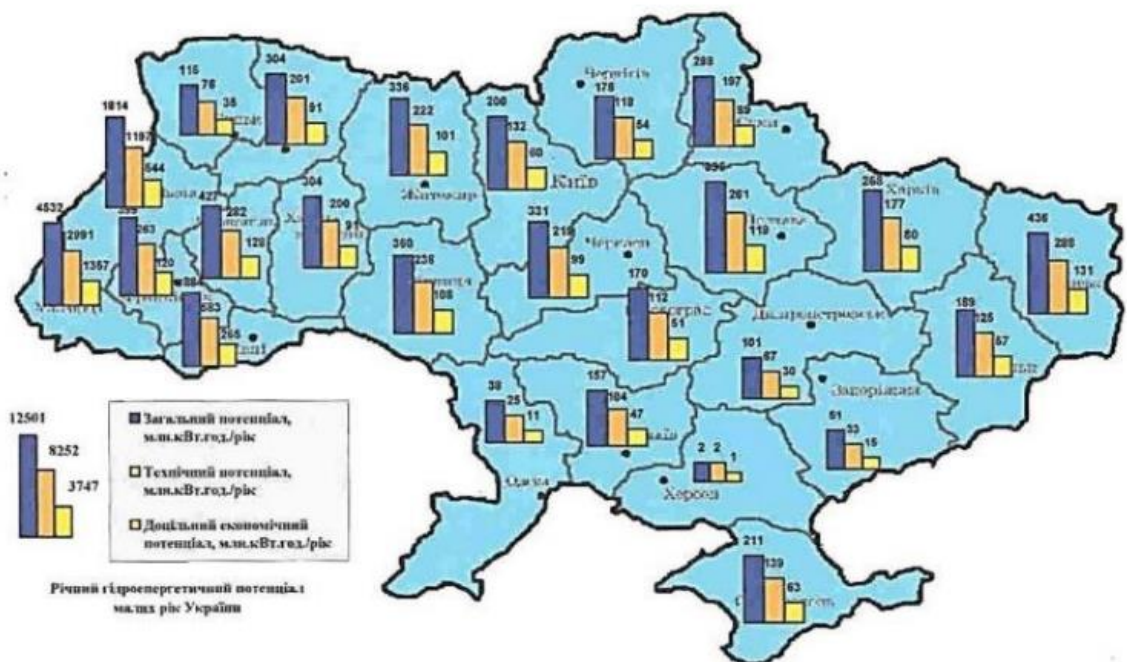


Рисунок 1.1 – Розподіл гідроенергетичного потенціалу малих річок України за регіонами [14]

У підсумку варто зазначити, що гідроенергетичний потенціал малих річок України, зокрема в Карпатському регіоні, залишається вагомим і стратегічно важливим ресурсом. Проте для його повноцінної реалізації необхідно вдосконалити підходи до оцінювання водних ресурсів, оновити фізичну інфраструктуру та забезпечити дотримання екологічних норм. Інтеграція сучасних технологічних рішень, зокрема систем, апробованих у США, здатна суттєво підвищити рівень ефективності та стати каталізатором для розвитку української енергетики в умовах сталого переходу до відновлюваних джерел енергії.

1.2 Перспективні напрямки розвитку малої гідроенергетики в Україні

Розвиток малих гідроелектростанцій в Україні дедалі частіше розглядається як один із ключових векторів переходу до децентралізованої, екологічно орієнтованої енергосистеми. Попри те, що частка таких станцій у загальному обсязі генерації невелика, їх роль у підвищенні енергетичної самодостатності регіонів, зменшенні викидів вуглецю та диверсифікації джерел живлення є надзвичайно значущою. З огляду на це, мала гідроенергетика сприймається як один із базових компонентів розподіленої генерації, здатної функціонувати автономно або як частина мікроенергосистем [10].

Незважаючи на наявність значного потенціалу водних ресурсів, рівень розвитку малої гідроенергетики в державі залишається незадовільним. Причиною цього є, зокрема, критичний стан технічної бази: чимало об'єктів експлуатується на обладнанні, змонтованому ще в середині минулого століття, що негативно впливає на їх продуктивність і надійність. У багатьох випадках коефіцієнт корисної дії не перевищує 60–65%, тоді як сучасні технології дозволяють досягати значно вищих показників — до 85–90% [15]. Ускладнює ситуацію також обмежений доступ до фінансових ресурсів, необхідних для модернізації. Відсутність ефективних державних програм підтримки та складність залучення комерційного фінансування гальмують інвестиційну активність у секторі. До того ж, малий рівень зацікавленості з боку бізнесу часто обумовлений орієнтацією на проекти з коротшим терміном окупності.

Значний вплив на темпи розвитку галузі справляє також нормативно-правова база. Складна й багаторівнева система дозволів збільшує терміни реалізації проєктів, а відсутність єдиного цифрового простору для погодження документів лише посилює цю проблему. Крім того, відсутність спеціалізованого законодавчого статусу для малих ГЕС унеможлиблює розробку специфічних технічних та екологічних норм. Впровадження прозорості, ефективної дозвільної процедури з чітким регламентом і врахуванням екологічних пріоритетів є важливою умовою для стимулювання сектора.

Попри ці виклики, спостерігається позитивна динаміка у впровадженні новітніх технологій. Автоматизовані системи управління, SCADA-платформи, віддалений контроль параметрів роботи ГЕС і розумні гідрологічні пости поступово впроваджуються на об'єктах малої генерації. Особливо ефективними такі інструменти є для гідроустановок у віддалених гірських районах із обмеженим числом обслуговуючого персоналу [16]. Паралельно розвиваються й рішення на базі технологій Інтернету речей (IoT), які забезпечують комплексний контроль за використанням водних ресурсів, прогнозування навантажень і адаптацію роботи до змін у водному режимі.

Зростає також інтерес до екологічної складової. Сучасні підходи до проєктування малих ГЕС дедалі частіше передбачають мінімізацію впливу на довкілля: від застосування безгреблевих агрегатів та гідрокінетичних установок до проєктування ефективних рибопропускних каналів. Такі рішення дозволяють зменшити конфлікти з місцевими громадами, особливо в чутливих природних зонах. Доцільною також є розробка індивідуальних екологічних паспортів для кожного об'єкта, які б містили регулярні звіти про стан біорізноманіття та динаміку гідрологічних характеристик території. Такий підхід відповідає європейським вимогам і відкриває нові можливості для отримання міжнародного фінансування [17].

Одним із перспективних напрямів є інтеграція малих ГЕС у багатокомпонентні енергетичні комплекси разом із сонячними, вітровими станціями та системами накопичення енергії. Такі комбінації дозволяють балансувати коливання у виробництві та забезпечувати сталу подачу енергії при змінному навантаженні. Подібні проєкти вже активно реалізуються в країнах ЄС, і

Україна має можливість адаптувати ці практики до національних умов [11]. Створення локальних енергетичних кластерів на базі малих ГЕС дозволяє забезпечити енергетичну автономність для сільських територій, де централізоване електропостачання є економічно неефективним. У такий спосіб гідроенергетика не лише виконує генераційну функцію, а й стає інструментом для забезпечення енергетичної гнучкості та стабільності в межах розподіленої системи.

Узагальнення прогнозних даних про структуру енергоспоживання свідчить про поступове зростання частки малої гідроенергетики в енергобалансі держави. На рисунку 1.2 представлено очікувану динаміку цього зростання у 2025 та 2030 роках.

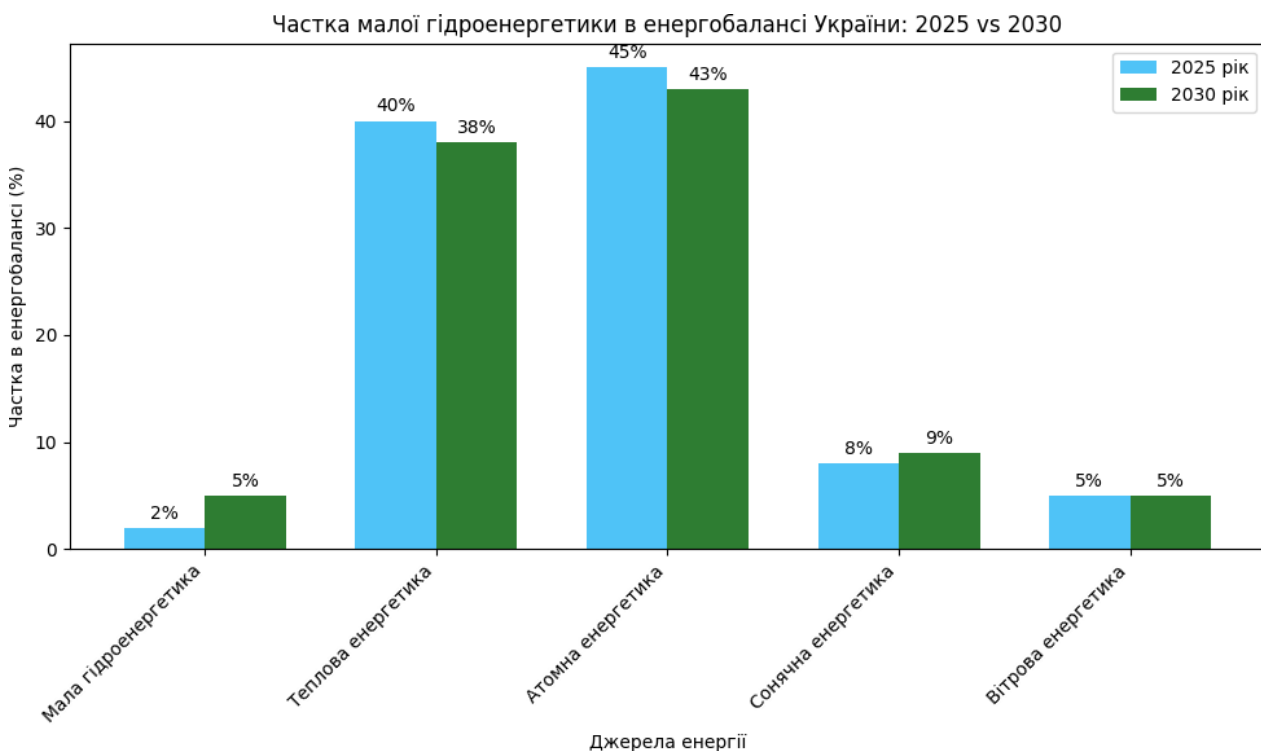


Рисунок 1.2 – Перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні [18]

Представлений графік демонструє стійке зростання частки малої гідроенергетики в загальній структурі енергоспоживання, що підтверджує зростаюче усвідомлення її значення для енергетичної стабільності країни. Така динаміка слугує обґрунтуванням доцільності подальшого інвестування в цей напрям і свідчить про поступове визнання важливості МГЕС у формуванні нової моделі енергозабезпечення.

Активне розширення мережі малих гідроелектростанцій, особливо у регіонах із високим природним потенціалом, як-от Карпати, сприяє створенню нових робочих місць і пожвавленню місцевого економічного розвитку. Паралельно з цим, екологічна модернізація гідроспоруд — зокрема встановлення фільтрувальних елементів на водозабірних вузлах та рибопропускних систем — демонструє, що технологічне оновлення цілком сумісне з природоохоронними пріоритетами. Значний внесок у реалізацію проєктів також забезпечує належна інформаційна робота з місцевими громадами, яка дозволяє знизити ризики соціального спротиву та забезпечити підтримку на етапах будівництва і експлуатації.

В умовах зростаючих викликів для енергетичної безпеки країни, мала гідроенергетика постає не лише як технічне рішення для забезпечення енергією, а як стратегічна альтернатива централізованим джерелам, здатна гарантувати енергетичну автономність навіть на рівні окремих територіальних громад.

У цьому контексті подальший розвиток сектора безпосередньо залежить від здатності усунути низку обмежувальних факторів — від застарілого технічного парку до складнощів у процедурному оформленні нових проєктів. Системне оновлення обладнання, спрощення нормативних процесів, впровадження цифрових рішень для управління потужностями, а також екологічно виважена інтеграція у ландшафт — саме ці складові можуть забезпечити ефективне перетворення малої гідроенергетики на одну з ключових опор національної енергетичної політики, що відповідає пріоритетам державної стратегії до 2050 року [8].

1.3 Оптимізація продуктивності водних шляхів для зменшення втрат енергії

Рівень ефективності малої гідроелектростанції значною мірою залежить від того, наскільки якісно спроектовано та реалізовано її водогосподарську частину. Всі процеси, пов'язані з транспортуванням води — від забору до подачі на турбінне колесо — формують основу для виникнення гідравлічних втрат. Саме ці втрати, якщо не враховані на етапі проєктування, можуть суттєво знизити енергоефективність усієї станції. Тому при розробці сучасних схем малих ГЕС

особливе значення приділяється оптимізації водних шляхів, що охоплює як інженерні, так і експлуатаційні аспекти [17].

Гідравлічна схема станції має бути побудована таким чином, щоб забезпечити найбільший можливий ефективний напір при найменших втратах тиску. До неї традиційно входять водозабірні об'єкти, фільтраційні й очисні елементи, напірні трубопроводи, турбінний вузол і відвідний канал. Під час планування просторового розміщення цих елементів важливо врахувати природні характеристики місцевості, сезонну варіативність гідрологічних показників і наявні екологічні обмеження [11]. Уникнення різких змін напрямку течії, а також використання згладжених поворотів із радіусами кривизни, адаптованими до швидкості потоку, дозволяють суттєво зменшити турбулентність, а отже — і втрати напору.

До того ж сучасні проектні підходи базуються на принципі модульності. Це означає, що гідроспоруди та обладнання проектується з урахуванням можливості масштабування — наприклад, добудови додаткових турбін або впровадження інтелектуальних систем керування. Така гнучкість дозволяє адаптувати станцію до змін продуктивності або оновлення технологічної бази без кардинальної перебудови основної структури [10].

Для кращого розуміння логіки взаємозв'язку окремих конструктивних елементів і принципів функціонування МГЕС, у дипломі представлено узагальнену схему роботи малої гідроелектростанції (рис. 1.3). Вона ілюструє послідовність основних процесів перетворення енергії потоку у електроенергію та дозволяє візуалізувати ключові вузли системи.

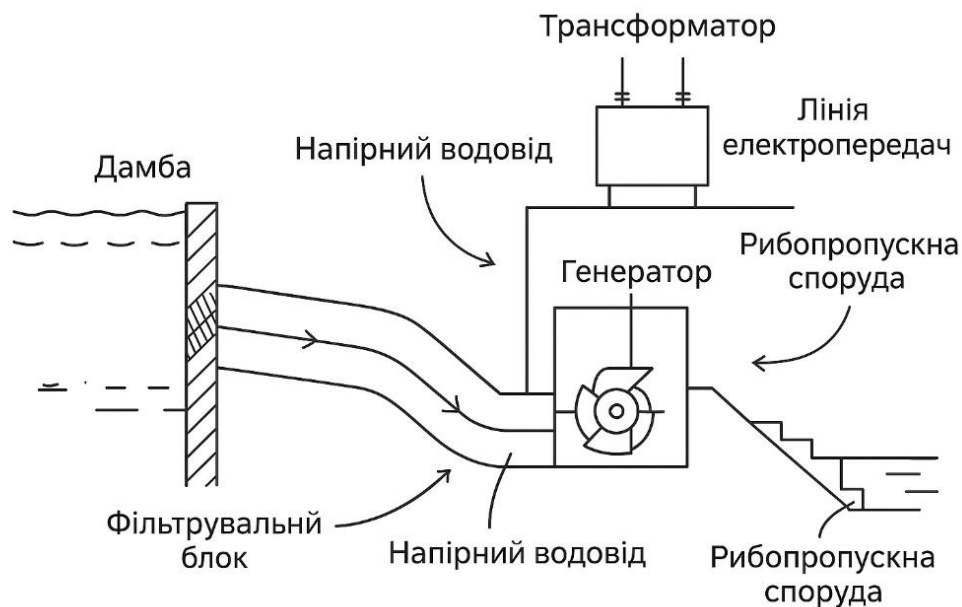


Рисунок 1.3 – Схема роботи малої гідроелектростанції

Один із найважливіших чинників, що визначає гідравлічну ефективність водоводів у складі малої гідроелектростанції, — це втрати напору, пов'язані з тертям між потоком води та внутрішніми поверхнями труб або каналів. Інтенсивність цього опору залежить від матеріалу стінок, ступеня їхньої шорсткості, конструктивних розмірів і форми, а також від гідродинамічних характеристик самого потоку, зокрема його швидкості [16]. Щоб мінімізувати ці втрати, у практиці застосовують труби з полімерних матеріалів або армовані бетонні конструкції зі спеціальними антикорозійними і згладжуючими покриттями, що знижують коефіцієнт шорсткості. Окрім цього, геометрична оптимізація поперечного перерізу, наприклад вибір трапецієподібної форми для відкритих каналів, дозволяє забезпечити рівномірність потоку й зменшити турбулентність, що веде до зниження опору [15].

Не менш важливим аспектом залишається підтримання чистоти внутрішніх поверхонь водоводів. Накопичення осаду, органічних забруднень або твердих фрагментів побутового походження здатне суттєво зменшити прохідний переріз і створити додатковий гідравлічний опір. Такі умови підвищують навантаження на гідротехнічне обладнання, зокрема на турбіни, і можуть стати причиною аварійних ситуацій. З метою профілактики використовуються різноманітні механізми очищення: решітки попереднього фільтрування, пісковловлювачі, а також автоматизовані системи очищення, ефективність яких була підтверджена в

польових умовах [18]. Регулярне технічне обслуговування водних комунікацій, включаючи інспекцію і промивку, є обов'язковою умовою для підтримання стабільної ефективності станції, особливо в гірських районах, де обслуговування ускладнене віддаленістю об'єкта.

Однією з ключових технічних умов ефективного функціонування МГЕС є правильний вибір матеріалу для напірних водоводів. Саме від цього елемента значною мірою залежить збереження напору на ділянці між водозабором і турбіною. У межах даної роботи було здійснено аналіз поширених у сучасному проектуванні матеріалів для напірних труб. У процесі оцінки враховувались такі критерії, як ступінь внутрішньої шорсткості, питомі втрати напору, а також довговічність трубопроводу в умовах експлуатації (табл. 1.2) [13].

Таблиця 1.2 – Порівняння матеріалів напірних водоводів [13]

Матеріал	Шорсткість (мм)	Втрати напору (%)	Термін служби (роки)
Поліетилен високої щільності	0.0015	5–8	50–70
Сталь із покриттям	0.01	10–12	30–40
Бетон із покриттям	0.03	12–15	40–60

Дані, наведені в таблиці 1.2, свідчать про виразні відмінності між основними характеристиками трубопровідних матеріалів, які застосовуються у проектуванні напірних водоводів. Поліетилен високої щільності виявився найбільш оптимальним варіантом, оскільки поєднує в собі низький коефіцієнт шорсткості та високу стійкість до корозії. Такі властивості забезпечують мінімальні втрати напору при транспортуванні води та дозволяють експлуатувати труби понад 50 років, що робить їх вигідними у довгостроковій перспективі. Сталеві труби з антикорозійним покриттям, попри дещо гірші гідравлічні показники, зберігають популярність завдяки високій механічній міцності та відносно простому монтажу. Проте ефективність їх роботи залежить від збереження захисного шару: у разі його пошкодження можливе утворення відкладень, що знижує пропускну здатність і підвищує гідравлічний опір.

Що стосується бетонних труб із внутрішнім облицюванням, їх перевагою є здатність витримувати значні статичні навантаження. Однак через підвищену шорсткість вони спричиняють більші втрати тиску, що може знижувати загальну енергоефективність системи. Термін експлуатації таких трубопроводів становить у середньому 40–60 років, однак витрати на їхнє технічне обслуговування та очищення часто виявляються вищими, ніж у альтернативних рішень [13].

З огляду на зазначене, вибір трубного матеріалу не може здійснюватися за універсальним алгоритмом і потребує індивідуального техніко-економічного обґрунтування. До уваги слід брати сукупність факторів: гідравлічні властивості, вартість монтажу, тривалість експлуатації, витрати на утримання та ремонт. Важливими є також екологічні параметри, зокрема можливість вторинної переробки матеріалів та їх інертність у водному середовищі. Для отримання достовірних результатів необхідно залучати сучасні вимірювальні технології, які дозволяють точно розрахувати гідравлічні втрати та змоделювати поведінку системи в умовах реального навантаження [16, 18].

Особливої уваги потребує явище кавітації — один із критичних процесів, що впливає на довговічність і безпечність експлуатації турбінного обладнання. Кавітація виникає тоді, коли локальний тиск падає нижче за тиск насиченої пари, внаслідок чого утворюються парові бульбашки, які згодом колапсують, утворюючи мікроудару. Ці мікроривування здатні викликати ерозійне пошкодження лопатей турбін, напрямних апаратів та інших конструктивних елементів. У контексті малих ГЕС, де рівень автоматизації часто обмежений, особливо важливим є своєчасне виявлення зон потенційної кавітації з метою запобігання аваріям.

Інженерними засобами захисту від кавітаційних ефектів є геометрична оптимізація турбінних камер, використання гідродинамічного моделювання для виявлення ризикованих зон, а також впровадження корозійностійких матеріалів — зокрема нержавіючої сталі чи спеціалізованих полімерів. Турбіни типу Пелтона, які зазвичай працюють на об'єктах із великим напором, демонструють високу стійкість до кавітозної ерозії. Сучасні технології ущільнень і підшипників додатково знижують ризик пошкодження вузлів [15].

Суттєве підвищення ефективності дає впровадження автоматизованих систем керування, зокрема SCADA-платформ, частотних регуляторів та сенсорних

модулів, які працюють у режимі реального часу. Такі технології не лише стабілізують гідравлічні параметри, а й забезпечують контроль за коливаннями тиску, температури та вібрації, дозволяючи виявляти відхилення до того, як вони стануть критичними [17].

Водночас гідравлічне проектування повинно враховувати вимоги екологічної безпеки. Застосування фільтраційних систем на водозабірних спорудах, які перешкоджають потраплянню твердих домішок у турбінне обладнання, знижує ризик забруднення водойм. Наприклад, на Косівській ГЕС встановлені пісковловлювачі дозволили скоротити осадження мулу у турбінному відсіку на 30%, що сприяло збереженню якості води [1].

Ще одним важливим напрямом є застосування безгреблевих технологій. Такі рішення, як гідрокінетичні установки, дозволяють уникнути масштабної зміни річкового русла, що мінімізує екологічні ризики. Дослідження WWF засвідчили, що такі системи знижують вплив на рибні популяції більш ніж на 60% у порівнянні з традиційними греблевими конструкціями [7]. Подібні технології вже активно використовуються в країнах Європи, зокрема в Норвегії та Австрії, як частина політики збереження біорізноманіття та мінімізації антропогенного впливу [18].

Ілюстрацією сучасного інженерного підходу до проектування водогонів є схема на рисунку 1.4. Вона відображає комплексний підхід до оптимізації водного потоку: від плавних радіусів поворотів до елементів антикавітаційного захисту, вбудованих сенсорів і адаптивних рішень, що сприяють зниженню гідравлічних втрат та підвищенню експлуатаційної надійності системи.

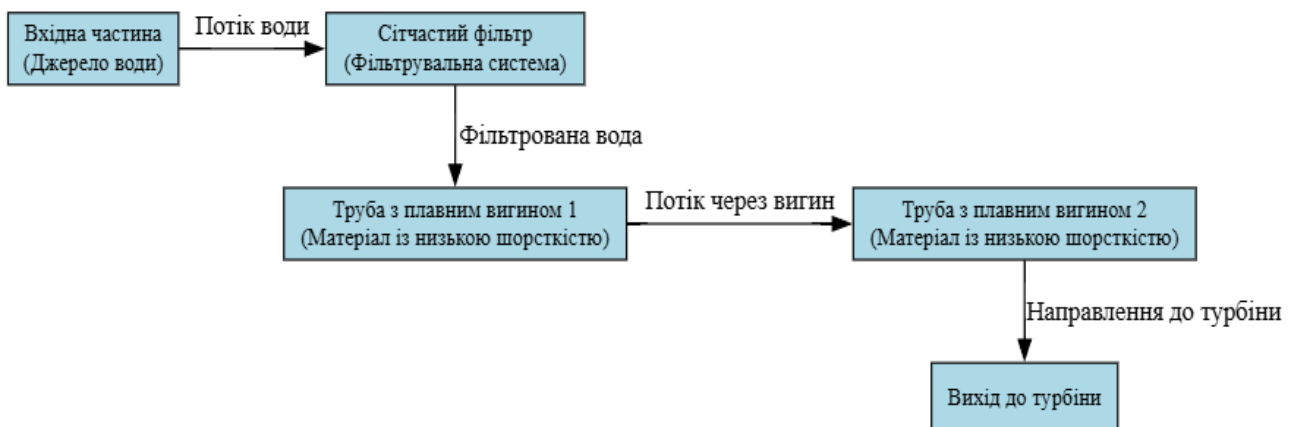


Рисунок 1.4 – Оптимізація водного потоку в напірному водоводі

Як видно із наведеної схеми (рис. 1.4), ефективне проектування водоводів із урахуванням гідродинамічних властивостей та використання інноваційних технологій дозволяє суттєво знизити рівень турбулентності, зменшити втрати напору, а також створити сприятливі умови для безперебійної роботи гідротехнічного обладнання. Такий підхід є запорукою зниження енергетичних втрат і водночас сприяє підвищенню загального коефіцієнта корисної дії (ККД) малої гідроелектростанції.

Разом із тим, на загальну продуктивність ГЕС впливають не лише водогосподарські компоненти, а й технічний стан устаткування, відповідального за генерацію та передачу електроенергії. Втрати на цих етапах здебільшого зумовлені використанням застарілих турбін, генераторів, трансформаторів та низьким рівнем автоматизації процесів. Згідно з аналітичними даними, енергетичні втрати на стадії перетворення гідравлічної енергії в електричну можуть становити від 5 до 10%, а під час трансформації напруги та передачі в електромережу — ще 2–4% [15].

Скорочення цих втрат досягається шляхом застосування високоефективних технічних рішень. Наприклад, сучасні турбіни типу Каплана й Пелтона забезпечують ККД понад 90%, а синхронні генератори нового покоління — до 98%, що значно перевищує показники старих агрегатів [15]. Також помітне зниження втрат досягається шляхом впровадження трансформаторів з масляним охолодженням і сердечниками з низьковтратної сталі. Підвищити стабільність генерації дозволяє інтеграція SCADA-систем, які у поєднанні з пристроями динамічного регулювання навантаження дають змогу оперативно реагувати на коливання потужності [13].

Оптимізація гідравлічного тракту потребує комплексного підходу, що передбачає врахування не лише топографічних і гідрологічних особливостей ділянки, а й взаємодії з параметрами енергогенеруючого обладнання. У цьому контексті ключову роль відіграє формування ефективної гідравлічної схеми — від вибору матеріалу труб до обґрунтування їх геометричної форми. Гладкі, низькошерсткі матеріали (як-от армований поліетилен або нержавіюча сталь із обробленими стінками) сприяють зменшенню втрат тиску, а правильна конфігурація каналів дозволяє уникати турбулентних зон і застійних ділянок.

Загалом, помилки на етапі проектування водогону можуть призводити до втрат енергії, що сягатимуть 10% від загальної потужності [1].

Не менш важливим чинником підвищення ефективності є використання обладнання, адаптованого до гідрологічних умов конкретної річки. Для високонапірних режимів доцільне застосування турбін типу Пелтона, тоді як при малому напорі та великій витраті води ефективніше працюють турбіни Каплана. Обидва типи демонструють ККД у межах 85–90% за умови правильно підбраного режиму роботи та регулярного технічного обслуговування [15]. Водночас необхідно враховувати ймовірність виникнення кавітаційних ефектів, що можуть призводити до руйнування лопатей турбін. Для мінімізації подібних загроз застосовують спеціальні антикавітаційні покриття, а також проводять оптимізацію форми проточних частин на основі результатів гідродинамічного моделювання [11].

Автоматизовані системи моніторингу — зокрема платформи SCADA — є важливою складовою сучасної гідроенергетики. Вони забезпечують постійний контроль параметрів станції, дозволяють виявляти відхилення у режимі реального часу та здійснювати оперативне коригування роботи без необхідності участі оператора. Застосування таких систем дає змогу підвищити ККД на 2–5%, а також знизити витрати на обслуговування й запобігти аваріям, пов'язаним із людським фактором [16]. У довгостроковій перспективі ці технології сприяють реалізації принципів сталого розвитку та забезпечують відповідність екологічним нормам, передбаченим угодами про євроінтеграцію [17].

Загальний рівень втрат у гідроенергетичних об'єктах формується не лише в процесі гідравлічної трансформації, але й у межах електротехнічного ланцюга. Механічні втрати в генераторі, втрати при зміні напруги в трансформаторі та втрати під час транспортування енергії — усе це чинники, що в сукупності можуть істотно знижувати продуктивність. За даними галузевих оглядів, в Україні середній рівень втрат на етапі генерації становить від 5 до 10% — переважно через використання морально застарілого устаткування та низьку частоту його модернізації [2]. Прикладом успішного оновлення є Верхньобистрянська ГЕС, де встановлення нового синхронного генератора з ККД понад 96% дозволило скоротити втрати на 3% у порівнянні з попереднім обладнанням [2].

Додаткові втрати виникають на етапі трансформації енергії перед її подачею до мережі. Силкові трансформатори попередніх поколінь часто мають ККД менше 96%, що в сучасних умовах вважається неефективним. Їх заміна на пристрої з масляним охолодженням та високим коефіцієнтом корисної дії (понад 98%) дозволяє суттєво знизити втрати. Наприклад, проекти в межах Львівської області продемонстрували зниження втрат на етапі трансформації до рівня 2–3% після модернізації обладнання [10].

Таким чином, ефективне використання гідроенергетичних ресурсів можливе лише за умов комплексного врахування всіх складових — від гідравлічних характеристик до якості електромеханічної інфраструктури. Чіткий взаємозв'язок між точністю у визначенні гідрологічних параметрів та обсягом виробленої електроенергії підтверджує необхідність ретельного підходу до проектування. Саме тому перший розділ даного дослідження зосереджений на вивченні потенціалу малої гідроенергетики України, її розвитку, а також технологічних шляхів зменшення втрат енергії у водогосподарських і технічних компонентах ГЕС.

1.4 Постановка задачі на виконання бакалаврської роботи

Зважаючи на стратегічну важливість розвитку малої гідроенергетики для енергетичної безпеки України, у межах цього розділу було розглянуто гідрологічні характеристики Карпатського регіону як одного з найперспективніших у плані реалізації потенціалу малих річок. Також проаналізовано поточний стан функціонування МГЕС в Україні, виявлено основні технічні виклики та окреслено напрями їх подолання через впровадження сучасних інженерних і цифрових рішень. Значна увага приділена організації водогосподарських елементів станцій — зокрема, їхній конструктивній побудові, гідравлічним втратам, пов'язаним з тертям, забрудненням каналів та трубопроводів, а також кавітаційним явищам, що істотно впливають на довговічність і надійність гідрообладнання.

Як засвідчив проведений аналіз, потенціал малих річок формується під впливом ряду чинників, які обов'язково мають бути враховані на етапі прийняття рішень щодо будівництва чи модернізації МГЕС. Окрім інженерно-технічних

рішень (оптимізація гідравлічної схеми, підбір турбінного обладнання, зниження втрат у водогоні), надзвичайно важливими є характеристики самих водних ресурсів. До базових параметрів, що визначають гідроенергетичний потенціал, належать: витрата води, швидкість течії, величина доступного напору, а також температура, яка може впливати на в'язкість рідини та режим роботи обладнання.

У зв'язку з цим, особливого значення набуває точне вимірювання цих характеристик і подальше їх аналітичне опрацювання. Ефективне використання потенціалу малих річок можливе лише за умов впровадження надійних методів моніторингу витрати та гідравлічних параметрів із застосуванням сучасних вимірювальних систем. Це дозволяє не лише підвищити точність розрахунків, а й автоматизувати процес збору гідрологічної інформації, забезпечуючи оперативність реагування на зміну водного режиму.

Відтак, наступний розділ роботи зосереджується на таких напрямках дослідження:

- розробка методичних підходів до використання сучасних вимірювальних технологій для визначення параметрів водного потоку та оцінки його енергетичного потенціалу;
- аналіз впливу основних гідродинамічних характеристик на ефективність роботи малої ГЕС;
- моделювання та оцінка гідропотенціалу на основі вимірюваних параметрів.

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВОДНОГО РЕСУРСУ ТА ЙОГО ГЕНЕРУЮЧОГО ПОТЕНЦІАЛУ

2.1. Оцінка потоків за допомогою вимірювання витрат

Однією з основних гідрологічних характеристик річки, яка безпосередньо визначає її енергетичний потенціал, є витрата води, що позначається як Q (м³/с). Цей параметр є фундаментальним при оцінці стану водного потоку, оскільки він впливає на рівень води, її швидкісні характеристики, зміну руслових структур та перенесення наносів. Власне, витрата води є базовим показником для розрахунку можливостей вироблення електроенергії як на окремих ділянках, так і на цілісних річкових системах. Існує безпосередня залежність між значенням Q та такими характеристиками, як ухил водної поверхні, кінематичні особливості течії, а також морфологія дна — усі ці взаємопов'язані фактори формують основу для гідротехнічного проектування [1].

Для малих гідроелектростанцій (мГЕС) точне визначення витрати води є критично важливим, адже саме цей параметр впливає на обґрунтованість розрахункової потужності, стабільність роботи обладнання та економічну доцільність функціонування станції [2]. В умовах реалізації Енергетичної стратегії України до 2050 року, яка передбачає децентралізацію енергетичного сектору, зростання частки відновлюваних джерел і розвиток місцевої генерації, значення гідрологічних параметрів для малих річок лише зростає. Витрата води в цьому контексті виступає не лише природним індикатором гідрологічного режиму, а й ключовим вхідним значенням у розрахункових моделях гідроенергетичного ресурсу територій [10].

Існує два основних підходи до визначення витрати води: непрямий, що базується на побудові залежності між рівнем води та її витратою, і прямий — шляхом безпосереднього вимірювання в польових умовах. Саме прямі методи вважаються більш точними, особливо за умови застосування сучасного обладнання. Найефективнішими на сьогодні є ультразвукові й акустичні доплерівські профілометри (ADCP), які дозволяють детально вимірювати

швидкісний профіль потоку у поперечному перерізі річки з високою просторовою роздільною здатністю [16]. Для забезпечення достовірності даних вибираються гідрологічно стабільні ділянки — зазвичай прямолінійні сегменти русла з рівномірним потоком, де встановлюються автоматизовані водомірні пости, обладнані датчиками рівня, температури та швидкості води [11].

Значного поширення набувають також сучасні гідрометричні комплекси з дистанційним зчитуванням інформації, які інтегруються з геоінформаційними платформами (GIS) для подальшого моделювання гідрологічних процесів. Такі системи відкривають нові можливості для енергетичного планування — зокрема, оптимізації режимів роботи МГЕС, прогнозування водності та управління водними ресурсами в умовах змін клімату. Таким чином, вимірювання витрати води виходить за межі суто технічної функції, стаючи елементом стратегічного управління водними ресурсами в контексті сталого розвитку та енергоефективності [17].

2.1.1. Гідрометричний метод

Серед традиційних способів вимірювання витрати води в річковому руслі чільне місце посідає гідрометричний метод, що в літературі часто згадується як метод "швидкість–площа". Суть цього підходу полягає в обчисленні об'єму води, яка протікає крізь поперечний переріз русла за одиницю часу. Методика ґрунтується на визначенні площі живого перерізу водотоку та швидкості течії в окремих його сегментах. Вимірювання швидкостей зазвичай здійснюється за допомогою гідрометричних млинків, однак у спрощених умовах може застосовуватись і методика поплавкового типу [20].

Згідно з принципом методу, повна витрата Q визначається як сума часткових витрат через умовні сегменти поперечного перерізу. Кожен такий сегмент розглядається як окрема елементарна ділянка, для якої обчислюється добуток локальної швидкості течії та відповідної площі. Такий підхід дозволяє з достатньою точністю оцінити загальний об'єм води, що протікає через контрольовану ділянку (рис. 2.1).

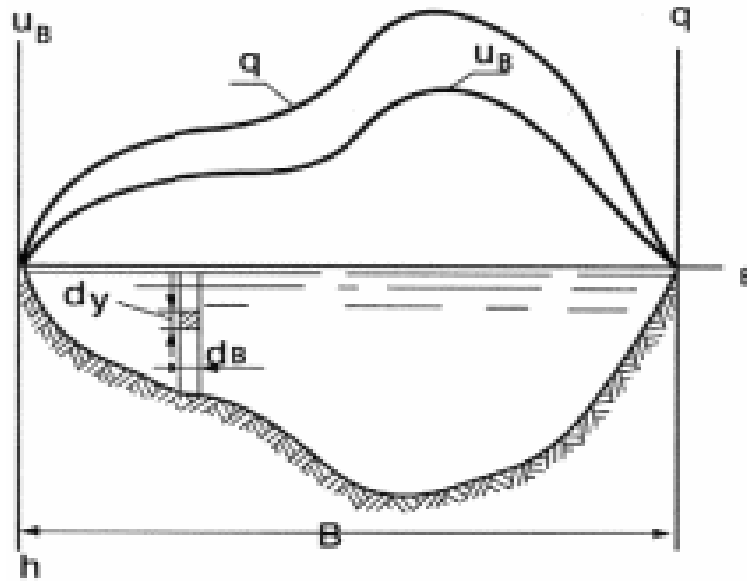


Рисунок 2.1 - Поперечний переріз потоку [20]

Якщо вектор швидкості в межах цієї площадки утворює певний кут α з нормаллю до неї, то елементарну витрату dQ можна подати у вигляді [24]:

$$dQ = u \cdot \cos \alpha \cdot dW \quad (2.1)$$

де u – модуль локальної швидкості потоку, α – кут між напрямком швидкості і нормаллю, dW – площа елементарного сегмента поперечного перерізу.

Загальна витрата води через весь переріз визначається інтегруванням цієї залежності по всій площі перерізу [24]:

$$Q = \int u \cdot \cos \alpha \cdot dW = \iint u \cdot \cos \alpha \cdot dx \cdot dy \quad (2.2)$$

така математична модель дозволяє враховувати складні просторові розподіли швидкості потоку, що особливо важливо при гідротехнічному моделюванні або проектуванні малих гідроелектростанцій.

У межах реалізації Енергетичної стратегії України, що орієнтована на розширення децентралізованої генерації з відновлюваних джерел енергії, зокрема в Карпатському регіоні, гідрометричний метод визначення витрати води набуває особливої практичної ваги [15]. Наразі ця методика активно модернізується

завдяки впровадженню електромеханічних та акустичних засобів вимірювання: млинки обладнуються цифровими логерами, а системи типу ADCP забезпечують деталізоване сканування структури потоку в поперечному перерізі річки [16].

Одним з найважливіших етапів у процесі вимірювання витрати є вибір способу визначення швидкості потоку за допомогою гідрометричного млинка. У практиці дослідження малих водотоків з невеликою глибиною найчастіше застосовується так званий основний метод, що передбачає баланс між точністю та трудовитратами. Перед початком вимірювань розраховується глибина занурення млинка — робоча глибина $h_{роб}$, яка визначається з урахуванням діаметра гвинта пристрою та гідрологічного режиму конкретної ділянки [20].

Розташування точок заміру по вертикалі обирається згідно з усталеними гідрометричними стандартами. Якщо глибина русла достатня ($h \geq 10d$), вимірювання проводиться на двох рівнях — $0,2h$ та $0,8h$. При меншій глибині використовується єдина точка на глибині $0,6h$. У випадках із льодовими покривами або наявністю водної рослинності застосовуються інші комбінації глибин: $0,15h$, $0,5h$, $0,85h$ — для глибоких русел, або лише одна точка на $0,5h$ для дрібних потоків. Така диференціація дозволяє адаптувати методику до польових умов і зберегти надійність отриманих результатів [21].

Основний метод передбачає фіксацію кількості імпульсів, що передаються млинком, протягом інтервалу не менше 100 секунд. За наявності стабільних гідрологічних умов та раніше проведених замірів цей інтервал може бути скорочений до 60 секунд без втрати точності. Перед початком вимірювань млинок проходить технічну перевірку та налаштування відповідно до специфіки об'єкта дослідження [22].

Сучасні гідрометричні млинки комплектуються модулями пам'яті для збереження результатів і передають дані у реальному часі. Такі інструменти повністю відповідають курсу на цифровізацію екологічного моніторингу, що задекларований у стратегіях водного обліку в Україні [10]. Для перевірки працездатності пристрою застосовується метод "вибігу": до гвинта кріплять калібрований вантаж (100 г), після чого фіксують час до повної зупинки обертання. Він має перевищувати 20 секунд, а отримані значення вносяться до польового журналу (форма КГ-3) [20].

Додатково здійснюється перевірка працездатності електричних контактів, кабелів, блока реєстрації сигналів і гідролебідки, яка фіксується до човна за допомогою дроту або кріплень. Під час польових робіт обов'язковим є документування умов проведення вимірювань — описується стан русла, рівень води, погодні умови, а також виконується серія вертикальних промірів для визначення швидкості на різних глибинах. У польових умовах часто використовують млинок типу ГР-21М, що передає сигнал після кожних 20 обертів гвинта (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Гідрометричний млинок типу ГР-21М [23]

Під час вимірювання перший сигнал ігнорують, секундомір запускають після другого, а фіксація часу завершується третім сигналом. Загальна тривалість має перевищувати 100 секунд, із не менш як чотирма зареєстрованими сигналами. Оберти гвинта та час записують у формуляр КГ-3 для подальших обчислень [32].

Млинки з електромагнітним датчиком дають високу точність навіть у турбулентному потоці, що є важливим для моделювання роботи малих ГЕС. Їх поєднання з цифровими модулями сприяє автоматизації моніторингу та інтеграції в локальні системи енергопланування [10].

Розрахунок витрати проводиться за методикою трьох табличних моделей у формулярі КГ-3. Спочатку визначають площі між промірними вертикалями за правилом трапецій, а далі об'єднують їх у більші сегменти для оцінки площі активного потоку [20].

Другим етапом є розрахунок швидкостей водного потоку в контрольних точках. Для кожної точки визначається число обертів гвинта млинка в одиницю часу шляхом ділення кількості сигналів на тривалість вимірювання. Ці значення коригуються відповідно до тарувальної характеристики конкретного приладу, що дозволяє отримати реальні швидкості течії в точках, розташованих, зокрема, на рівнях $0,2h$ та $0,8h$. Після цього обчислюється середня швидкість на кожній вертикалі. Для випадку достатньої глибини застосовується усереднення двох значень за формулою [32]:

$$V_j = 0,5 \cdot (u_{0,2} + u_{0,8}) \quad (2.3)$$

де $u_{0,2}$ і $u_{0,8}$ – швидкості води, виміряні на відповідних рівнях від дна. У разі обмеженої глибини може використовуватись інше співвідношення з урахуванням єдиної точки на вертикалі [21].

Завершальним етапом є побудова таблиці витрат, у якій значення середніх швидкостей на кожній вертикалі об'єднуються для обчислення середньої швидкості між суміжними вертикалями. Це дає можливість визначити локальні витрати через відповідні сегменти потоку за формулою [32]:

$$v_{\text{сер.і}} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (2.4)$$

Після цього локальні витрати множаться на відповідні площі сегментів поперечного перерізу, отримані на першому етапі, що дозволяє підсумувати повну витрату води через усе русло. Такий підхід забезпечує не лише точність вимірювання, але й відкриває можливість калібрування гідравлічних моделей, що активно використовуються у проектуванні малих гідроелектростанцій.

При визначенні повної витрати води у поперечному перерізі річки важливим етапом є обчислення витрати через крайові ділянки потоку — тобто між урізом

води та першою (або останньою) швидкісною вертикаллю. У цих зонах вимірювання швидкості зазвичай технічно утруднене або неможливе, тому її величину приймають умовно. Середню швидкість потоку на крайових ділянках приймають рівною швидкості на суміжній швидкісній вертикалі, помноженій на коефіцієнт k , який враховує особливості гідравлічного опору та конфігурацію берегової лінії. Значення цього коефіцієнта встановлюється емпірично на основі характеру берега відповідно до таблиці (табл. 2.1). Наприклад, для пологого природного берега без мертвого простору значення k становить 0,7, тоді як для гладкої бетонної стінки може досягати 0,9. У випадках, коли берегова ділянка характеризується застійною зоною, тобто «мертвим простором», застосовується знижений коефіцієнт 0,5 [20].

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнта k [32]

Характеристика берега	Значення k
1. При відсутності мертвого простору:	
пологий берег з нульовою глибиною на урізі води	0,7
природний стрімчастий берег або нерівна стінка	0,8
гладка бетонна стінка	0,9
2. При наявності мертвого простору	0,5

Далі, на підставі розрахованих площ між швидкісними вертикалями та середніх швидкостей у відповідних зонах, обчислюють часткові витрати води за формулою [24]:

$$q_i = w_i \cdot v_{\text{сер},i} \quad (2.5)$$

де w_i — площа i -ї ділянки поперечного перерізу, а $v_{\text{сер},i}$ — середня швидкість на відповідній ділянці.

Повна витрата води через усю площину поперечного перерізу визначається як алгебраїчна сума всіх часткових витрат, тобто [24]:

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} + q_n \quad (2.6)$$

Застосування гідрометричного методу у поєднанні з сучасними технологіями дозволяє з високою точністю визначати об'єм водяного потоку навіть у складних гідроморфологічних умовах, що особливо важливо при формуванні цифрових моделей стоку для гідроенергетичних систем. В умовах реалізації Енергетичної стратегії України, яка акцентує увагу на розвитку відновлюваних джерел енергії, достовірне оцінювання водного потенціалу річок набуває вирішального значення для стратегічного планування будівництва малих ГЕС, економічної обґрунтованості інвестицій та підбору відповідного гідротехнічного обладнання [10].

У практиці польових досліджень поширення отримав так званий скорочений варіант гідрометричного методу, що передбачає зменшення кількості вимірювань за рахунок обмеження кількості точок на вертикалях. Такий підхід застосовується переважно на стабільних ділянках річкових русел для оперативного збору даних, особливо в умовах змінного або непостійного гідрологічного режиму. У відкритих руслах, зазвичай, проводяться вимірювання в одній-двох точках, тоді як при наявності льодоставу чи щільної водної рослинності — кількість точок збільшується до двох-трьох для врахування впливу перешкод на розподіл швидкостей течії [20].

Визначення кількості вертикалей, їх геометричне розміщення та глибини фіксації залежить від результатів попередніх вимірювань, що дозволяє оптимізувати обсяг роботи без суттєвої втрати точності. Скорочений метод ґрунтується на попередньому аналізі структури потоку, завдяки чому зберігається репрезентативність результатів навіть при зменшеному числі замірів.

Однією з ключових технічних процедур у процесі організації гідрометричних досліджень є просторове закріплення швидкісних вертикалей. Це дозволяє досягти повторюваності результатів при здійсненні багатократних вимірювань. Вибір способу фіксації залежить від польових умов: у прибережних зонах вертикалі позначаються за допомогою маркувальних знаків на настилах містків, у віддалених районах використовують оптичні інструменти — теодоліти або секстанти з суден. Для широких водозбірних територій, зокрема у заплавах ділянках, доцільним є використання косих або віялоподібних створів, у межах яких установлюються опорні стовпи з позначенням відповідних номерів вертикалей (рис. 2.3) [21].

Подібна геометрична сітка вимірювань є фундаментом для подальшої математичної обробки результатів, оскільки дозволяє точно враховувати просторову неоднорідність швидкісного поля потоку. Саме така деталізація забезпечує високий рівень достовірності при розрахунках витрати води, що особливо актуально для моделювання потенціалу гідроенергетичних об'єктів, зокрема малих ГЕС.

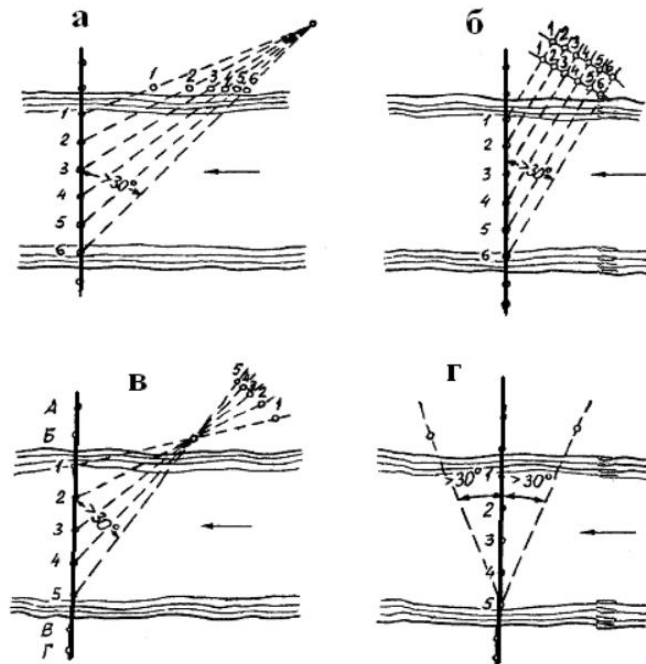


Рисунок 2.3 - Схема косих та віялових створів для закріплення швидкісних вертикалей на широких річках: а – косий створ під гострим кутом до берегової лінії (односторонній віяловий тип); б – віялоподібний створ з багатьма напрямками під різними кутами; в – косий створ з декількох паралельних напрямків (комбінований); г – симетричний віялоподібний створ від двох берегів [24]

Скорочений спосіб вимірювання особливо доцільний для моніторингу гідропотенціалу малих річок, які розглядаються як основа локальних ГЕС. В умовах реалізації Енергетичної стратегії України до 2050 року, де передбачено децентралізацію енергосистеми, потреба в оперативному зборі даних зростає. Такий підхід може ефективно слугувати інструментом енергоаудиту водних ресурсів [10].

Аналітичний метод із використанням млинка передбачає поділ поперечного перерізу річки на вертикалі, в межах яких окремо визначаються площі живого перерізу та середні швидкості. Це забезпечує точну оцінку розподілу швидкості та надійний розрахунок витрати води [20].

На кожній ділянці між двома сусідніми вертикалями фіксується відповідна площа живого перерізу, позначена як $w_1, w_2 \dots w_n$, та відповідна середня швидкість течії $v_1, v_2 \dots v_n$, яка визначається за результатами вимірювань або згладжених інтерполяційних даних. Повна витрата води через поперечний переріз річки визначається як сума добутоків середньої швидкості та площі кожної з таких ділянок з урахуванням прибережного коригуючого коефіцієнта k , який враховує локальні гідравлічні особливості, зокрема наявність нерівностей, рослинності або мертвого простору поблизу берегової зони. Розрахунок виконується за формулою [24]:

$$Q = kv_1 \cdot w_1 + \frac{v_1+v_2}{2} \cdot w_2 + \dots + \frac{v_{n-1}+v_n}{2} \cdot w_{n-1} + kv_n \cdot w_n \quad (2.7)$$

де Q — повна витрата води, v_1 — середня швидкість у межах i -тої ділянки, w_1 — площа живого перерізу відповідної ділянки, k — прибережний коефіцієнт, значення якого встановлюється на підставі типу берегової лінії та умов протікання води [25].

Використання аналітичного способу є особливо доцільним у випадках, коли необхідно отримати розширену гідродинамічну інформацію про русло річки, включаючи його поперечну структуру та асиметрію потоку. Такий метод (рис. 2.4) активно застосовується у водогосподарському моніторингу, проектуванні гідротехнічних споруд та при техніко-економічному обґрунтуванні будівництва малих гідроелектростанцій. Його точність та відтворюваність створюють підґрунтя для моделювання сценаріїв експлуатації ГЕС з урахуванням сезонної змінності витрат і багаторічного режиму річок [10].

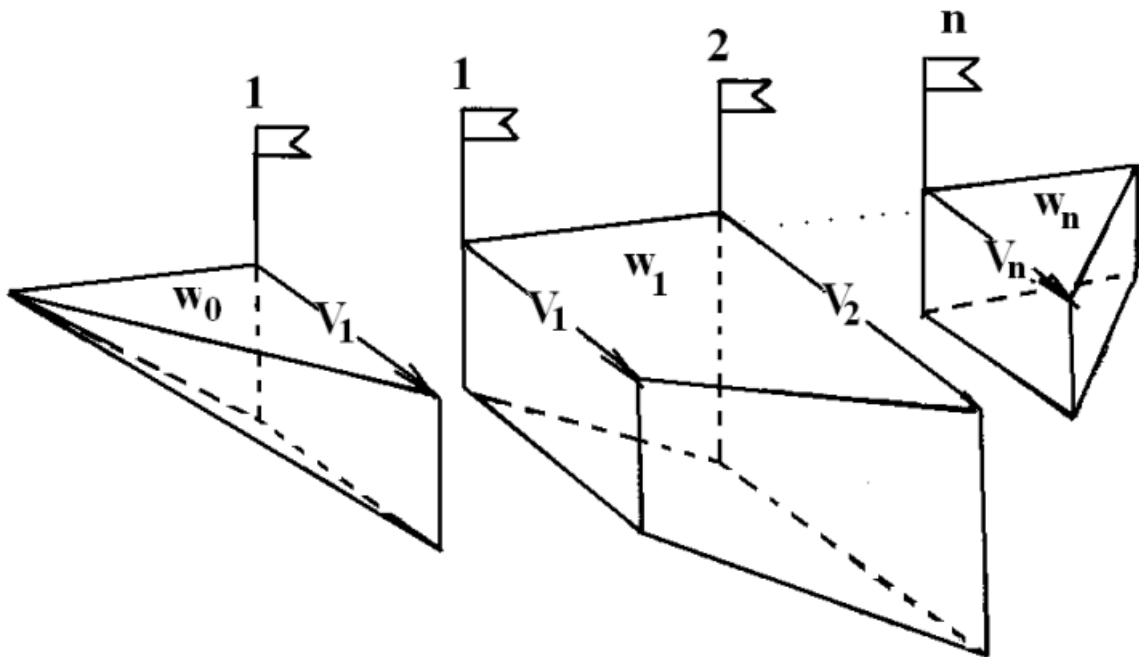


Рисунок 2.4 - Схема до обчислення витрати води аналітичним способом [24]

Метод поверхневих поплавців є найпростішим і застосовується для орієнтовного визначення витрати води, здебільшого під час рекогносцирувальних обстежень або за низьких швидкостей течії. Його перевагами є швидкість виконання та мінімальні технічні вимоги. Однак через високу чутливість до вітру та стану водної поверхні він не використовується під час льодоходу, льодоставу або при швидкості вітру понад 6 м/с [20].

Швидкість руху кожного поплавця обчислюється за співвідношенням [24]:

$$v_i = \frac{L}{t_i} \quad (2.8)$$

де L — довжина ділянки між створами (м), а t_i — час проходження поплавцем цієї відстані (с). Для забезпечення відносної репрезентативності результатів вимірювання поплавці пускають у різних точках поперечного перерізу русла, що дозволяє зафіксувати неоднорідність швидкості потоку в горизонтальній площині.

Отримані точки перетину траєкторій руху поплавців із основним створом заносяться до спеціального формуляру — «Книжки для запису виміру витрати води поплавцями» (КГ-7). На основі цих даних будується плавна еюра швидкостей, яка відображає зміну швидкості течії по ширині потоку. Візуалізація

результатів, як правило, подається у вигляді схематичної кривої, що проходить через нанесені точки перетину поплавців на створі (рис. 2.5) [26].

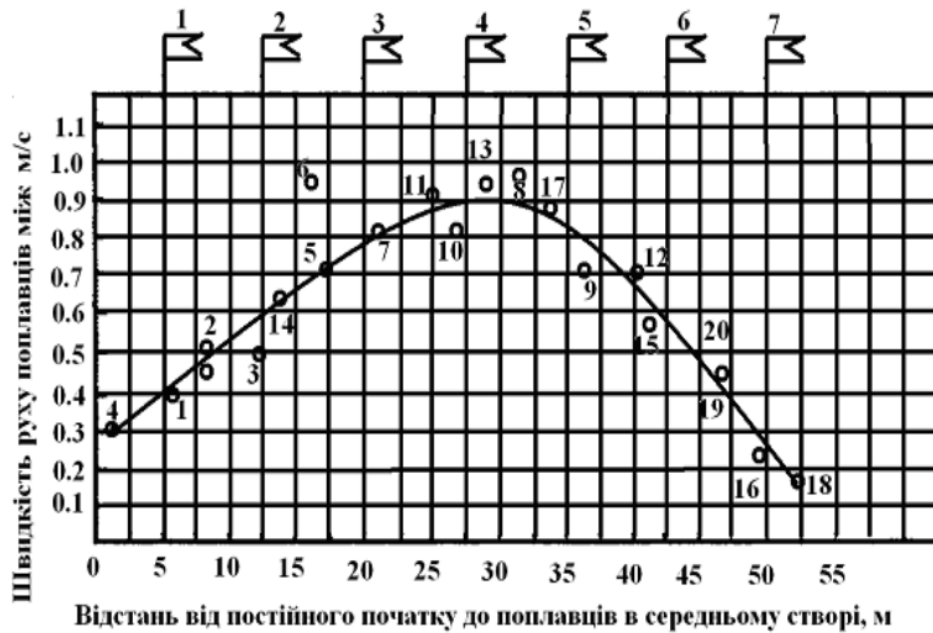


Рисунок 2.5 - Епюра розподілу швидкості руху поплавців по ширині річки [24]

Попри спрощеність, метод поверхневих поплавців досі застосовують для попередніх оцінок водного режиму, зокрема на ранніх етапах досліджень гідропотенціалу малих ГЕС. Такі дані можуть слугувати базою для первинних інженерних рішень. У поєднанні з цифровими інструментами аналітики навіть орієнтовні результати використовуються в системах моделювання [10].

На побудованій епюрі через однакові інтервали уздовж ширини потоку визначають положення швидкісних вертикалей, які зазвичай збігаються з точками проведення глибинних промірів, після чого, використовуючи отримані гідрометричні дані, розраховують площі живого поперечного перерізу між суміжними вертикалями, а на основі цих параметрів здійснюють визначення умовної витрати води згідно з відповідною розрахунковою формулою [24]:

$$Q_{\phi} = k \cdot w_0 \cdot v_1 + w_1 \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} + \dots + w_{n-1} \cdot \frac{v_{n-1} + v_n}{2} + k \cdot w_n \cdot v_n \quad (2.9)$$

де v_1, v_2, v_{n-1}, v_n – поверхневі швидкості на швидкісних вертикалях (м/с); w_0, w_1, w_{n-1}, w_n – площі перетину між швидкісними вертикалями; k – коефіцієнт, що враховує тертя води на урізі.

Фактичну витрату води розраховують за встановленою формулою [24]:

$$Q = Q_{\phi} \cdot K \quad (2.10)$$

де K — перехідний коефіцієнт від фіктивної витрати до дійсної, найчастіше дорівнює 0,86.

Глибинні поплавці застосовуються у випадках, коли швидкість течії не перевищує 0,20 м/с і млинкові вимірювання не дають надійних результатів. Вони також ефективні для визначення меж мертвого простору, де рух води практично відсутній. Методика використання поплавців загалом повторює порядок дій при застосуванні млинка: виконується промір глибин, визначаються площі живого перерізу та розміщення швидкісних вертикалей [20].

Швидкості вимірюються з човна, на якому закріплено три створи: верхній, середній і нижній. Вони розташовані на відстані одного метра один від одного та з'єднані жорсткою рамою (схема на рисунку 2.6). Розрахунок швидкості в точці проводиться шляхом ділення довжини базису на середній час проходження поплавця між створами. Отримані дані дозволяють обчислити витрату води аналогічно до методу з млинком, із дотриманням нормативної точності [26].

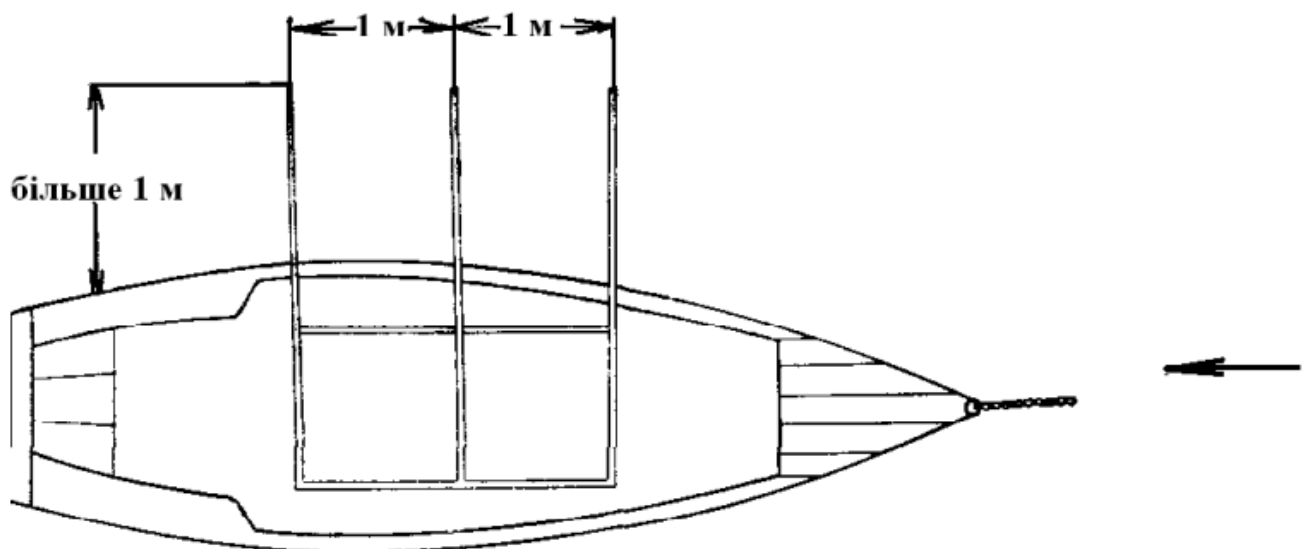


Рисунок 2.6 - Схема обладнання човна для вимірювання швидкостей глибинними поплавцями [24]

2.1.2. Об'ємний метод

Об'ємний метод застосовується переважно для визначення витрат води у дрібних водотоках, зокрема струмках і джерелах, де інші способи вимірювання є технічно складними або економічно недоцільними. Він також використовується у процесі калібрування малих потоків і водозливів, коли необхідна висока точність при роботі з незначними обсягами води [20].

Суть методу полягає у тому, що в обраному місці потік штучно спрямовується через спеціальну конструкцію — вертикальну стінку з отвором, у який вмонтовано лоток або трубу, котрі скеровують воду безпосередньо в мірну посудину або басейн. Це дозволяє здійснювати пряме вимірювання об'єму води за певний проміжок часу.

При невеликій витраті, що не перевищує 5 літрів за секунду, об'ємна витрата визначається шляхом фіксації часу, за який мірна ємність повністю заповнюється. У такому випадку витрату потоку розраховують за відомою формулою, яка відображає співвідношення між об'ємом посудини та тривалістю її заповнення [24]:

$$Q = \frac{W}{t} \quad (2.11)$$

де Q – витрата потоку; W – ємність мірної посудини; t – час який потрібен для заповнення мірної посудини.

Для вимірювання витрати води об'ємним методом використовують мірний посуд різного типу — мензурки, колби, відра чи баки, за умови що час їх заповнення становить не менше 40 секунд для забезпечення точності результатів. Якщо витрата перевищує 5 л/с, воду відводять у мірний басейн об'ємом 1–2 м³, попередньо протарований при різних рівнях. Вимірювання приросту рівня ΔH протягом часу t , що фіксується за допомогою гачкової або голчастої рейки, дає змогу обчислити витрату потоку з достатньою точністю.

2.1.3 Стандарти вимірювань витрат та метрологічні вимоги до точності

У сучасних гідрометричних дослідженнях вимірювання витрати води у відкритих каналах здійснюється відповідно до цілого ряду міжнародних і національних нормативних документів, які регламентують методику проведення вимірювань, допустимі похибки, а також технічні вимоги до обладнання. Одним із головних міжнародних стандартів, що широко застосовується на практиці, є ISO 748:2021. У ньому детально описано метод «швидкість–площа», який базується на точкових вимірюваннях швидкості за допомогою механічних або електромагнітних приладів. Цей підхід дозволяє достатньо точно визначити витрату води навіть за умов неідеального профілю русла, що особливо актуально для багатьох українських річок [21].

Не менш важливим є стандарт ISO 6416:2017, що стосується вимірювання витрати води з використанням ультразвукової техніки часу проходження. Його особливість полягає у застосуванні акустичних доплерівських приладів (ADCP), які дозволяють фіксувати швидкість потоку на різних глибинах русла, забезпечуючи високу роздільну здатність і точність. Саме через це цей метод часто обирають для роботи на автоматизованих гідрологічних постах, де важлива стабільність вимірів у режимі «24/7» [25].

В Україні вимірювання витрати води також здійснюється з урахуванням положень галузевих інструкцій, розроблених Українським гідрометеорологічним центром. Вони адаптують міжнародні вимоги до умов, характерних для українських водотоків, включаючи гірські ділянки Карпат, де протягом року часто змінюється режим течії [27].

Особлива увага приділяється забезпеченню метрологічної достовірності вимірювань. Усі використовувані прилади мають проходити регулярну перевірку і калібрування — зазвичай раз на один-два роки, або ж відразу після ремонту чи виявлення пошкоджень. Процедури калібрування виконуються виключно в акредитованих лабораторіях, згідно з графіками, затвердженими відповідними нормативами. При цьому точність є критично важливою: згідно з ISO 748, в оптимальних умовах вимірювання відносна похибка не повинна перевищувати $\pm 5\%$. У більш складних ситуаціях, як-от під час паводків чи зміни

русла, допускається похибка до $\pm 10\%$, а при орієнтовних розрахунках — навіть до $\pm 15\%$ [21; 25].

Також встановлено чіткі вимоги до класу точності приладів. Допускаються лише пристрої першого або другого класу, як це передбачено ДСТУ та міжнародними стандартами. Зокрема, для систем на основі ADCP обов'язковим є дотримання положень ISO 6416, які гарантують точне зонування потоку за вертикаллю. Проте для збереження точності недостатньо лише відповідного обладнання. Стаціонарні пости потребують регулярного технічного обслуговування: очищення сенсорів, перевірки впливу температури води, змін рівня та швидкості течії. У разі, якщо русло змінило форму, проводиться повторна топографічна зйомка для актуалізації розрахункових даних [27].

2.2. Вимірювання характеристики течії потоку

2.2.1 Побудова гідрографу

Серед методів аналітичного опису гідрографів паводків і водопіль значне практичне значення має прийом згладжування графіків водовіддачі, запропонований Є. Д. Гопченком і Є. Л. Бояринцевим. Його особливістю є збереження головної добової хвилі припливу без суттєвих викривлень, що дозволяє достовірно моделювати як початкову фазу формування стоку, так і процес його подальшого переміщення русловою мережею [28]. Цей підхід ґрунтується на поділі гідрографа на дві складові — схилову й руслову — кожна з яких описується окремим типізованим рівнянням.

Залежність ординати схилового стоку від часу виражається формулою [28]:

$$q'_t = q'_m \cdot (1 - (1/T_0)^n) \quad (2.12)$$

Русловий компонент паводкового гідрографа описується подібним співвідношенням [28]:

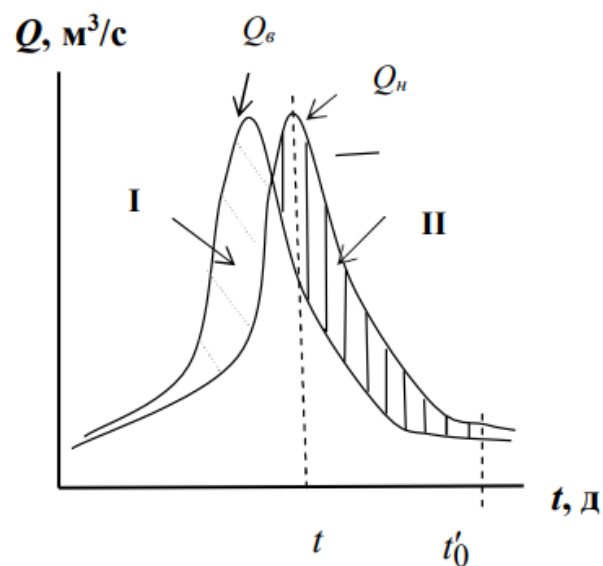
$$q_t = q_m \cdot (1 - (1/T_n)^{m_1}) \quad (2.13)$$

де q'_t та q_t – ординати представлених в розгортці від максимального значення графіків схилового і руслового стоку, л/(с·км²);

q'_m та q_m – їх максимальні значення, л/(с·км²);

T_0 та T_n – тривалості схилового і руслового гідрографів.

На рисунку 2.7 зображено динаміку об'єму води на ділянці річки в період t проходження паводка.



I – накопичення запасу води; II – виснаження запасу води

Рисунок 2.7 – Сумісні гідрографи паводка у верхньому та нижньому створах [28]

Таким чином $W_t = \sum_{t_0}^t \Delta W_i$ – це деякий об'єм води понад початковим об'ємом.

Формування гідрографа водопілля залежить від часу, за який тало-дощові води досягають замикаючого створу водозбору. Цей час складається із тривалості переміщення води по схилах, ярах і русловій мережі. На початкових етапах стікання частина води затримується в локальних заглибленнях рельєфу, де не відбувається безпосередній стік.

Щоб кількісно врахувати об'єм води, який акумулюється в таких пониженнях, використовують спеціальні криві розподілу поверхневої місткості басейну. Вони дозволяють відобразити просторове варіювання здатності рельєфу затримувати воду до моменту формування стійкого поверхневого стоку [28].

Розподіл величин ємності безстічних поглиблень на поверхні басейну можна

описати функцією [28]:

$$f(S) = \frac{1}{P_m} \cdot \exp\left(\frac{-S}{P_m}\right) \quad (2.14)$$

де P_m – повна поверхнева ємність басейну, мм; S – шар води при заповненні всіх безстічних поглиблень на поверхні басейну, мм.

Поверхневий стік виникає лише на тих частинах водозбірної площі, де обсяг води, що накопичується, не перевищує здатність місцевості її віддавати. На початковому етапі танення снігу, коли водовіддача ще обмежена, значна частина талої води затримується у верхніх шарах снігового покриву або безпосередньо на поверхні, що уповільнює початок активного стікання і затримує надходження води до водотоків.

Певна кількість води, що надходить у початкову гідрографічну сітку, позначається як q_i , і її значення може бути виражене через відповідне рівняння, яке описує обсяг поверхневого стоку з урахуванням умов водозбору [28]:

$$q_i = (h_{Vi} - P_i) - W_i \quad (2.15)$$

де $(h_{Vi} - P_i)$ – шар водоутворення на i -у добу, мм; W_i – об'єм води, який акумулюється під снігом, м³.

Ордината схилового стоку W_i формується під впливом гідрологічних характеристик ділянки й може бути описана відповідною математичною залежністю [28]:

$$W_i = A \cdot (h_{Vi} - P_i) \quad \text{при } A < 1 \quad (2.16)$$

Максимального значення акумульований об'єм талої води, що позначається як W_i , досягає в момент утворення проталин, які охоплюють приблизно 10–15 % площі водозбору. Саме в цей період спостерігається стан, коли $W_i = W_{max}$. Водночас граничний об'єм накопичення води на поверхні під сніговим покривом, позначений як W_{max} , може бути визначений за спеціальною залежністю, що враховує фізико-географічні особливості басейну та термічний режим танення

снігу [28]:

$$W_{\max} = 0,2 \cdot Y - 4 \quad (2.17)$$

де Y – шар стоку за період весняного водопілля, мм.

У подальший період накопичення талої води, позначеної як W_i , припиняється, після чого розпочинається процес стікання тало-дощових вод із ярів та балок у напрямку до основної гідрографічної мережі. Цей етап характеризується активним формуванням поверхневого стоку та включенням тимчасових водотоків до водозбірної системи [28]:

$$q_i = (h_{Vi} - P_i) + \Delta W_i \quad (2.18)$$

де ΔW_i – об'єм води, яка потрапляє з ярів та балок, м³.

Оскільки загальна тривалість стікання води по схилах, як правило, перевищує час її переміщення по річковій мережі, урахування процесів, що відбуваються на водозборі до початку руслового стоку, дає змогу підвищити завчасність гідрологічного прогнозу. Сам час стікання води по схилах та річковому руслу залежить від морфометричних і морфологічних характеристик водозбору — таких як ухили, довжини схилів, форма й розгалуженість русел — і може змінюватися в широких межах: від кількох годин у випадку невеликих гірських потоків до кількох десятків днів для великих рівнинних річкових систем [28]. Саме зазначена тривалість є визначальним чинником для встановлення можливого горизонту завчасності гідрологічного прогнозу.

Поточне значення витрати води Q у замикаючому створі річки в будь-який момент часу t може бути обчислене на основі інформації про товщину шару сніготанення та величину водовіддачі, з урахуванням впливу рідких опадів. Для цього використовується крива добігання r_δ , яка відображає часову послідовність надходження тало-дощових вод до створу з певною завчасністю δ [28]:

$$Q_t = \sum_{i=1}^t q_i \cdot r_{\delta_{t-i+1}} \quad (2.19)$$

де q_i — приплив води до руслової мережі.

2.2.2 Побудова кривої тривалості потоку

Оцінювання гідрологічних характеристик течії, зокрема в рамках побудови кривих тривалості витрат води, базується на сукупності наукових підходів, що охоплюють статистичний аналіз, моделювання природних процесів, графічне представлення даних та використання програмних засобів для обробки інформації. До основних статистичних прийомів відносять обчислення середніх витрат за добу, місяць і рік, аналіз стандартного відхилення, медіанних значень, а також дослідження часових рядів з метою виявлення повторюваних закономірностей, сезонних варіацій та наявності довгострокових змін. У межах такого аналізу важливим є вивчення кореляцій між рівнями і витратами води, що дає змогу будувати залежності типу $Q(H)$, а також встановлювати зв'язки між кількісними параметрами стоку і чинниками його формування, зокрема опадами та температурними умовами. Статистичні методи також дозволяють визначати забезпеченість та період повторюваності екстремальних витрат, що особливо актуально для аналізу паводкових і меженних явищ [29].

Моделювання гідрологічних процесів, у свою чергу, ґрунтується на використанні концептуальних схем типу "опади-стік" і гідравлічних моделей, які відтворюють динаміку водного потоку в межах водозборів. У ході досліджень широко застосовуються графічні способи представлення інформації, зокрема побудова гідрографів, кривих тривалості витрат і рівнів, а також аналітичних графіків залежностей між основними гідрологічними величинами. Значного поширення набули також автоматизовані системи збору й передачі гідрологічної інформації, що істотно підвищує достовірність та оперативність моніторингу, особливо при прогнозуванні небезпечних ситуацій, пов'язаних із водним режимом, і при управлінні ресурсами річкових басейнів [19].

Сучасні автоматизовані пости спостереження комплектуються багатофункціональними сенсорними системами, які забезпечують вимірювання рівня води (зокрема ультразвуковими, радарними, гідростатичними або поплавковими датчиками), швидкості потоку (за допомогою акустичних доплерівських приладів чи електромагнітних сенсорів), витрат води (через комбінування виміряних рівнів і швидкостей або за допомогою стаціонарних

витратомірів), а також інших параметрів, серед яких температура води і повітря, кількість опадів, показники якості води (мутність, кислотність, концентрація розчиненого кисню тощо). Усі ці вимірювання автоматично фіксуються і зберігаються за допомогою спеціалізованих реєстраторів даних, що працюють із заданою частотою. Більшість таких систем функціонують автономно, часто використовуючи сонячні енергетичні модулі як джерело живлення [26].

Передача зібраної інформації відбувається через телеметричні канали, до яких належать мобільні мережі різних поколінь, супутниковий та радіозв'язок. Обробка даних здійснюється в профільних центрах із використанням серверного обладнання та програмних комплексів, що забезпечують зберігання, аналіз і візуалізацію інформації, інтеграцію з базами даних і системами підтримки прийняття рішень. Автоматизація спостережень забезпечує суттєве зростання точності завдяки зменшенню людського фактору, а також дає змогу оперативно отримувати відомості, незалежно від погодних умов і часу доби. Крім цього, такі системи дозволяють зменшити трудові витрати, забезпечують можливість розгортання спостережень у важкодоступних регіонах, а також створюють підґрунтя для отримання детальних і регулярних гідрологічних даних, що можуть інтегруватися з іншими джерелами в межах аналітичних і управлінських моделей [16].

2.2.3 Вимірювання тиску (напору)

Вимірювання тиску або напору рідини є одним із базових вимірювань у гідромеханіці та прикладній гідрології, оскільки від цього параметра залежить функціонування численних інженерних систем і природних процесів. Суть гідростатичного методу полягає у використанні лінійної залежності між висотою стовпа рідини та тиском, що чиниться ним на контрольну поверхню або задану точку вимірювання. Інакше кажучи, тиск обумовлений гравітаційним впливом маси рідини над точкою, де встановлено датчик, і підлягає обчисленню за класичним рівнянням гідростатики [28]:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.20)$$

де P - тиск стовпа рідини; ρ – густина рідини ($\text{кг} / \text{м}^3$); g - прискорення вільного падіння ($9,8 \text{ м/с}^2$); h – висота стовпа рідини (м).

До сучасних високоточних засобів вимірювання тиску належать прилади, що працюють на основі п'єзоелектричного ефекту. Принцип їх дії полягає в тому, що при деформації кристалічної речовини виникають електричні заряди з протилежними знаками на її протилежних гранях. Ці заряди є прямим результатом дії зовнішньої сили, яка їй відповідає прикладеному тиску. Таким чином, сила тиску перетворюється в електричний сигнал, який фіксується вимірювальним пристроєм.

У випадку деформаційного п'єзоперетворювача (як зображено на рис. 2.8, б), тиск ρ викликає механічну дію на чутливий елемент. П'єзокристал, у свою чергу, генерує електричний заряд, пропорційний прикладеному зусиллю. Цей сигнал передається на підсилювач, де обробляється і перетворюється в уніфіковану електричну форму, яка точно відображає значення тиску.

На схемі (рис. 2.8) зображено конструкції двох типів сенсорів: струнного (а) і п'єзоелектричного (б). У першому випадку навантаження передається від мембрани до натягнутих струн, які утримуються пружинами. У другому — ключовими вузлами є п'єзоперетворювач, елемент, що сприймає тиск, та електронний підсилювач сигналу.

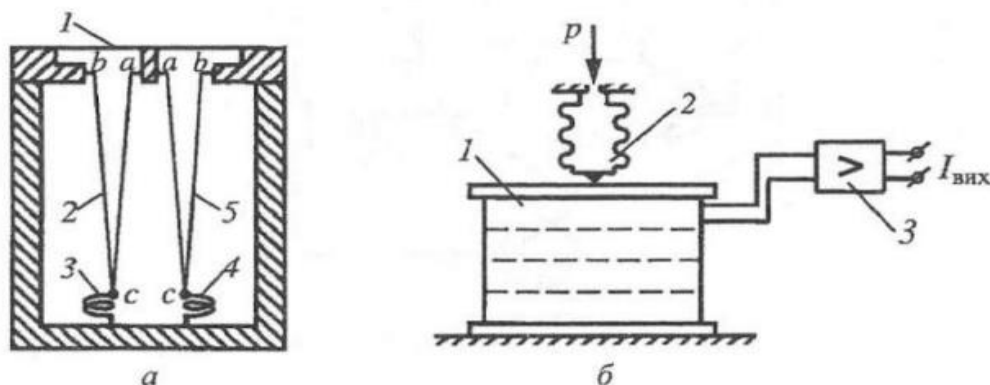


Рисунок 2.8 – Схема струнного (а) та п'єзоелектричного (б) вимірювачів тиску [30]:

а: 1 – мембрана; 2, 5 – струни; 3, 4 – пружини; б: 1 – п'єзоелектричний перетворювач; 2 – ЧЕ тиску; 3 – підсилювач

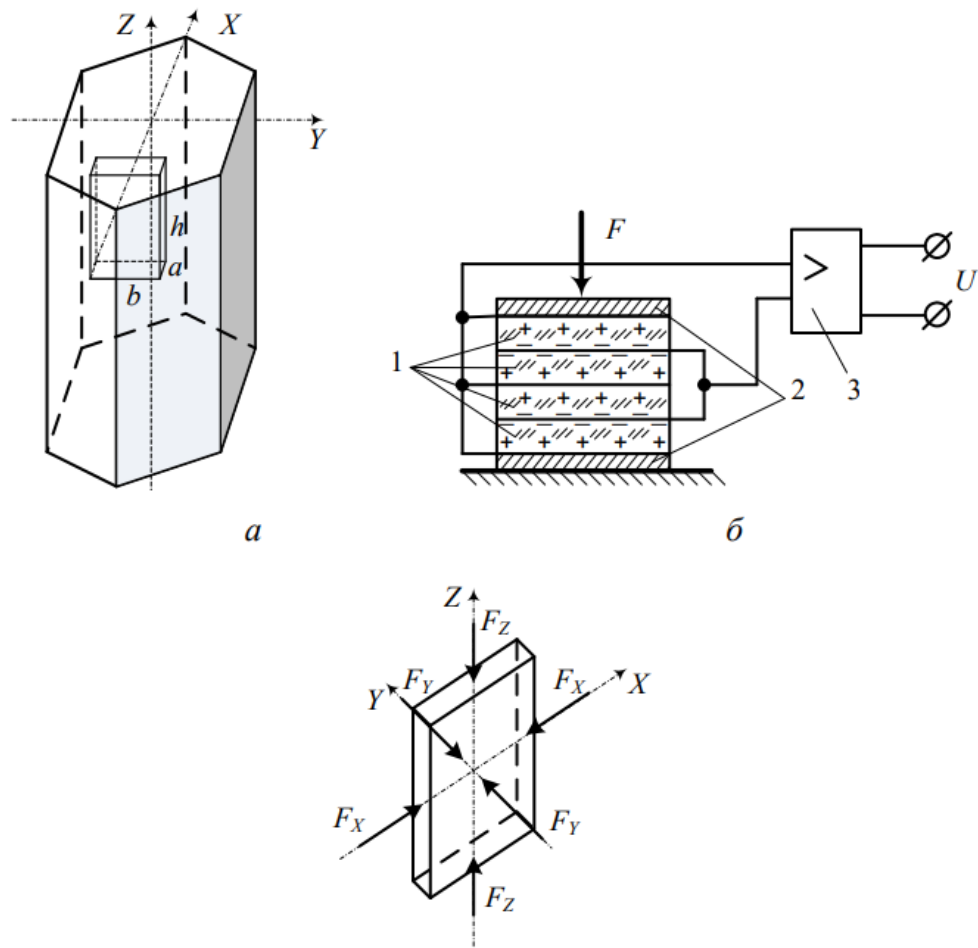


Рисунок 2.9 – П'єзоелектричний перетворювач [30]

а – п'єзочутливий елемент; б – п'єзоелектричний перетворювач зусилля; в – п'єзопластина; 1 – п'єзопластини; 2 – ізолятори; 3 – підсилювач

Конструкція п'єзоелектричного перетворювача докладно показана на рисунку 2.9. Тут можна побачити чутливий елемент (а), сам перетворювач із прикладеним навантаженням (б), набір п'єзопластин (в), позначених під номером 1, ізоляційні елементи (2) та підсилювач (3). Така конфігурація забезпечує ефективне функціонування пристрою у вимірюваннях динамічних тисків, зокрема в діапазоні від 10^4 до 10^7 паскалів, і в широкому спектрі частот — від кількох герц до десятків кілогерц.

Слід урахувати, що під час роботи з динамічними навантаженнями значний вплив має так званий квазістатичний тиск, який зазвичай набагато перевищує миттєві значення і може досягати 10 мегапаскалів. Окрім цього, у приладобудуванні для вимірювання тиску також застосовуються п'єзотранзистори — високочутливі елементи, що реагують на зміну тиску та вбудовуються у відповідні сенсорні системи.

На рисунку 2.10 подано електричну схему диференціального манометра з використанням двох п'єзотранзисторів (так званих пітранів). У цій схемі тиск сприймається мембранними кришками (1 і 3) і передається на чутливі елементи (2), сигнал з яких підсилюється транзистором (4). Для стабілізації роботи системи використовується стабілітрон (5).

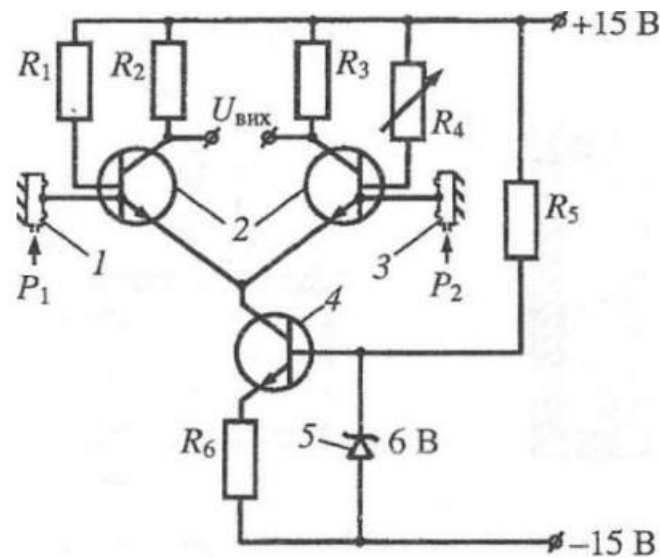


Рисунок 2.10 – Принципова електрична схема дифманометра з чутливими до тиску транзисторами (пітранами) [30]:

1,3 – мембранні ковпачки; 2 – пітрани; 4 – транзистор; 5 – стабілітрон

Пітран являє собою плоску структуру на основі кремнієвого кристалу, побудовану за принципом р–п переходу. Його шар емітер–база прикріплений до внутрішньої поверхні мембранного ковпачка, що виконує функцію елемента сприйняття навантаження. Коли тиск на мембрани (позначені як 1 і 3) зростає, на пітран (2) передається різниця тисків $P_1 - P_2$, що, своєю чергою, змінює вихідну напругу. Транзистор (4) та стабілітрон (5) використовуються для утримання робочої точки пітрану в стабільному стані, що необхідно для правильної роботи всієї системи.

Ця схема побудована з урахуванням п'єзоефекту, де прикладене механічне навантаження перетворюється в електричний сигнал. Такий підхід забезпечує точність у вимірюваннях динамічних тисків, особливо в автоматизованих системах контролю.

Серед пристроїв для вимірювання тиску значну роль відіграють манометри, які класифікують на опірні та диференціальні. Перші застосовуються для вимірювання високих тисків — понад 100 МПа. Їхній принцип дії базується на зміні електричного опору матеріалу (провідника або напівпровідника), що виникає внаслідок деформації під дією тиску [30].

Диференціальні манометри (дифманометри) використовують для визначення надлишкового тиску, різниці тисків, рівня рідини та об'єму витрат газу чи рідини. Такі прилади часто поєднують із звужувальними елементами, що формують лінійну залежність між перепадом тиску і величиною витрати. Завдяки цьому досягається висока точність навіть в умовах інтенсивної експлуатації [30].

Прикладом може слугувати рідинний дифманометр, у якому перепад тисків P_1-P_2 компенсується різницею у висоті рідинного стовпа між двома колінами. У класичних конструкціях з нерухомими колінами саме висота рідини є прямим показником перепаду тиску. В інших модифікаціях значення визначають за переміщенням дзвону, рухомого елемента або за кутом обертання кільця, яке реагує на тиск [30].

Найпростішим варіантом рідинного дифманометра з візуальним контролем є U-подібна скляна трубка, заповнена спеціальною рідиною (рис. 2.11, а). У промислових умовах використовують вдосконалені моделі з двох товстостінних трубок, вмонтованих у металеві корпуси, які відомі під назвою двотрубні дифманометри. На рисунку 2.11 подано схеми двох типів приладів: U-подібного (а) і одностороннього (б). Позначення 0–0 вказує на нульовий рівень, а D та d — відповідно діаметри чашки та трубки. Такі пристрої відзначаються простотою, надійністю та зручністю візуального спостереження за змінами тиску, що забезпечує їх широке застосування у виробництві та лабораторних дослідженнях.

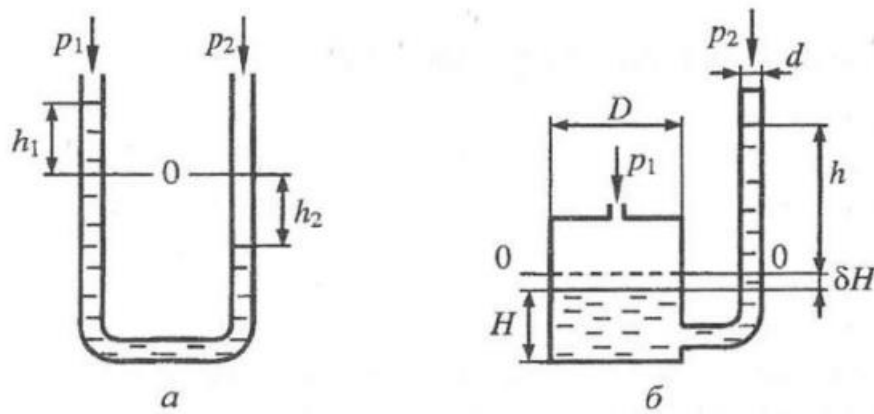


Рисунок 2.11 – Схеми U-подібного (а) та однотрубного (б) дифманометрів [30]:

0-0 – нульовий рівень; D і d – діаметри чашки і трубки дифманометра

U-подібний дифманометр описується наступною математичною формою [28]:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.21)$$

де $h = h_1 + h_2$ – різниця рівнів манометричної рідини в колінах (трубках) дифманометра; ρ – густина манометричної рідини.

Для оцінки чутливості використовується таке рівняння [28]:

$$S_1 = \frac{\Delta h}{\Delta p} = \frac{(h_1 + h_2)}{[\rho \cdot g \cdot (h_1 + h_2)]} = \frac{1}{\rho \cdot g} \quad (2.22)$$

Під час проведення вимірювань із використанням двотрубного дифманометра похибка може збільшуватися вдвічі через неточності у фіксації рівнів у обох трубках. Це призводить до суттєвого подовження часу вимірювального процесу, що особливо небажано за умов швидкоплинних змін витрати або при великій кількості повторюваних спостережень, де затримки можуть негативно позначитися на точності та актуальності результатів.

Щоб мінімізувати ці обмеження, була створена однопросвітна конструкція дифманометра, в якій одну з трубок замінено широкою циліндричною посудиною, а вимірювання рівня проводиться лише в одній трубці (рис. 2.11, б). Така модифікація дає змогу зменшити вплив похибок, пов'язаних із зчитуванням, і

пришвидшити сам процес, що робить прилад зручнішим для оперативних і масових вимірювань.

У пристроях такого типу обсяг рідини, витиснутої під дією тиску p_1 із резервуара, дорівнює об'єму, що надходить у вимірювальну трубку. Оскільки площа поперечного перерізу посудини f пов'язана з висотами стовпів за співвідношенням $Hf=hf$ (де H — висота стовпа в посудині, а h — у трубці), можна вивести основне рівняння об'ємного балансу [31, 28]:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot (h + H) = \rho \cdot g \cdot h \cdot (1 + f/F) \quad (2.23)$$

На відміну від U-подібних моделей, однотрубні дифманометри характеризуються нижчим рівнем чутливості [28]:

$$S_2 = \frac{1}{[\rho \cdot g \cdot (1 + f/F)]} \quad (2.24)$$

Щоб забезпечити точність вимірювань в умовах коливань температури, під час експлуатації часто застосовують температурну компенсацію. Вона дає змогу врахувати вплив температури на густину рідини та відповідно скоригувати результати. Для цього, як правило, використовуються спеціальні таблиці поправок, за якими вручну вносяться необхідні коригування

Температурну поправку зазвичай обчислюють за наступним співвідношенням [28]:

$$P_{\text{кор}} = \rho(T) \cdot g \cdot h \quad (2.25)$$

де $\rho(T)$ - густина води при температурі T .

2.3. Оцінка потужності установки та вироблення енергії

Оцінка потужності гідроелектроустановки (ГЕС або міні-ГЕС) базується на гідрологічних, технічних і метрологічних даних. Надійність і точність результатів

прямо залежать від метрологічного забезпечення — точності вимірювання витрати води (Q), напору (H), температури води, а також правильності врахування ККД системи (η).

Основна формула для оцінки потужності гідроустановки [28]:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.26)$$

де P - потужність (Вт); η - ККД (турбіна + генератор); ρ - густина води, кг/м³; g - 9,8 м/с²; Q - витрата води, м³/с; H - напір, м.

Вироблення енергії (E) гідроенергетичною установкою за певний період часу визначається як інтеграл потужності за цим проміжком часу [28]:

$$E = \int P(t)dt \quad (2.27)$$

На практиці, для оцінки вироблення енергії за певний період, часто використовують середню потужність за цей період та тривалість періоду [28]:

$$E = P_{\text{сер}} \cdot T \quad (2.28)$$

де E - вироблена енергія (кВт·год); $P_{\text{сер}}$ - середня потужність за період T (Вт); T - тривалість періоду.

2.3.1 Метрологічне забезпечення оцінки потужності та вироблення енергії

Точність визначення гідрологічних параметрів, які закладаються в основу розрахунку потужності та прогнозу вироблення електроенергії на малих гідроелектростанціях, має вирішальне значення для досягнення достовірних енергетичних показників. Зокрема, критичну роль у цьому відіграють такі фізичні величини, як об'ємна витрата води, висота гідравлічного напору та температура водного середовища. Навіть незначні похибки у визначенні цих характеристик

здатні спричинити суттєві відхилення в оцінці ефективності функціонування гідроагрегатів і в коректному плануванні режимів їхньої експлуатації [21].

Встановлено, що потужність гідроустановки є прямо пропорційною до витрати води. Відповідно, помилка у визначенні цього параметра призводить до еквівалентної похибки в обчисленні потужності та сумарного обсягу електричної енергії, яку виробляє установка. Наприклад, при відхиленні вимірювання витрати на рівні 5% спостерігається приблизно такий самий рівень невідповідності у фінальних розрахунках [6]. Аналогічна закономірність спостерігається і у випадку висоти напору, що також має лінійну залежність із величиною потужності. У цьому випадку навіть похибка в 1% при визначенні напору трансформується у близько 1% помилки в оцінці енергогенеруючої здатності станції [31].

Температурний режим водного середовища, хоча і не має прямого впливу на потужність у загальноприйнятій формулі розрахунку, опосередковано впливає через зміну густини рідини. Оскільки густина входить до рівняння потужності у вигляді коефіцієнта, її коливання можуть викликати незначні, але помітні відхилення в обчисленнях. Зокрема, похибка у вимірюванні температури води в межах одного градуса Цельсія може змінити значення густини на 0,02–0,05%, що має значення у системах, де передбачено високоточне енергетичне моделювання [30].

Загальна похибка визначення потужності залежить від сукупності похибок вимірювання зазначених параметрів. Якщо розглядати ці відхилення як незалежні між собою, можливо застосувати узагальнену формулу для обчислення відносної сумарної похибки потужності, яка враховує варіації витрати, напору та густини води. У спрощеному вигляді, без врахування втрат у силовому ланцюгу та ефективності перетворення, така оцінка може бути подана у вигляді кореня квадратного із суми квадратів відносних похибок [5].

Остаточна похибка, яка виникає під час обчислення потужності, обумовлена точністю визначення всіх вхідних параметрів, зокрема витрати води, напору та температури. У випадках, коли ці похибки не залежать одна від одної, можливо застосувати узагальнену оцінку відносної похибки потужності шляхом використання відповідної аналітичної формули (для спрощеного випадку, не враховуючи похибку ККД) [28]:

$$(\Delta P/P)^2 \approx (\Delta \rho/\rho)^2 + (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta H/H)^2$$

Такий підхід надає можливість кількісно визначити вплив кожного окремого параметра на загальну невизначеність у розрахунку потужності, що є надзвичайно важливим у процесі формування обґрунтованих енергетичних прогнозів. Отже, підвищення точності приладів і методів вимірювання витрати води, гідравлічного напору та температури прямо пов'язане зі зниженням загальної похибки при оцінюванні потенційного вироблення електроенергії.

Висновок до розділу

Отже, надійне оцінювання гідроенергетичних можливостей малих річок потребує максимальної точності у встановленні основних гідрологічних характеристик, зокрема витрати води, величини напору та температурного стану водного середовища, оскільки саме ці параметри безпосередньо впливають на продуктивність та доцільність експлуатації малої гідроелектростанції. Застосування таких підходів, як млинкові, поплавкові, акустичні та об'ємні методики, відповідно до вимог міжнародних нормативів ISO 748 і ISO 6416, дає змогу адаптувати отримані результати до специфічних умов річкових систем України. Водночас особливе значення має впровадження автоматизованих платформ збору та обробки інформації, які не лише забезпечують постійний контроль за змінами гідрологічного режиму, а й дозволяють оперативно інтегрувати ці дані у цифрові аналітичні моделі.

Розрахунок енергетичної потужності малої гідроелектростанції зумовлений не лише точністю гідрологічних спостережень, а й ретельністю дотримання метрологічних норм. Навіть незначна похибка у визначенні вхідних параметрів здатна призвести до істотних розбіжностей у розрахунках очікуваного обсягу генерації. Забезпечення надійного метрологічного супроводу передбачає низку критично важливих пунктів:

- використання тільки повірених засобів вимірювальної техніки;
- використання тільки стандартизованих методик виконання вимірювань, що мінімізує вплив людського фактору та вплив навколишнього середовища;

- постійний контроль за показаннями приладів для вчасного виявлення несправностей або відхилень в роботі системи;
- проведення оцінки невизначеності вимірювань відповідно до міжнародних стандартів.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ НА РОБОТУ МАЛОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1. Вибір місця розташування малої ГЕС

3.1.1 Географічне розташування та особливості річки Черемош

Річка Черемош (див. рис. 3.1) належить до типових гірських водотоків Українських Карпат, формуючи основу для розвитку природних ландшафтів, живлення місцевих екосистем і водопостачання в межах регіону її басейну. Її русло історично слугувало не лише водною артерією, але й умовною межею між двома етнокультурними регіонами — Гуцульщиною та Буковиною. У геоморфологічному плані Черемош є типовою карпатською рікою з активним стоком, великою кількістю малих приток і яскраво вираженим рельєфом долини. Поєднання сезонної гідрологічної динаміки з високою питомою енергією потоку створює умови для раціонального використання її ресурсу в межах малих гідроенергетичних проєктів за умови дотримання екологічних стандартів [33].



Рисунок 3.1 – Панорамне зображення річки Черемош з висоти

Проектована ділянка будівництва гідровузла охоплює територію Вижницького району Чернівецької області — регіону з гірським і передгірним рельєфом, який відзначається високим рівнем зволоження, переважанням лісового покриву та розгалуженою мережею водотоків. Чернівецька область розміщується на південному заході України і межує з Івано-Франківською, Тернопільською областями та Румунією. Сам Вижницький район вирізняється різноманітністю геолого-геоморфологічної будови, значними коливаннями висот і наявністю природоохоронних територій, що вимагає ретельного врахування екологічних чинників при проектуванні будь-яких інженерних споруд [34].

Черемош бере свій початок у місці злиття двох витоків — Білого Черемоша та Чорного Черемоша — поблизу села Устеріки, що на Івано-Франківщині, і далі прямує на південний схід, формуючи природну межу між областями. Середня абсолютна висота водозбору до села Устеріки становить близько 1100 метрів над рівнем моря [44].

Протікає територією Верховинського, Косівського та Снятинського районів Івано-Франківської області, а також Путильського, Вижницького і Кіцманського районів Чернівецької області. Впадає до річки Прут поблизу селища Неполоківці. Загальна довжина Черемоша складає близько 80 км, однак із врахуванням витоків система перевищує 160 км [44].

Правими притоками річки є Путила, Товарниця та Виженка, з яких найповноводнішою вважається річка Путила. Лівобережна притока — Великорожинка. Крім них, існує багато малих водотоків, деякі з яких змінюють назву на окремих ділянках свого русла, що характерно для гірських річкових систем із розгалуженою мережею. Басейн Черемоша має гірський характер із глибоко врізаними долинами, значним перепадом висот і кам'янистим руслом, яке формує численні пороги. Струмки й притоки, які формуються на крутих схилах Карпат, під час дощів чи танення снігу стрімко наповнюють основне русло, формуючи короткочасні паводкові підйоми, що потребують гідрологічного прогнозування при проектуванні гідротехнічних споруд [35].

Гідрологічний режим річки Черемош формується в умовах гірської частини Українських Карпат і характеризується значною залежністю від кліматичних чинників, насамперед від кількості опадів, інтенсивності танення снігу навесні та

особливостей рельєфу басейну. Поєднання атмосферного, снігового та ґрунтового живлення створює типовий для карпатських річок режим із вираженими паводками в теплий період року, коли основна частина стоку формується внаслідок весняного сніготанення, а також частих літніх злив. В умовах значного похилу та складної геоморфології русла, Черемош демонструє високі пікові витрати, а коливання рівня води можуть бути досить різкими, що вимагає точного прогнозування у разі проектування гідротехнічних споруд [33].

Відповідно до гідрологічного районування України, річка Черемош належить до Дністровсько-Прутської області підвищеної водності, яка охоплює південно-західну частину країни з переважанням гірського та передгірного рельєфу. Ця область відзначається значною щільністю гідрографічної мережі, активним стоком і високою водністю річок у порівнянні з іншими регіонами України. Черемош є правою притокою Пруту і, таким чином, належить до басейну Дунаю, що зумовлює її включення у транскордонну систему водного управління, важливу як з екологічної, так і з економічної точки зору [36].

Середній річний сток річки становить близько $0,81 \text{ км}^3$, що є характерним для середньої за масштабами річкової системи з переважанням гірського типу живлення. За розрахунками, поверхневий стік у межах басейну Черемоша коливається в межах 300–400 мм, залежно від кліматичного року та висотного поясу. Підземна складова стоку є значно меншою і в середньому оцінюється на рівні 30–40 мм, що пояснюється переважанням щільних геологічних порід і обмеженим проникненням атмосферних опадів у глибші шари ґрунту [37]. Водночас поверхневий стік є головним джерелом формування витрати, що підтверджується сезонним характером гідрографа річки.

Протягом року водність річки Черемош залишається на рівні близько $30 \text{ м}^3/\text{с}$, однак у період сильного танення снігу або під час рясних злив потік значно посилюється. У періоди інтенсивного танення снігу або після зливових дощів, витрата води в річці Черемош може суттєво зрости, подекуди перевищуючи $2400 \text{ м}^3/\text{с}$, що є типовим для стрімких карпатських річок [42]. У нижній, передгірній частині Черемоша не спостерігається надходження великих приток, що робить її особливо вразливою до локальних атмосферних явищ. Така ситуація ускладнює природне вирівнювання стоку, оскільки відсутні додаткові водотоки, які

могли б поглинати частину навантаження у періоди пікових надходжень води [43].

Показник каламутності води у Черемоші варіює в межах від 100 до 200 грамів на кубічний метр. Така характеристика є типовою для гірських річок із розмитим руслом і активною ерозією схилів, особливо під час паводків. Висока швидкість течії сприяє переносу твердих частинок, що збільшує навантаження на гідротехнічні споруди й вимагає врахування при їхньому проєктуванні. Випаровування з поверхні водної гладі річки Черемош, відповідно до багаторічних гідрометеорологічних спостережень, становить у середньому від 350 до 400 мм на рік. Цей показник є відносно сталим, хоча може зазнавати коливань залежно від кількості сонячних днів, температурного режиму та швидкості вітру [38].

3.1.2 Створення напору

У природному стані потенціал річкового потоку розподіляється нерівномірно вздовж усього русла, і енергія води поступово втрачається внаслідок тертя, турбулентності та розсіювання на мілководдях і порогах. Така форма існування енергетичного ресурсу є непридатною для безпосереднього технічного використання, оскільки в ній відсутній стабільний і зосереджений напір, який можна було б ефективно перетворити на електричну енергію [48]. Щоб забезпечити можливість концентрації енергії потоку, в сучасній гідроенергетиці застосовують штучні гідротехнічні споруди, за допомогою яких розосереджений природний перепад ділянки русла фокусують в одному створі, створюючи визначений напір H , придатний для дії на робочі елементи турбіни.

Саме завдяки такій техніці створення штучного перепаду стає можливим перетворення кінетичної та потенціальної енергії води в механічну енергію обертання, а далі — в електричну енергію. Залежно від умов конкретної місцевості, характеру русла, доступного водозбору та напору, використовують різні принципові схеми побудови гідроелектростанцій. Ці схеми відрізняються способом створення напору, організацією водозбору та режимами роботи обладнання. До типових підходів належать греблеві, дериваційні та комбіновані схеми, кожна з яких передбачає власну конструктивну логіку і використовується у різних гідрографічних умовах. Загальна класифікація таких рішень подана у вигляді

схематичного рисунка (рис. 3.2), що ілюструє основні типи організації напору на ділянках річкового потоку [49].

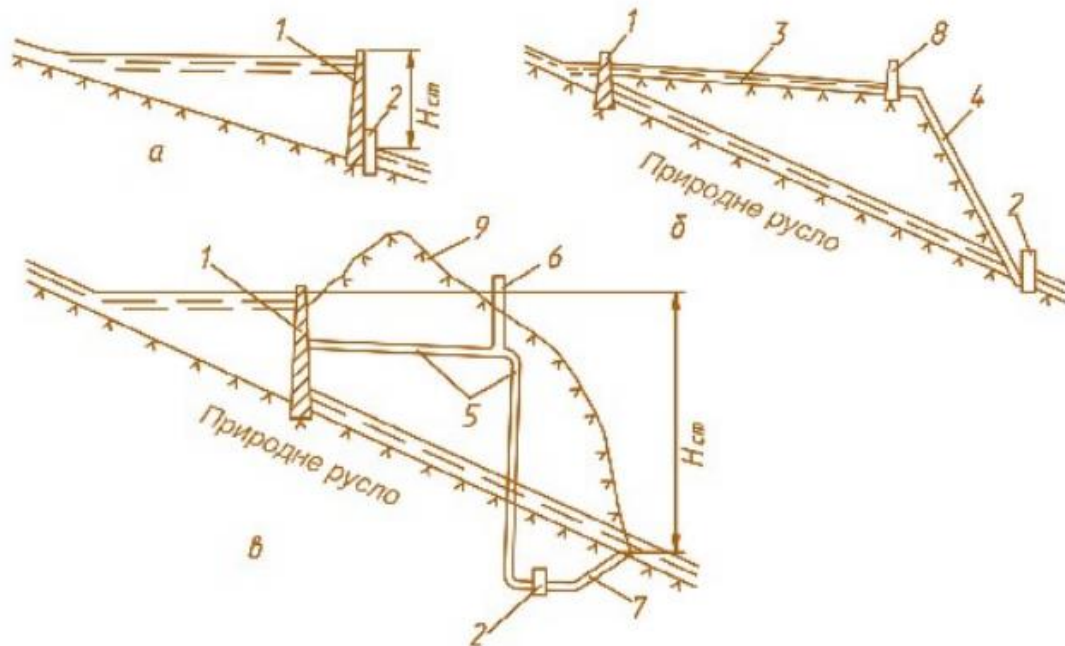


Рисунок 3.2 – Варіанти реалізації напірної частини гідровузла:

а – гребельна; б – дериваційна; в – комбінована;

1 – гребля; 2 – будинок ГЕС; 3 – дериваційний канал; 4 – напірний трубопровід; 5 – напірний тунель; 6 – зрівнювальний резервуар; 7 – відвідний тунель; 8 – водоприймач; 9 – природна поверхня берегового схилу [50]

Гребельний тип схеми організації гідроелектростанції передбачає створення необхідного напору шляхом штучного підняття рівня води за допомогою гідротехнічної споруди, яка перекриває русло річки. Унаслідок цього утворюється водосховище, яке не лише акумулює об'єм води для подачі на турбіни, а й виконує функцію регулятора стоку. Завдяки створенню водного резервуара забезпечується можливість оперативного чи довготривалого регулювання витрати води з метою оптимізації вироблення електроенергії у залежності від графіка споживання. Таке регулювання може здійснюватися в межах добових, тижневих, сезонних або багаторічних режимів і значно підвищує як гарантовану, так і встановлену потужність станції. Водночас покращуються показники виробітку електроенергії та загальна ефективність експлуатації ГЕС як об'єкта енергетичної інфраструктури [51].

Однак використати увесь природний перепад висот річкового русла між витоком і гирлом шляхом зведення однієї великої греблі практично неможливо, оскільки це призвело б до надмірного затоплення великих площ, включаючи господарські угіддя, населені пункти та екосистеми. З цієї причини у випадках реалізації гребельних схем довготривалі річки поділяють на окремі відрізки, на кожному з яких зводиться окрема гребля. Підпір, створений на черговій ділянці, поширюється вгору по течії — до межі, де починається зона впливу наступної вище розміщеної споруди. Такий каскадний принцип дозволяє більш повно та ефективно освоїти енергетичний потенціал русла без істотного втручання в навколишнє середовище [52].

На відміну від гребельного підходу, для гірських річок, які характеризуються відносно невеликим обсягом водного стоку, але значним природним ухилом русла, більш прийнятною є дериваційна схема створення напору. Вона базується на ідеї зосередженого використання природного перепаду висот за рахунок відведення води зі струменя штучним водоводом — трубопроводом або відкритим каналом. Вода потрапляє до машинного залу, розташованого на нижчому рівні, де вже відбувається її енергетичне перетворення. Завдяки відсутності масштабного гребельного впливу, така схема вважається менш конфліктною в екологічному плані та значно ефективнішою у складному гірському рельєфі з глибокими долинами та різкими перепадами висот [52].

У межах дериваційної концепції створення гідравлічного напору вода з русла річки за допомогою гідротехнічної споруди відводиться в окремий канал або тунель, що отримав назву дериваційного водоводу. Цей процес зазвичай розпочинається на верхній межі ділянки використання, де формується водозабірний створ. Далі потік переміщується по трасі із мінімальним ухилом, з урахуванням природного рельєфу, до нижньої точки, де встановлено будівлю гідроелектростанції. У результаті такої топографічної різниці формується природний напір, який і є джерелом енергії, що перетворюється в електричну. Якщо при цьому використовується відкритий канал або безнапірний тунель, то система вважається безнапірною і, відповідно, втрачається частина гідравлічного потенціалу внаслідок опору стінкам водоводу та турбулентності, що проявляється як гідравлічні втрати.

Коли ж дериваційний шлях реалізується у вигляді напірного трубопроводу або тунелю, утворюється напірна деривація. У такій схемі будівля ГЕС зазвичай розташовується в нижній частині дериваційної траси, а між напірною ділянкою та водоприймальними спорудами розміщується зрівнювальний резервуар або башта, яка виконує функцію зменшення імпульсних навантажень, що виникають при раптових змінах витрати (гідроудари). В окремих випадках напірна деривація поєднується з гребельним підпором — тоді формується комбінована схема, що дозволяє гнучко адаптуватися до умов рельєфу та режиму водності, забезпечуючи водночас стабільну генерацію електроенергії й мінімальний вплив на довкілля. Існують також варіанти реалізації відвідної деривації, при якій вода відводиться вже після проходження через турбіну до нижчого рівня. Така схема може мати переваги на ділянках, де важливо зберегти екологічний режим водотоку на поверхні, або якщо гідротехнічна споруда повинна бути максимально прихованою в рельєфі.

У специфічних випадках, переважно в умовах гірської місцевості, для створення напору використовується різниця рівнів між двома гідрологічно незалежними водними об'єктами — наприклад, річками або озерами, що належать до різних басейнів. У цьому разі між ними прокладається тунель або канал, через який вода спрямовується з вищого резервуара в нижчий, що дозволяє отримати додаткову енергію без значних екологічних втручань.

Остаточне рішення щодо вибору типу схеми та її інженерного виконання приймається на основі техніко-економічного обґрунтування, в якому враховуються усі природні, гідрологічні, геологічні та соціально-економічні чинники конкретної ділянки будівництва [52].

3.1.3 Вибір місця розташування малої ГЕС з використанням програмного забезпечення RETScreen Expert та Google Earth

З метою визначення просторових характеристик руслового профілю річки Черемош та подальшої аргументації вибору оптимальної ділянки для гідроенергетичного вивчення було застосовано інструментарій програмної платформи Google Earth [1]. Цей ресурс дає змогу з високою точністю будувати

вертикальні перерізи рельєфу на основі супутникових даних у поєднанні з цифровими моделями висот. На рисунку 3.3 представлено фрагмент геопросторового аналізу річки Черемош, виконаного шляхом побудови траси русла з подальшим відображенням її поздовжнього профілю.

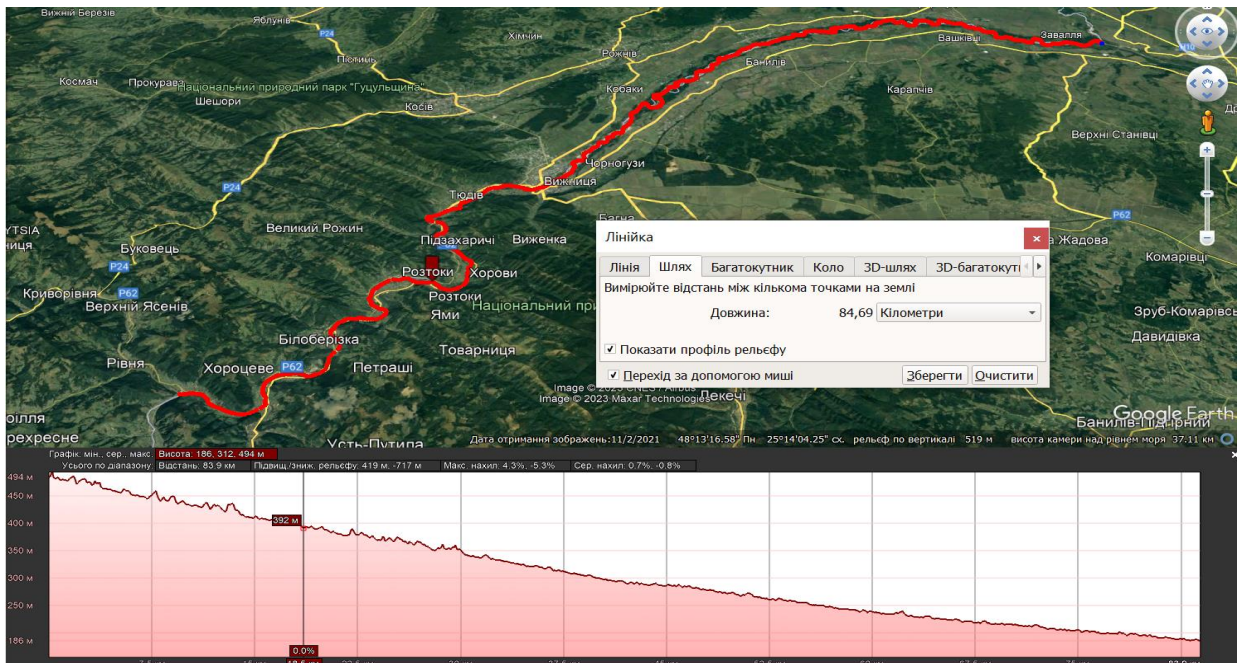


Рисунок 3.3 – Вертикальний профіль річки та його параметри

Обрана ділянка річки охоплює протяжність понад 84 км і демонструє характерне зниження абсолютних висот від витoku в Карпатському регіоні до нижніх течій. Результати побудови профілю рельєфу чітко відображають зниження висот уздовж потоку, на основі чого можна попередньо оцінити потенціал гідравлічного напору для потреб малої ГЕС. На графіку спостерігається поступове зменшення відміток рельєфу — від приблизно 950 м над рівнем моря у верхів'ї до близько 300 м у нижній частині, що дає змогу припускати наявність значного гідравлічного потенціалу на окремих відтинках потоку.

Подібні аналітичні візуалізації є надзвичайно важливими на ранніх етапах енергетичного планування, оскільки дозволяють ідентифікувати ділянки з найбільш сприятливими умовами для будівництва малої ГЕС. Інструмент вимірювання Google Earth дозволяє з високою точністю визначати просторові відстані та будувати поздовжні профілі місцевості, що значно спрощує попередню оцінку гідрогеографічних умов. Цей підхід, за наявності відповідних гідрологічних даних, може бути інтегрований у подальші моделі оцінювання гідроенергетичного

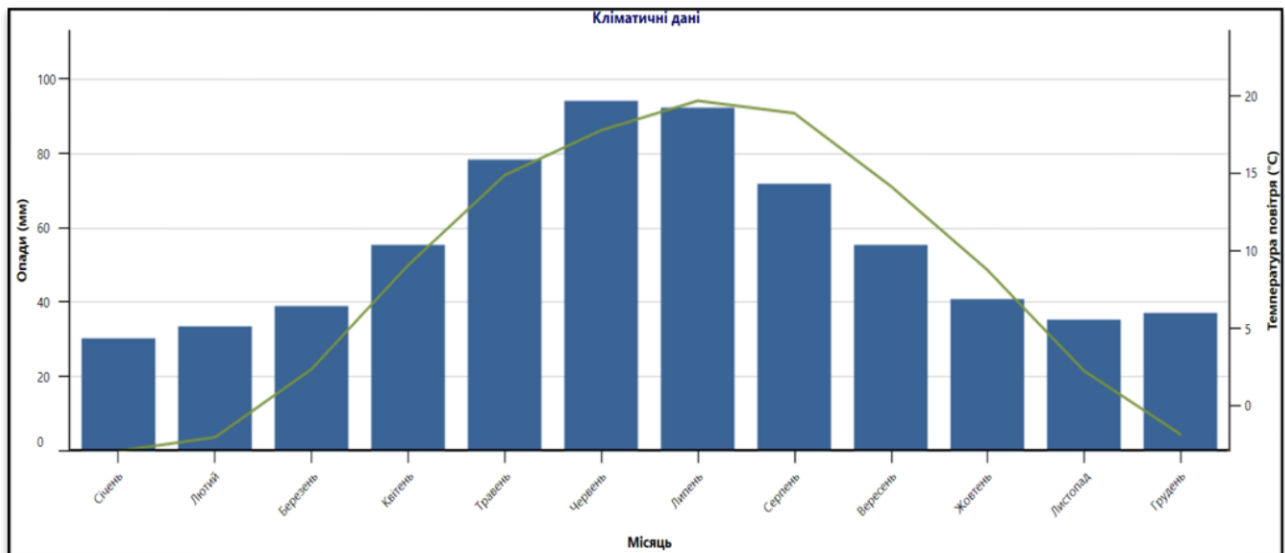
потенціалу, наприклад, у середовищі RETScreen Expert, яке передбачає урахування кліматичних і топографічних характеристик місцевості [39].

Результати кліматичного аналізу, представлені у вікні RETScreen, дають змогу кількісно оцінити основні показники, що визначають доцільність і технічну здійсненність проєкту. Зокрема, було зафіксовано середньорічне значення температури повітря, рівень опадів, кількість сонячних годин, а також середню швидкість вітру. Ці дані є критично важливими для коректного енергетичного моделювання, оскільки впливають на характер сезонних коливань витрати води, ступінь випаровування з поверхні водного дзеркала та потенціал для поєднання гідроенергетики з іншими відновлюваними джерелами енергії, зокрема сонячною. Особливо важливою виявилася інформація щодо добового і місячного розподілу опадів, оскільки вона дозволяє прогнозувати паводкові ризики та визначати оптимальний режим роботи майбутньої малої ГЕС у різні пори року [40].

Зазначені кліматичні параметри, отримані з бази NASA-SSE, яка інтегрована у RETScreen, корелюють із даними, наданими регіональними метеостанціями, що забезпечує належний рівень достовірності при техніко-економічному обґрунтуванні проєкту. Інтерфейс RETScreen дозволяє не лише завантажити автоматично сформований набір кліматичних характеристик, а й експортувати його у вигляді графічних залежностей, зокрема гістограм, що візуалізують середні температури, кількість опадів та інші метеопказники для кожного місяця року. У цьому дослідженні кліматичні характеристики локації, відображені на рисунку 3.4 (а, б), стали вихідною точкою для подальших розрахунків енергетичного потенціалу потоку та вибору конструктивних параметрів майбутньої установки [41].

Місяць	Температура повітря	Відносна вологість	Денна сума сонячної радіації - на горизонтальній поверхні		Атмосферний тиск	Швидкість вітру	Температура землі	Градусо-дні опалювального сезону 18 °С	Градусо-дні з від'ємною температурою 10 °С
	°С		мм	кВтгод/м ² /день					
	°С	%	мм	кВтгод/м ² /день	кПа	м/с	°С	°С-д	°С-д
Січень	-2,9	80,8%	30,38	1,19	97,0	3,6	-5,5	648	0
Лютий	-2,0	78,2%	33,60	1,93	96,8	3,9	-3,9	560	0
Березень	2,4	74,0%	39,06	2,84	96,8	3,9	1,3	484	0
Квітень	9,1	68,9%	55,50	3,68	96,6	3,9	8,2	267	0
Травень	14,9	68,6%	78,43	4,54	96,7	3,6	14,3	96	152
Червень	17,8	70,4%	94,20	4,75	96,7	3,5	17,9	6	234
Липень	19,7	70,9%	92,38	4,76	96,7	3,2	20,2	0	301
Серпень	18,9	72,7%	71,92	4,40	96,8	2,9	19,6	0	276
Вересень	14,2	75,0%	55,50	3,06	96,9	3,1	14,0	114	126
Жовтень	8,8	78,1%	40,92	2,00	97,1	3,2	8,0	285	0
Листопад	2,3	83,6%	35,40	1,20	97,0	3,6	1,4	471	0
Грудень	-1,8	83,2%	37,20	0,94	97,0	3,4	-3,9	614	0
Щорічний	8,5	75,4%	664,49	2,95	96,8	3,5	7,7	3 545	1 089
Джерело	Грунтовий	Грунтовий	NASA	NASA	NASA	Грунтовий	NASA	Грунтовий	Грунтовий

а)



б)

Рисунок 3.4 (а, б) – Кліматичні характеристики місцевості

На основі аналізу кліматичних показників, характерних для типової гідрологічної ситуації в регіоні, встановлено, що середньорічне значення температури повітря в обраній зоні становить близько 8,5 °С. Такий температурний режим є типовим для передгірських районів із помірно-континентальним кліматом і чітко вираженими сезонними коливаннями. Найвищі середньомісячні температури фіксуються у літній період, з піковим значенням у липні (до 19,7 °С), тоді як найнижчі — у січні, коли середній показник опускається до -2,9 °С. Ці дані свідчать про відносно м'який зимовий період без надмірних температурних екстремумів, що є сприятливим чинником для цілорічного функціонування гідротехнічних споруд без необхідності сезонної консервації.

Сума опадів протягом року в середньому становить 664,49 мм, причому найбільші значення припадають на літні місяці, зокрема на червень і липень, коли зафіксовано понад 90 мм опадів на місяць. Такий режим зволоження добре корелює з типовим графіком водопілля в гірських річках, що дозволяє прогнозувати пікові витрати в ці періоди та адаптувати роботу малої ГЕС до сезонних змін. Розподіл опадів підтверджує наявність добре вираженої сезонності, що має критичне значення для оцінки паводкових ризиків і визначення надійності проєктних параметрів установки.

Сонячна радіація на горизонтальну площину в регіоні має середньорічне значення на рівні приблизно $2,95 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за добу, з максимумами в червні та липні, коли денна інсоляція перевищує $4,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Попри те, що гідроенергетичні системи не залежать безпосередньо від рівня інсоляції, цей показник є доцільним для розгляду можливостей інтеграції гібридних систем, зокрема фотогальваніки, що може підвищити енергетичну ефективність об'єкта.

Середній атмосферний тиск у районі становить приблизно 96,8 кПа, що є типовим для гірсько-передгірських регіонів на відповідній абсолютній висоті. Такий рівень тиску не створює істотних технічних викликів для роботи турбін або інших гідромеханічних вузлів. Швидкість вітру в середньому становить 3,5 м/с, із коливаннями в межах від 2,9 до 3,6 м/с, що свідчить про достатньо стабільні погодні умови без значних атмосферних збурень. Температура поверхні ґрунту підтримується в межах $7,7 \text{ }^\circ\text{C}$ упродовж року, що слід ураховувати при виборі типу фундаменту та глибини його закладення, особливо з огляду на потенційне промерзання у зимовий період [45].

Зведений аналіз температурних і опадових характеристик дозволяє зробити висновок про наявність передбачуваного кліматичного режиму, який загалом сприяє ефективному функціонуванню малої гідроелектростанції. Найбільш сприятливі умови спостерігаються в період весняного сніготанення та літніх злив, коли природна витрата води зростає, забезпечуючи високий гідроенергетичний потенціал. Врахування цих сезонних особливостей є критичним для розробки надійного та економічно виправданого режиму роботи установки.

На наступному етапі проєктування було здійснено просторове узгодження ключових конструктивних елементів майбутньої малої гідроелектростанції з

урахуванням рельєфу місцевості та гідрологічних особливостей вибраної ділянки. Визначальним чинником для вибору конфігурації системи виступив природний перепад висот, що забезпечує стабільний гідравлічний напір при збереженні руслової морфології без істотного втручання в природні процеси. З метою підвищення точності прив'язки об'єктів до місцевості було використано функціонал програмного комплексу Google Планета Земля, за допомогою якого на основі супутникових зображень було визначено координати проєктованих споруд і зафіксовано їх просторове положення [46].

Просторове планування охоплює встановлення координат водозабору, визначення траси подачі води через напірну трубу та локалізацію основних об'єктів, таких як машинний зал і система водоскиду. Під час планування особливу увагу приділено вибору місця забору води з русла, яке повинно гарантувати достатній витратний об'єм без створення критичних змін у гідрологічному балансі нижче за течією. Машинний зал запроектовано таким чином, щоб його висотна відмітка відповідала нижньому рівню дослідженої ділянки, що дає можливість максимально ефективно використати природний рельєф як джерело напору.

У місці, де передбачено встановлення МГЕС (див. рис. 3.5), долина помітно звужується, що сприяє концентрації потоку й покращенню умов для забору води. Крім того, вздовж русла на цій ділянці пролягає автомобільна дорога місцевого значення, що позитивно позначається на потенційній логістиці спорудження та обслуговування гідротехнічного комплексу.



Рисунок 3.5 – Позначення місце розташування споруди міні-ГЕС

У контексті інженерного планування зазначений фрагмент території демонструє низку переваг для облаштування малої гідроелектростанції. Серед них — чіткий і компактний гідрограф, наявність природного ухилу, сприятливе розташування щодо існуючої транспортної інфраструктури, а також технічно зручна морфологія русла.

Далі виконується пошук ділянки річки (див рис. 3.6) з достатнім природним перепадом висот, придатним для створення ефективного гідравлічного напору.

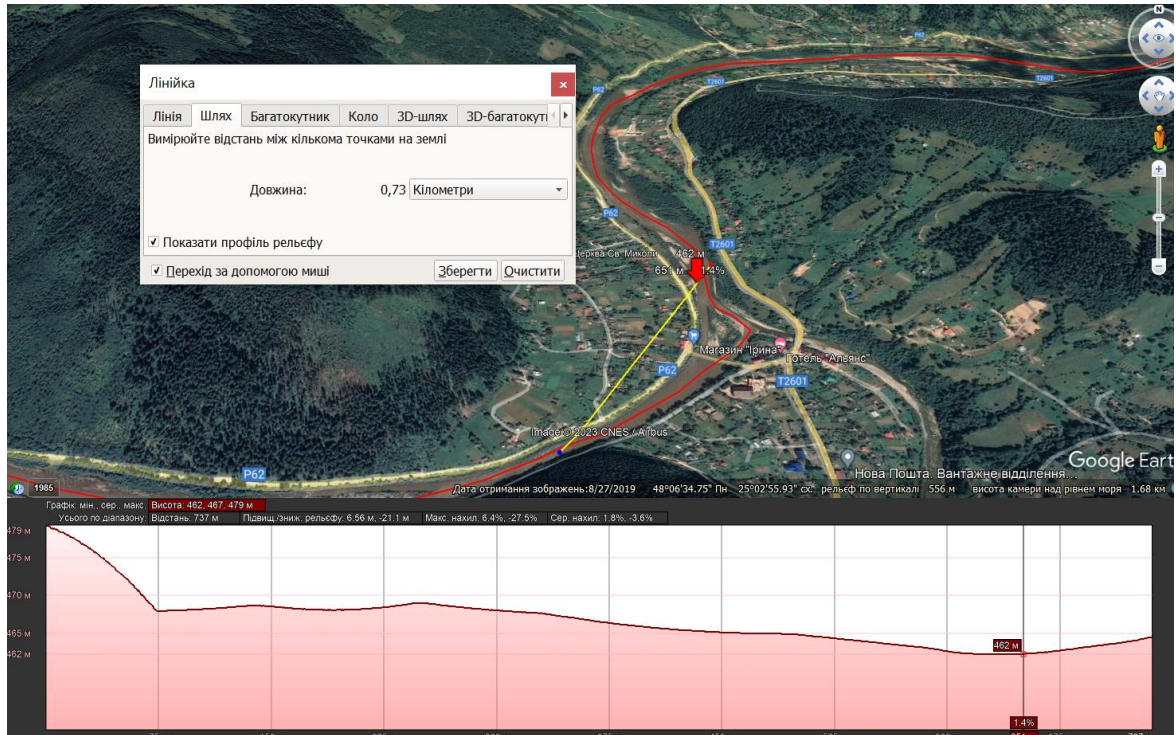


Рисунок 3.6 – Визначення напору

На відрізку між початковою та кінцевою точками обраної ділянки зафіксовано зменшення висоти з приблизно 479 метрів до орієнтовно 462 метрів. При наявному перепаді висот, який становить орієнтовно 17 метрів на обмеженій за протяжністю ділянці, доцільним технічним рішенням є будівництво саме дериваційної гідроелектростанції. Такий тип ГЕС передбачає відведення частини потоку через спеціальний напірний трубопровід або дериваційний канал до турбінного залу, розташованого нижче за течією, що дозволяє ефективно використати природний нахил рельєфу без потреби в масштабному затопленні території чи зведенні потужної греблі. В умовах, де спостерігається помірний, але стабільний ухил русла, дериваційна схема є оптимальним варіантом як з енергетичного, так і з екологічного погляду. Вона дозволяє забезпечити достатній напір для роботи турбін при мінімальній втручанні в природний гідрологічний режим річки, а також зберегти структуру русла і прибережні зони, що особливо важливо у місцевостях із підвищеною екосистемною чутливістю або близькістю до населених пунктів [47].

3.2 Підбір основного обладнання малої ГЕС

Будівля гідроелектростанції зазвичай виконується у вигляді однорівневої або дворівневої споруди з монолітного залізобетону, в межах якої розміщується як основне енергетичне обладнання – зокрема, гідротурбіни, генератори, системи регулювання та моніторингу, – так і допоміжні технічні вузли (див. рис. 3.8).

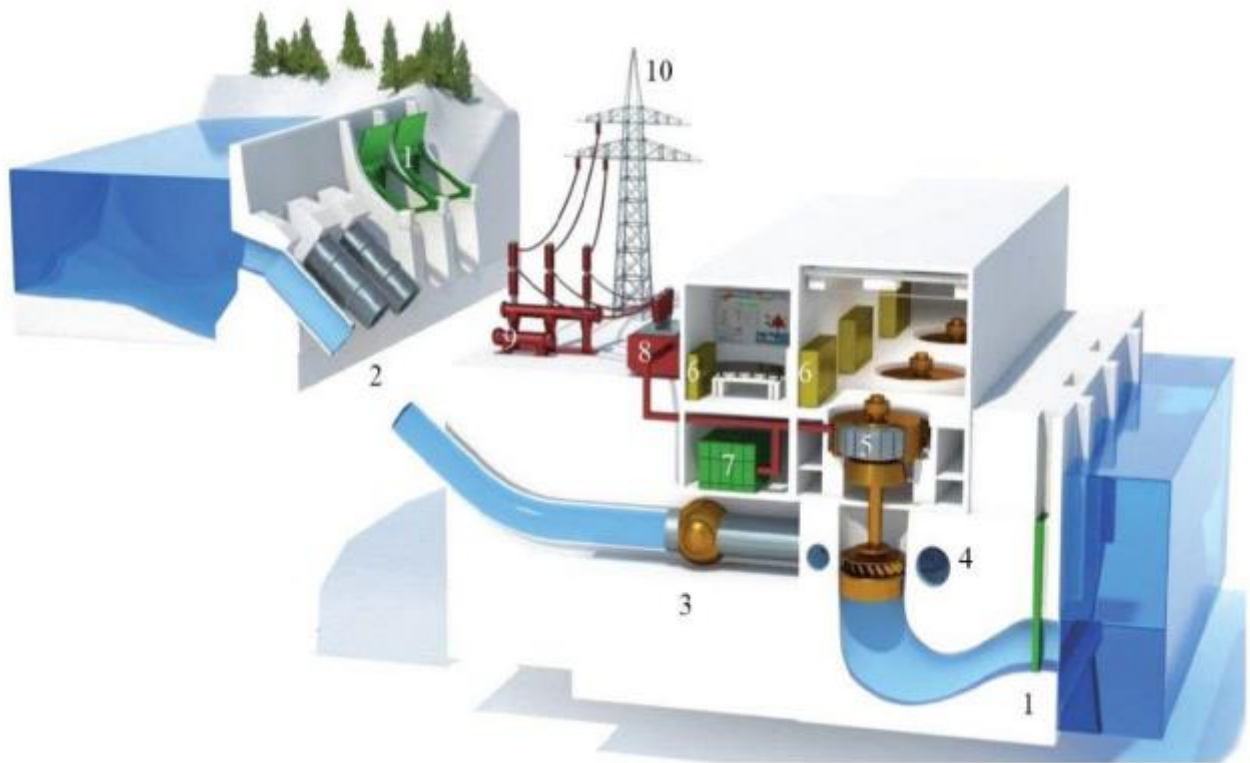


Рисунок 3.8 – Будівля типової ГЕС: 1 – випускний гідрозатвор, 2 – напірний (турбінний) водовід, 3 – відсічний клапан, 4 – гідротурбіна, 5 – електрогенератор, 6 – прилади регулювання та контролю, 7 – розподільчий пристрій низької напруги, 8 – трансформатор, 9 – розподільчий пристрій високої напруги, 10 – лінія електропередач [57]

Водночас, окремі малі або мікро-гідроелектростанції можуть успішно функціонувати без зведення повноцінної машинної будівлі, оскільки їх елементи спроектовані з урахуванням роботи в різноманітних кліматичних умовах. У таких випадках інфраструктура ГЕС зводиться у відкритому виконанні, що зменшує капітальні витрати на будівництво і спрощує обслуговування [53].

Однією з ключових інженерних складових є турбінний водовід — трубопровід, яким здійснюється подача води від водоприймального вузла або підпірної споруди до гідротехнічної станції. У малих гідроенергетичних проєктах такі водоводи, як правило, прокладаються відкритим способом уздовж рельєфу місцевості, проте за відповідних умов можуть бути влаштовані як підземні тунелі або надземні металеві конструкції. Обов'язковим інженерним елементом при цьому є передбачення технологічного доступу до магістралі для її технічного огляду, очищення й ремонту [53].

Типові техніко-конструктивні характеристики елементів, які входять до складу інфраструктури малої гідроелектростанції, систематизовано в таблиці 3.1 [56]. Водночас, практичні параметри споруд і агрегатів значною мірою варіюються в залежності від конкретних топографічних, гідрологічних та інженерних особливостей обраного майданчика будівництва, що вимагає індивідуального підходу на стадії проєктування.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики конструктивних елементів малих ГЕС [56]

Елементи	Тип ГЕС		
	Мікро (<100кВт)	Міні (100 кВт – 1,5 МВт)	Малі (1,5 МВт – 30 МВт)
Довжина греблі (м)	0-10	10-25	15-50
Водосховище (га)	0	0-10	0-50
Турбінний водовід			
Довжина (м)	0-100	10-1000	25-1000
Діаметр (м)	0,3-1,0	0,5-1,5	1,0-2,25
Будівля ГЕС (м ²)	немає-30	20-120	100-225
Довжина відвідного каналу (м)	0-10	25-100	50-300

Процес вибору технологічного обладнання для малої гідроелектростанції включає низку важливих технічних рішень, які повинні прийматись у взаємозв'язку. Зокрема, мова йде про визначення доцільної кількості гідроагрегатів, типу турбін, їх конструктивних і гідравлічних параметрів, а також характеристики генераторів, що працюватимуть у зв'язці з обраним типом турбінного обладнання. Особливої уваги потребує розрахунок положення робочого колеса, якщо передбачається використання реактивних турбін, для яких висотна позиція має суттєвий вплив на ефективність роботи агрегату. Прийняття таких рішень ґрунтується на попередньому аналізі гідрологічних умов, особливостей рельєфу місцевості, режиму експлуатації станції, а також вимог до її інтеграції в локальну або регіональну енергосистему. Оптимальна кількість гідроагрегатів визначається на підставі техніко-економічного обґрунтування, що враховує як енергетичну доцільність, так і можливості зниження експлуатаційних та капітальних витрат [54].

У процесі уточнення параметрів турбіни, зокрема її діаметра, часто виникає потреба в його округленні до значень, що відповідають наявному виробничому ряду типорозмірів. Це, своєю чергою, може призвести до певного відхилення фактичної потужності установки від попередньо розрахованої. Причиною таких відмінностей виступає як обмежена градація стандартних розмірів обладнання, так і необхідність врахування максимально можливої витрати води, яку може прийняти турбіна при обраному гідравлічному напорі. У практиці гідроенергетичного проектування подібна варіативність вважається абсолютно прийнятною, оскільки остаточна встановлена потужність електростанції визначається на завершальному етапі вибору обладнання — після узгодження параметрів турбіни та генератора з фактичними умовами майданчика і гідрографічними характеристиками водотоку [55]. Такий підхід дозволяє забезпечити як гнучкість у проєктних рішеннях, так і відповідність очікуваним технічним показникам станції.

Сучасна гідроенергетика використовує широкий спектр турбін, кожна з яких має специфічне призначення відповідно до гідрологічних умов місця встановлення. До найпоширеніших конструкцій належать турбіни типу Каплана, Френсіса, Пелтона, Турго, а також поперечнопотоківі турбіни, зокрема модифікація Банки-Мітчелла. Кожен із зазначених типів має свої переваги в залежності від робочого

напору, витрати води, а також ефективності енергетичного перетворення за конкретних умов.

Турбіна Каплана відноситься до реактивного типу з можливістю регулювання кута нахилу лопатей під час роботи, що забезпечує адаптацію до змін водного потоку. Така конструкція дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи навіть при незначних напорах, що робить її ефективною для низьконапірних водотоків. Крім того, додаткове керування здійснюється за допомогою направляючого апарату, що дозволяє точно контролювати потужність в залежності від витрати [54].

Інший поширений варіант — радіально-осьова турбіна Френсіса — також належить до реактивного типу. Вона характеризується зміною напрямку руху води в робочому колесі: від початкового радіального до осьового. Завдяки цьому досягається високий коефіцієнт корисної дії, однак ефективне функціонування такої турбіни вимагає значного напору та відповідної витрати води. У практиці великої гідроенергетики саме турбіни цього типу найчастіше забезпечують базове навантаження [54].

Ковшові гідротурбіни, зокрема Пелтона, мають іншу природу дії — вони активні й перетворюють кінетичну енергію струменя на механічну роботу завдяки ударному впливу води на ковші. Модифікація Турго вирізняється тим, що потік води потрапляє лише на один бік ротора і покидає робочий простір з протилежного боку. Така схема зменшує гідравлічні втрати, водночас залишаючи високі показники ефективності. Турбіни Пелтона та Турго зазвичай використовуються у високонапірних умовах, де є достатня висота падіння потоку [6].

Поперечнопотокова конструкція, представлена в турбінах Банки-Мітчелла, має особливість подвійного проходження водного потоку через лопатеву систему — спочатку в напрямку до осі, а потім від неї. Такий принцип дає змогу частково компенсувати втрати енергії, притаманні низьконапірним системам. Ці турбіни ідеально підходять для застосування на малих ГЕС із обмеженим гідравлічним потенціалом та незначними витратами води [6].

З метою правильного вибору типу гідротурбіни, особливо в умовах варіативного гідрорежиму, доцільно скористатись узагальненими діаграмами, що демонструють зони застосування різних типів турбін у координатах "напір —

витрата". Така візуалізація допомагає попередньо оцінити ефективність кожного з варіантів у конкретному гідрографічному контексті (рис. 3.9) [5].

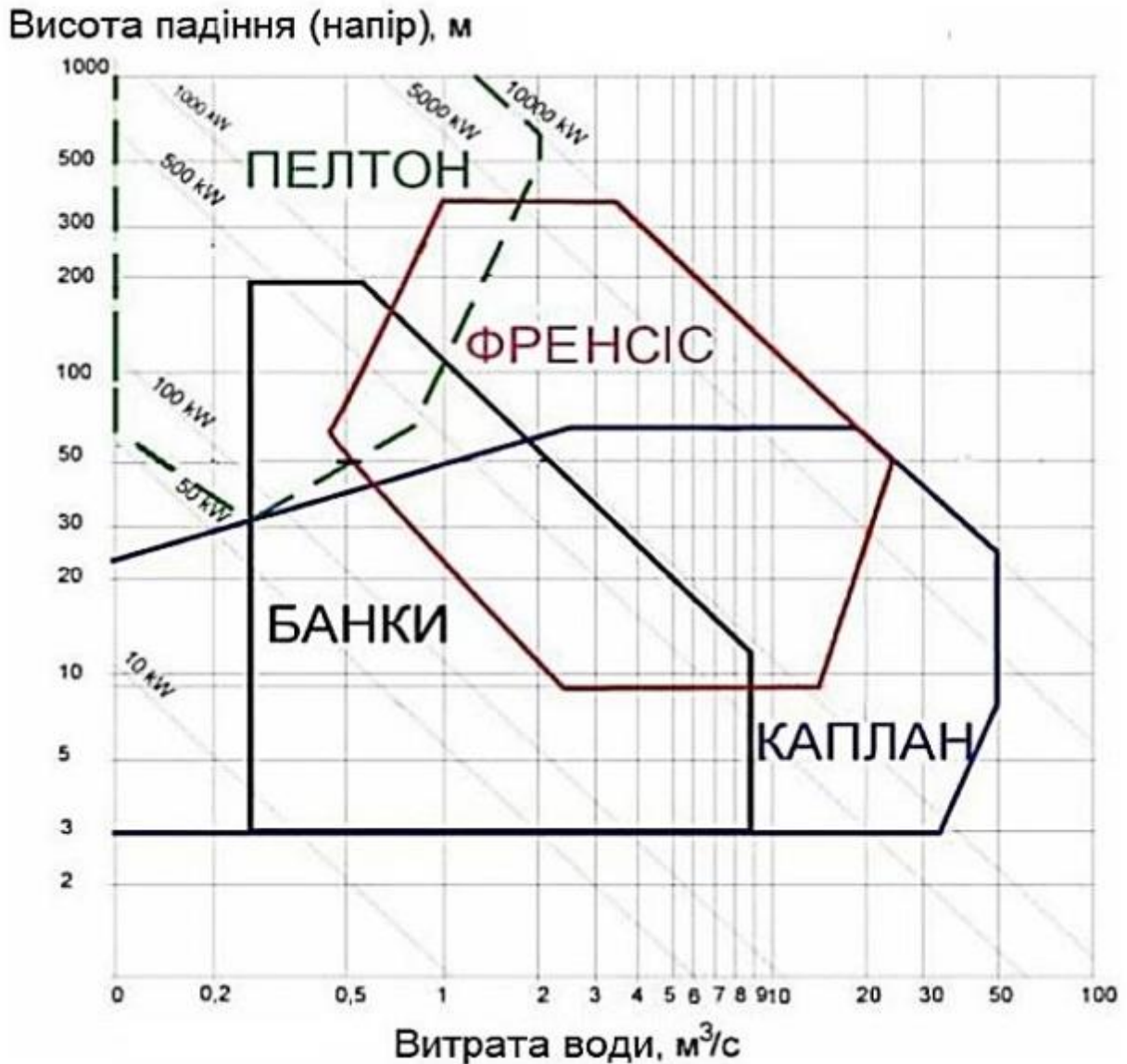


Рисунок 3.9 – Графік застосування гідротурбіни [60]

З урахуванням гідрологічних характеристик річки Черемош, де середня багаторічна витрата води складає $Q = 26,6 \text{ м}^3/\text{с}$ [63], а ефективний робочий напір оцінюється на рівні $H = 17 \text{ м}$, оптимальним технічним рішенням для гідроагрегату є застосування осьової поворотно-лопатевої турбіни типу Каплана. Такий тип турбіни демонструє найвищу ефективність при великих витратах і порівняно малому напорі, що підтверджується як типовими характеристиками агрегатів, так і емпіричними діаграмами вибору [54].

Для визначення параметрів турбіни, що відповідає конкретним умовам водотоку, насамперед необхідно обчислити потужність потоку води, що надходить

до турбінного вузла. Це значення характеризує доступний гідроенергетичний потенціал і визначається з урахуванням середньорічної витрати, висоти напору та ефективності енергетичного перетворення. Потужність потоку P_p у кіловатах може бути розрахована за формулою 2.26 [28]:

$$P_p = 9,81 * 26,6 * 17 * 0,6 = 2662 \text{ кВт}$$

де η – коефіцієнт корисної дії, який для мінігідроелектростанцій орієнтовно приймається на рівні 0,6, що узагальнює вплив неоднорідності гідрологічних і конструктивних характеристик [58].

3.3 Оцінка гідропотенціалу малої ГЕС

У межах підрозділу 3.1.3 було застосовано функціонал програмного забезпечення RETScreen Expert, яке дає змогу визначити широкий спектр показників, що характеризують як технічні, так і економічні параметри роботи проєктованої гідроелектростанції. Хоча програмне забезпечення дозволяє проводити моделювання понад двох десятків показників, зокрема рівня скорочення викидів парникових газів, терміну окупності, грошового потоку, інтегрованих витрат на експлуатацію та обслуговування, у даному розділі особливий акцент зроблено саме на визначенні електричної потужності установки.

На початковій стадії роботи з програмним забезпеченням здійснюється базова конфігурація проєкту, яка охоплює вибір географічного розташування об'єкта, мови інтерфейсу, національної валюти та відповідної системи одиниць вимірювання. Таке налаштування є необхідною умовою для узгодження подальших розрахунків із вимогами локальних нормативно-технічних документів і для забезпечення зручності користування інструментом у межах національного контексту. Після завершення етапу початкового налаштування користувач послідовно заповнює вихідні поля проєктної форми, що дозволяє програмному модулю RETScreen систематизовано опрацювати введені дані та створити основу для проведення техніко-економічного аналізу об'єкта (див. рис. 3.10).

Інформація про об'єкт	
Тип об'єкту	Електростанція
Тип	Гідротурбіна
Опис	1 000 кВт
Підготовано для	ІФНТУНГ
Підготовано	Луканюк Тетяна Василівна
Назва об'єкта	Прототип
Адреса	Адреса
Місто/Муніципалітет	Шпетки
Провінція/штат	Білоберізька громада
Країна	Україна




Фото | Зображення - Pix4Pix/Shutterstock

Рисунок 3.10 – Інформація про об'єкт

Для отримання помісячних даних витрати води було попередньо локалізовано відповідну ділянку русла річки Черемош, яка відповідає критеріям стабільного руслового режиму та доступності для натурних гідрометричних спостережень. У межах цієї ділянки було проведено серію польових вимірювань, зокрема визначено фактичну глибину водотоку, швидкість течії на різних горизонтальних і вертикальних рівнях, а також площу поперечного перерізу потоку.

Для визначення фактичної глибини водотоку використовувались стандартні глибиноміри, які забезпечують достатню точність при замірах у відкритих руслах з рівномірною течією. Вимірювання здійснювались через рівномірні інтервали по ширині річки з фіксацією даних на кожній вертикалі. Швидкість течії води визначалася крильчатим млинком, що є одним з найпоширеніших засобів для визначення лінійної швидкості потоку в руслах малих і середніх річок. Площа поперечного перерізу потоку визначалась геометричним способом на основі отриманих глибин на кожному замірному відрізку, з подальшим розбиттям профілю на трапезоїдальні сегменти. Розрахунок фактичної витрати води здійснювався шляхом множення середньої швидкості в межах кожного сегмента на відповідну площу живого перерізу, після чого всі локальні витрати сумувались для отримання загальної витрати потоку на ділянці [28]. Отримані значення були використані для розрахунку добової та середньомісячної витрати води відповідно до стандартних гідрометричних методик та введені у RETScreen Expert (рис. 3.11).

%	Потік м ³ /с	ККД турбіни	Кількість турбін	Сумісний ККД
0%	100,00	0,00	0	0,00
5%	80,00	0,00	1	0,00
10%	60,00	0,00	1	0,00
15%	65,00	0,08	1	0,08
20%	60,00	0,42	1	0,42
25%	55,00	0,64	1	0,64
30%	50,00	0,77	1	0,77
35%	45,00	0,85	1	0,85
40%	40,00	0,89	1	0,89
45%	35,00	0,91	1	0,91
50%	30,00	0,92	1	0,92
55%	25,00	0,92	1	0,92
60%	20,00	0,92	1	0,92
65%	18,00	0,92	1	0,92
70%	16,00	0,92	1	0,92
75%	14,00	0,92	1	0,92
80%	12,00	0,92	1	0,92
85%	10,00	0,92	1	0,92
90%	8,00	0,92	1	0,92
95%	6,00	0,92	1	0,92
100%	4,00	0,92	1	0,92

Рисунок 3.11 – Значення витрати води у відсотках

Після внесення гідрологічних даних у RETScreen Expert (див. рис. 3.12) обрано тип турбіни відповідно до попередніх розрахунків – Каплана, яка є оптимальною для умов низького напору та великої витрати. Розрахунковий потік прийнято рівним середній багаторічній витраті – 26,6 м³/с. ККД турбіни залишено стандартним, одна турбіна, розрахунковий коефіцієнт – 4,5, коригування ККД не застосовувалося (0%) [39].

Оцінка ресурсів			
Запропонований проект		Руслова	
Гідрологічний метод		Заданий користувачем	
Загальний напор	м	17	
Максимальний рівень води в нижньому б'єфі	м	2	
Залишкова витрата	м ³ /с	0,08	
% часу, коли є стійкий стік	%	90%	
Стійкий потік	м ³ /с		
Гідротурбіна			
Розрахунковий потік	м ³ /с	26,6	
Тип		Каплан	
ККД турбіни		Стандартний	
Кількість турбін		1	
Виробник		Hydro innovation	
Модель		Каплан	
Розрахунковий коефіцієнт		4,5	
Корегування ККД	%	0%	
Максимальний ККД турбіни	%	92,6%	
Потік при максимальному ККД	м ³ /с	20	
ККД турбіни при розрахованому стоці	%	92,1%	

Рисунок 3.12 – Розрахунок стійкого стоку, максимального ККД турбіни, потоку при максимальному ККД та ККД турбіни при розрахованому стоці

Після того як до програмного забезпечення вносяться всі необхідні гідрологічні дані, включаючи показники витрати води та технічні параметри турбіни, система у автоматизованому режимі генерує графік тривалості стоку в поєднанні з відповідною потужністю (рис. 3.13). Цей графік відображає зміну водного потоку та продуктивності установки залежно від рівня водозабезпечення протягом року. Окрім того, формується графічне представлення взаємозв'язку між коефіцієнтом корисної дії гідротурбіни і відсотковим значенням витрати води стосовно її номінального значення (рис. 3.14), що дає змогу простежити, як змінюється ефективність роботи турбіни за різних умов подачі води.

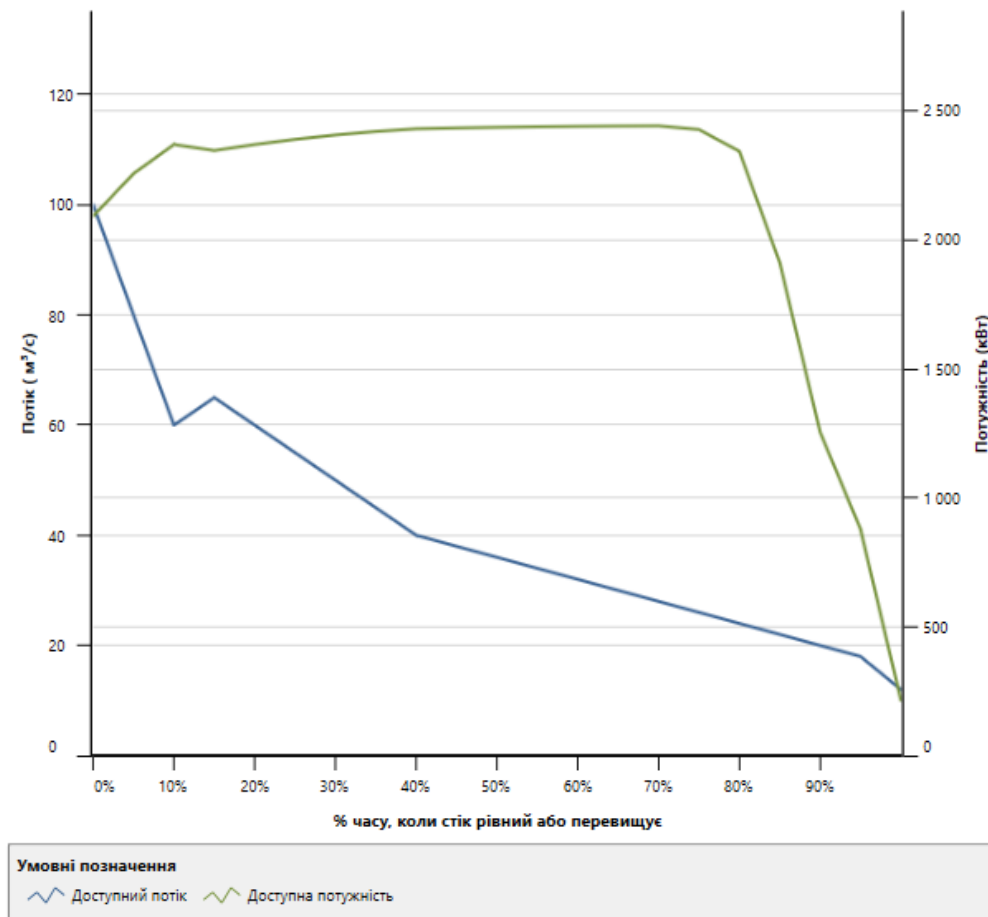


Рисунок 3.13 – Крива забезпечення стоку

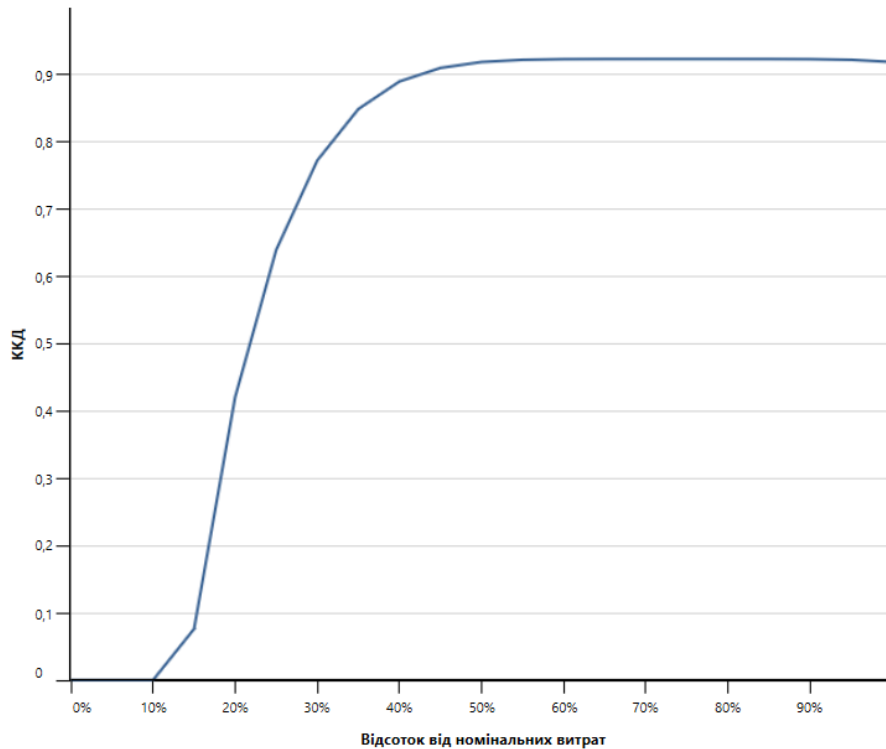


Рисунок 3.14 – Графічна залежність ККД турбіни

Аналіз цих двох графіків наочно демонструє, що стабільне та ефективне функціонування гідротурбіни досягається лише в межах чітко визначеного діапазону витрат води. Перший графік, що відображає криву тривалості стоку разом із відповідною потужністю, показує, що генерація енергії на високому рівні можлива лише протягом обмеженого проміжку часу, коли витрата води перебуває в межах орієнтовно від 30 до 100 л/с. Саме в цей період гідрологічні умови є оптимальними для досягнення максимальної продуктивності гідроенергетичної установки, а доступний ресурс використовується найповніше.

Другий графік ілюструє залежність коефіцієнта корисної дії гідротурбіни від частки фактичної витрати води стосовно її номінального значення. З аналізу видно, що ефективність турбіни зростає лише після перевищення певного порогу — близько 30% від номінальної витрати. До досягнення цієї межі коефіцієнт корисної дії залишається низьким або навіть нульовим, що свідчить про втрати енергії в системі або неможливість стабільної генерації електроенергії при малих витратах.

Після введення у програмне середовище RETScreen відповідних розрахункових параметрів (див. рис. 3.15), таких як гідравлічні втрати, які зазвичай становлять від 5 до 7% залежно від довжини та гідравлічного опору дериваційних каналів або трубопроводів, а також інших технічних втрат, включно з

трансформаторними та паразитними, що приймаються в межах 3%, система переходить до етапу моделювання енергетичної продуктивності гідроустановки. Коефіцієнт корисної дії генератора, як правило, встановлюється 93% відповідно до конструктивних особливостей і технічного рівня електромеханічного обладнання. До того ж враховується можливість використання водного стоку 92%, яка відображає частку часу, протягом якого забезпечується необхідний рівень витрати води для генерації. Окремо вводиться поправочний коефіцієнт потоку, що коригує значення витрати по всій кривій тривалості стоку, з метою врахування можливих локальних особливостей гідрографа або потенційних похибок у гідрометричних вимірюваннях; у більшості випадків рекомендовано залишати його рівним 1,0.

Втрати			
Максимальні гідравлічні втрати	%		7%
Інші втрати	%		3%
ККД генератора	%		93%
Можливість використання	%		92%
Резюме			Стійкий
Електрична потужність	кВт	2 444	1 255
Поправочний коефіцієнт доступного потоку		1	
Коефіцієнт потужності	%	82,1%	
Початкові затрати	UAH/кВт		\$
	UAH		
Затрати на експлуатацію й обслуговування (економія)	UAH/кВт-рік		\$
	UAH		
Ціна на експортовану електроенергію	Ціна на експортовану електроенергію		
	UAH/кВт-год	4,32	
Електроенергія, що передається в мережу	кВт-год	17 581 576	
Прибуток від експорту електроенергії	UAH	75 952 407	

Рисунок 3.15 – Енергетична потужність враховуючи втрати

На основі введених гідрологічних і технічних параметрів програмне середовище RETScreen Expert автоматично здійснює комплексне моделювання прогнозованої річної електричної потужності, яку може виробити проєктована мала гідроелектростанція. У процесі розрахунку враховуються втрати напору, ефективність роботи турбіни, сезонні коливання витрати води, а також інші фактори, що впливають на фактичну продуктивність. Отримане значення потужності становить 2,44 МВт, що є дещо меншим порівняно з результатом теоретичного розрахунку за формулою, який склав 2,66 МВт.

Виявлена різниця пояснюється тим, що класична формула гідроенергетичної потужності є узагальненою та не враховує гідравлічні втрати, змінну ефективність

агрегатів упродовж року та нерівномірність розподілу витрати. Крім того, у теоретичному обчисленні використовується середнє значення витрати води, тоді як у RETScreen застосовано покроковий помісячний аналіз за реальним гідрографом. Саме тому модель програми забезпечує вищу точність і достовірність результатів, особливо при використанні натурних даних. Таким чином, поєднання ручного вимірювання, аналізу втрат і програмного моделювання дозволяє одержати обґрунтовану оцінку енергетичного потенціалу майбутньої гідроелектростанції [39].

ВИСНОВКИ

Під час виконання бакалаврської роботи мною було розглянуто особливості гідроенергетичного потенціалу малих річок України та проаналізовано ключові чинники, що впливають на доцільність використання таких водотоків для потреб малої енергогенерації. Було зосереджено увагу на властивостях потоку, втратах тиску та географічній локалізації, що мають безпосереднє значення для подальшого проектування ГЕС невеликої потужності. Окремий акцент зроблено на специфіці гірських річок Карпатського регіону, як одного з найбільш придатних до впровадження подібних енергоустановок.

Другий розділ охоплює аналіз гідрометричних і об'ємних методів, а також сучасних інструментів вимірювання витрати, напору і параметрів течії. Було встановлено, що безпосереднє вимірювання гідрологічних характеристик на місцевості — особливо з урахуванням втрат — дозволяє суттєво зменшити похибки у розрахунках. Це підтверджено числовими розрахунками, в яких точність ручного вимірювання дала змогу отримати реалістичнішу оцінку гідропотенціалу, ніж розрахунки, проведені на основі усереднених даних.

У завершальній частині дослідження визначено оптимальне місце для будівництва малої гідроелектростанції на річці Черемош. Для цього було використано комбінований підхід: геопросторовий аналіз, програмні модулі типу RETScreen та врахування фізико-географічних умов обраної ділянки.

Завдяки поєднанню прикладних розрахунків, аналізу сучасного обладнання та інструментального підходу до оцінки водного ресурсу, вдалося реалізувати поставлені цілі.

Отож, результати засвідчили, що впровадження сучасних методів вимірювання у сферу малої гідроенергетики не лише підвищує точність технічних розрахунків, а й сприяє зменшенню ризиків при реалізації таких проєктів. Тематика роботи повністю реалізована, а всі етапи дослідження — логічно завершено.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Держводагентство України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.davr.gov.ua>.
2. Інститут відновлюваної гідроенергетики НАН України. Щорічний звіт про діяльність / НАН України. Київ, 2021.
3. Moroz A., et al. Hydropower Potential of Small Rivers of Ukraine. *Renewable Energy Journal*. 2017. Vol. 9. P. 42–50.
4. International Energy Agency. Hydropower Report 2020. Paris: IEA, 2020. 102 p.
5. Obodovskyi O. Hydropower Potential Assessment of Ukrainian Carpathians. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2021. 128 p.
6. European Small Hydropower Association (ESHA). Hydropower Technology Handbook. Brussels: ESHA, 2020. 96 p.
7. WWF Ukraine. Small Hydropower: Ecological Aspects and Challenges. Kyiv, 2019. 45 p.
8. Міністерство енергетики України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mev.gov.ua>.
9. Hydropower Europe Forum. Final Report. Brussels, 2019. 112 p.
10. Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України. Київ, 2023.
11. European Small Hydropower Association (ESHA). Guidelines for Sustainable Small Hydropower Development. Brussels: ESHA, 2020. 82 p.
12. Гідрологічний довідник річок України. Київ: Державна служба України з надзвичайних ситуацій, 2018. 456 с.
13. Білодід І. М. Технічні аспекти проектування малих гідроелектростанцій. Київ: Техніка, 2022. 240 с.
14. Кудря, С. О. Відновлювальна енергетика в Україні: сучасний стан та перспективи розвитку. Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАН України, 2020.
15. International Hydropower Association. Hydropower status report 2023. London: ІНА, 2023. 64 p.

16. SonTek. Acoustic Doppler current profilers (ADCP): measurement technology overview. San Diego: SonTek/YSI, 2021. 28 p.
17. WWF Ukraine. Environmental impact of small hydropower in Ukraine. Kyiv: WWF Ukraine, 2020. 47 p.
18. International Energy Agency. Hydropower Special Market Report. Paris: IEA, 2021. 76 p.
19. World Meteorological Organization (WMO). Guide to Hydrological Practices (WMO-No. 168). – Geneva: WMO, 2008. – 800 p.
20. Держводагентство України. Методика проведення гідрометричних спостережень. – Київ: ДАВР, 2020. – 56 с.
21. ISO 748:2007. Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats. – Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
22. SonTek. FlowTracker2 Handheld ADV: User Manual. – San Diego: SonTek/YSI, 2021. – 56 p.
23. Omega-Art. ІСВП-ГР-21М1: вимірювач швидкості водного потоку в комплекті з ІСО-1. [Електронний ресурс]. URL: <https://omega-art.com.ua/isvp-gr-21ml-izmyerityel-skorosti-vodnogo-potoka-v-komplyektye-s-iso-1/>
24. Яров Я.С. Гідрометрія та гідрохімія: Конспект лекцій. – Одеса, „ТЕС”, 2010. – 191 с.;
25. ISO 6416:2017. Гідрометрія. Вимірювання витрати за допомогою ультразвукового (акустичного) методу з використанням техніки вимірювання часу проходження. – Женева: Міжнародна організація зі стандартизації, 2017. – 52 с.
26. ISO 2425:2010. Гідрометрія. Вимірювання витрати за методом трасерів. Метод часу проходження. – Женева: Міжнародна організація зі стандартизації, 2010.
27. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Інструкція з ведення гідрологічних спостережень на річках і водосховищах. – Київ: Укргідрометцентр, 2018. – 112 с.
28. Шакирзанова Ж. Р., Бурлуцька М. Є. Гідрологічні розрахунки і прогнози: конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2016. 158с.

29. Швець І. Д. Гідрологія суші. – Київ: Либідь, 2016. – 376 с.
30. Контрольно-вимірювальні прилади систем керування / Лукінюк М.В., Лукін В.Є., Шворов С.А., Гладкий А.М., Гунченко Ю.О., Ємельянов П.С.Ж.: «Видавництво “Науковий світ”» ® .2016.–649с.
31. Держводагентство України. *Методичні рекомендації щодо оцінки витрати та напору води для малих ГЕС*. Київ, 2021. – 27 с.
32. Колодєєв Є.І., Гриб О.М. *Методи гідрометеорологічних вимірювань (гідрологічні вимірювання)*. Навчальна польова практика: Навчальний посібник. – Одеса: ТЕС, 2009. – 75 с.: іл. – ISBN 978-966-8145-96-4; Додатки (за необхідності);
33. Швець О. Ю. *Гідрологія з основами гідрометрії: підручник*. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2017. – 388 с.
34. Чернівецька обласна державна адміністрація. *Паспорт громад Чернівецької області*. – Чернівці: ЧОДА, 2022. – 52 с.
35. Державне агентство водних ресурсів України. *Гідрографічна мережа України: аналітичний довідник*. – Київ: Держводагентство, 2021. – С. 94–98.
36. *Атлас річок України*. – Київ: ДНВП «Картографія», 2001. – 236 с.
37. Державне агентство водних ресурсів України. *Поверхневі води України: довідник гідрологічного моніторингу*. – Київ: Держводагентство, 2021. – С. 87–91.
38. Український гідрометеорологічний центр. *Кліматичний паспорт басейну Пруту*. – Київ: УкрГМЦ, 2020. – 48 с.
39. RETScreen International. *RETScreen Expert Software*. – Natural Resources Canada, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
40. NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE) – Data Set Version 6.0. – NASA Langley Research Center, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov>
41. Міністерство енергетики України. *Методичні рекомендації щодо оцінки відновлюваних джерел енергії за допомогою RETScreen*. – Київ: Міненерго, 2020. – 41 с.

42. Ющенко Ю. С. Загальна гідрологія: підручник. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2017. 591 с.
43. Державне агентство водних ресурсів України. Гідрологічний паспорт басейну річки Прут та її приток. – Київ: Держводагентство, 2020. – 87 с.
44. Костенюк Л.В. Гідрологія гірських областей : навч.-метод. посібник. Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Ю
45. World Meteorological Organization. Guide to Climatological Practices, 3rd ed. WMO-No. 100, Geneva, 2011. – Part II.
46. Google Earth Pro. Інструмент геопросторового моделювання для проєктів відновлюваної енергетики. – Mountain View: Google Inc., 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com/earth>
47. Міністерство енергетики України. Методичні рекомендації з проєктування малих гідроелектростанцій. – Київ: Міненерго, 2020. – 64 с.
48. Основні способи створення напору [електронний ресурс]. – режим доступу: https://studwood.net/2103579/tovarovedenie/osnovni_sposobi_stvorenniya_naporu.
49. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики / Базеєв Є.Т., Білека Б.Д., Васильєв Є.П., Варламов Г.Б. і ін.. – Київ, 2011. – 400 с.
50. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розділ 2.4. Гідроенергетика [Електронний ресурс] // Енергетика України : довідково-інформаційний портал. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-2/section-2/2-4>, вільний. – Назва з екрана.
51. Герасимов С. М. Основи гідроенергетики. – Київ: Вища школа, 2016. – 276 с.
52. Ободовський О. М. Малі гідроелектростанції: конструкції, принципи роботи, проєктування. – Львів: Новий Світ – 2000, 2020. – С. 95.
53. Самойленко Є. Г. «Основи проєктування гідроенергетичних вузлів» : підручник. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 388 с.
54. Яровий А. В., Шакірзанова Ж. Р., Швець Ю. О. Основи гідроенергетики. – К.: Національний технічний університет України "КПІ", 2020. – 288 с.

55. International Energy Agency (IEA). *Hydropower Technology Brief*. – Paris: IEA Publications, 2022. – 45 p. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://iea.org/reports/hydropower-technology-brief>
56. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Том II. / В.Вовчак, О.Тесленко, О. Самченко // Київ. 2018. 145 с.
57. Shukla A., Karmacharya B.K., Pun S., Bhattarai D. A comprehensive assessment of small hydropower potential and its sustainable development in Nepal // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – P. 1201–1218. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023001949>
58. European Small Hydropower Association. *Hydropower Technology Handbook*. – Brussels: ESHA, 2020. – 96 p.
59. Obodovskyi O. *Hydropower Potential Assessment of Ukrainian Carpathians*. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2021. – 128 p.
60. Використання енергії малих річок / А.С. Пелевін // Магістерська дисертація [електронний ресурс]. – режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24664/1/Pielievin_magistr.pdf.
61. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи з дисципліни «Гідроенергетика» / Будько В.І // К.: ФЕА «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 42 с.
62. Використання енергії малих річок / А.С. Пелевін // Магістерська дисертація [електронний ресурс]. – режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24664/1/Pielievin_magistr.pdf.
63. Проблеми управління ризиками затоплень і якістю молодого ландшафту річки Черемош на ділянці передгірної течії / Я. Ю. Цопа // Магістерська дисертація [електронний ресурс]. – режим доступу: https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/6390/%D0%A6%D0%BE%D0%BF%D0%B0_%D0%AF..pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm_source=chatgpt.com