

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему: **«ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІЛЬНОПОТОЧНОЇ  
ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ»**

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ Ю. Я. Давиденко

Виконав: студент групи Ен-61

Спеціальності 141 – «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Давиденко Юрій Ярославович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: Бабич Михайло Іванович

(Прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Рівень вищої освіти – другий «магістерський» рівень.

Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

доцент, к. т. н. С. В. Сиротюк

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Давиденку Юрію Ярославовичу \_\_\_\_\_.

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції малої потужності»

Керівник роботи: Бабич Михайло Іванович, кандидат технічних наук, доцент затверджені наказом по університету від 28 квітня 2023 року № 133/к-с.

2. Термін подання студентом роботи 30.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали літературного огляду, патентного пошуку і аналізу існуючих типів вільнопоточних гідроелектростанцій та схем автономного енергозабезпечення, довідкова та спеціальна література, аналіз останніх досягнень науки і техніки в галузі енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії.

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

Вступ

1. Аналіз стану питання в теорії та практиці

2. Обґрунтування типу вільнопоточної гідроелектростанції та варіантів її використання

3. Методика обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції

4. Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях

5. Техніко-економічне обґрунтування розробок кваліфікаційної роботи

Висновки

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Графічний матеріал представлено у вигляді презентації.

6. Консультанти з розділів:

Розділ, №_	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
4	<i>Городецький І. М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва</i>	28.04.23р.	28.04.23р.

7. Дата видачі завдання

28 квітня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу</i>	<i>28.04.23-27.05.23</i>	
2	<i>Виконання другого розділу</i>	<i>28.05.23-05.07.23</i>	
3	<i>Виконання третього розділу</i>	<i>06.07.23-15.08.23</i>	
5	<i>Написання розділу: «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»</i>	<i>16.08.23-10.09.23</i>	
6	<i>Розрахунок економічної ефективності розробок кваліфікаційної роботи</i>	<i>11.09.23-29.09.23</i>	
7	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки та ілюстративної частини</i>	<i>30.09.23-26.10.23</i>	
8	<i>Завершення кваліфікаційної роботи в цілому</i>	<i>27.10.23-30.12.23</i>	

Студент \_\_\_\_\_ Давиденко Ю. Я.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Бабич М. І.  
(підпис)

Кваліфікаційна робота: 51 ст. текстової частини, 4 табл., 24 рис., 26 найменувань бібліографічних джерел.

Обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції малої потужності. Давиденко Юрій Ярославович. Кваліфікаційна робота. Кафедра енергетики. Дубляни, Львівський НУП, 2024.

Проаналізовано стан малої гідроенергетики в Україні, встановлено, що є значний гідроенергетичний потенціал малих річок, який можна використовувати для забезпечення потреб в енергії споживачів. Обґрунтовано ефективність використання вільнопоточних гідроелектро-станцій без спорудження гідротехнічних споруд.

Обґрунтовано використання пропелерної гідротурбіни в умовах малої гірської річки Голятинка. Встановлено вибір потенційного місця розташування гідроелектростанції, та визначено основні характеристики річки: витрату води, швидкість течії і руслову потужність.

Обґрунтовано вільнопоточну гідроелектростанцію у складі дволопатевої пропелерної гідротурбіни, підвищуючої передачі і трифазного короткозамкнутого асинхронного двигуна, працюючого в режимі генератора. Обґрунтовано параметри мультиплікатора.

Обґрунтовано можливі варіанти використання гідроенергії вільнопоточних гідроелектростанцій.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях і запропоновано рекомендації щодо їх покращення.

Техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність використання вільнопоточної гідроелектростанції для енергозабезпечення споживачів, зокрема собівартість електроенергії складає 0,69 грн/кВт·год а термін окупності 5 років.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ.....	8
1.1. Аналіз стану малої гідроенергетики у світі.....	8
1.2. Аналіз стану малої гідроенергетики в Україні.....	10
1.3. Аналіз основних типів малих гідроелектростанцій.....	12
1.4. Обґрунтування теми, мети та об'єкту досліджень.....	15
2. ОБґРУНТУВАННЯ ТИПУ ВІЛЬНОПОТОЧНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ВАРІАНТІВ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ.....	17
2.1. Аналіз типів вільнопоточних гідроелектростанцій.....	17
2.2. Вибір річки та визначення її руслової потужності.....	22
2.3. Обґрунтування типу, структури вільнопоточної гідроелектростанції та способів її використання.....	26
3. МЕТОДИКА ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІЛЬНОПОТОЧНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ .....	30
3.1. Визначення потужності лопатевої гідротурбіни .....	30
3.2. Обґрунтування параметрів лопатей гідротурбіни.....	33
3.3. Обґрунтування компоновки гідроелектростанції та розрахунок мультиплікатора.....	36
3.4. Підбір генератора гідроелектростанції .....	38
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	40
4.1 Охорона праці і техніка безпеки на гідроелектростанції .....	40
4.2 Техніка безпеки під час експлуатації гідроелектростанцій .....	41
4.3 Техніка безпеки на гідроелектростанції під час ревізій і ремонтів.....	43
4.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	43

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК	
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	45
ВИСНОВКИ .....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	49

## ВСТУП

Гідроелектростанції малої потужності, як правило не подають вироблену електроенергію в загальну мережу. Їх застосовують переважно у віддалених, гірських районах, де відсутні електромережі, для забезпечення електроенергією малу сільську промисловість, громади, автономних споживачів. Їхня потужність в декілька кіловат виробленої електроенергії, достатня для електрозабезпечення індивідуальних господарств, систем вуличного освітлення тощо. Також декілька таких гідроелектростанцій можуть бути об'єднані в міні систему, що може забезпечити групу автономних споживачів, окремі заводи, санаторії тощо [24].

На сьогоднішній день в багатьох країнах, і в Україні також, виникає проблема забезпечення віддалених споживачів у сільській місцевості. Це пов'язано насамперед з тим, що розширення електричних мереж, особливо для забезпечення потреб індивідуальних споживачів, які знаходяться у важкодоступних гірських регіонах є високозатратним. А враховуючи, що саме в цих регіонах є найбільший гідропотенціал малих гірських річок, будівництво гідроелектростанцій, та об'єднання їх в автономні групи, може стати альтернативою загальним електромережам. Насамперед тому що застосування автономних мікрогідроелектростанцій дозволяє зекономити на вартості ліній електропередачі, оскільки їх споруджують на невеликій відстані до споживача – до 200 м. Крім того, такі станції не потребують застосування дуже дорогого обладнання, і окремого обслуговуючого персоналу і відповідно відсутні кошти на його утримання.

Для того щоб гідроелектростанція виробляла максимальну кількість днів у році електроенергію, необхідно підібрати таке гідроенергетичне обладнання, яке дозволяло б максимально освоїти потенціал річки з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Тому робота, в якій ставиться задача обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції є важливою.

## 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ

### 1.1 Аналіз стану малої гідроенергетики у світі

До сьогоднішнього дня, однією з найважливіших задач, як з точки зору економіки так соціального розвитку є забезпечення загального доступу до джерел електроенергії. Близько 10 % населення, а це більше 700 мільйонів людей до сьогодні не мають доступу до електроенергії. Це переважно жителі сільських, гірських районів. Це є великою проблемою, адже на сьогодні доступ до електроенергії – це насамперед доступ до охорони здоров'я людини та її освіти. Разом з цим, в умовах кліматичної кризи і деградації навколишнього середовища, у світі гостро постає питання використання чистих та стабільних джерел енергії, зокрема відновлюваної енергетики [26].

Якщо порівнювати технології виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії, то найдешевшою є саме гідроенергетика. А якщо враховувати вплив на навколишнє середовище і клімат, то надефективною в цьому плані є мала гідроенергетика. Також об'єкти малої гідроенергетики через свою адаптивність і доступність вирішують потреби енергозабезпечення віддалених споживачів у сільській місцевості.

Згідно даних ООН [24; 26], у світі станом на 2022 рік встановлена потужність малих гідроелектростанцій до 10 МВт складає 79,0 ГВт (рис. 1).

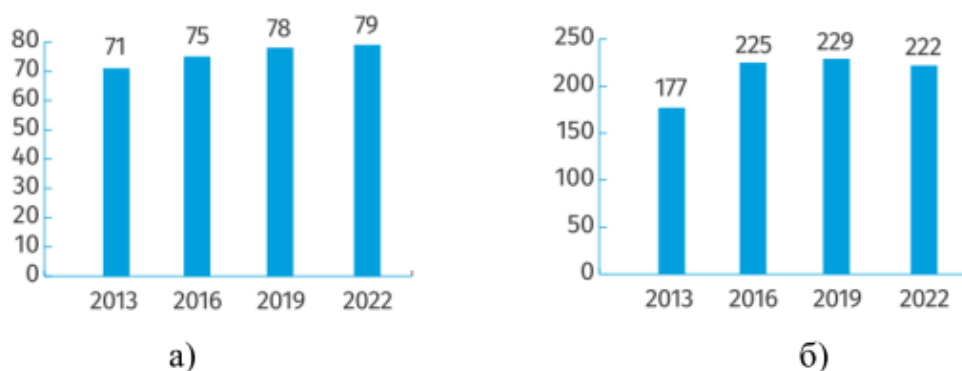


Рисунок 1 – Встановлена потужність (а) та потенціал потужності малої гідроенергетики у світі, ГВт



В той же час загальний відомий потенціал малої гідроенергетики потужністю до 10 МВт оцінюється в 221,7 ГВт (рис. 1,б). Як бачимо з рисунка, незважаючи на свою привабливість, мала гідроенергетика використовує тільки третину своєї потужності, а більша частина – 64 %, залишається невикористовуваною.

Якщо порівнювати з 2019 роком, у 2022 році встановлена потужність загалом по світу збільшилась на 1,2 %. З 2019 року встановлена потужність МГЕС зросла майже на 23% в Африці, на 11% в Америці, на 4% в Європі та на 3% в Океанії. З точки зору встановленої потужності, Європа зросла на 734 МВт, Америка – на 698 МВт, Африка – на 134 МВт [26].

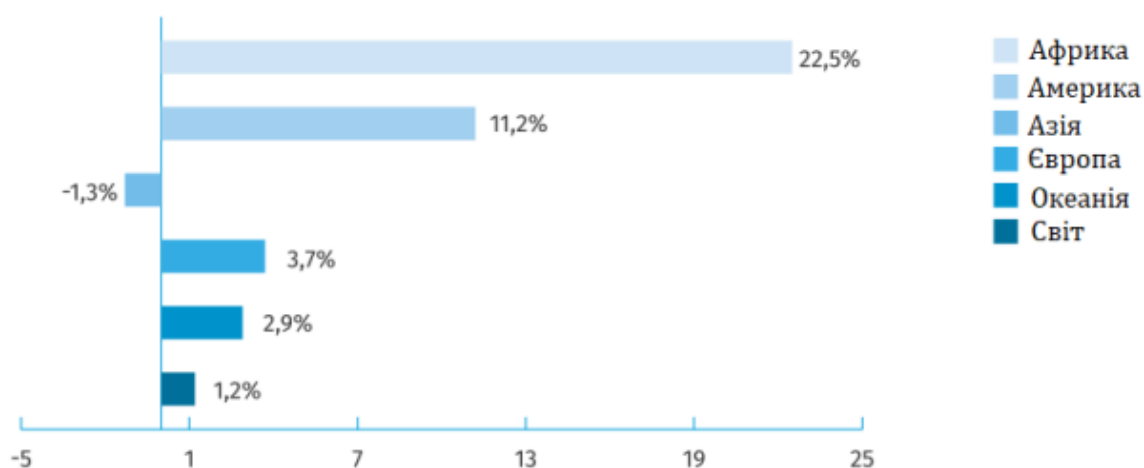


Рисунок 2 – Зміна встановленої потужності малої гідроенергетики між 2019 і 2022 роками по континентам (%)

Загалом, якщо порівнювати континенти по розробленим і потенційним можливостям малої гідроенергетики, то Азія має найбільші значення по цим показникам – відповідно 64 % і 63 % від загальних світових показників. Найбільший відсоток освоєного потенціалу малої гідроенергетики є в Європі.

Якщо дивитись конкретно по країнах, то лідером у малій гідроенергетиці залишається Китай, де розташовано 53 % світової встановленої потужності до 10 МВт і біля 30 % світового потенціалу. За показником загальної встановленої потужності після Китаю йдуть Сполучені

Штати Америки, Італія, Японія і Норвегія. Разом ці п'ять країн володіють 71 % світової встановленої потужності гідроелектростанцій до 10 МВт.

Підсумовуючи, відмітимо, що мала гідроенергетика є чистою і універсальною технологією, що дозволяє ефективно покращити доступ населення до чистої і стабільної електроенергії як в країнах, що розвиваються, так і в розвинених країнах, а особливо у сільських районах. Також освоєння потенціалу малої гідроенергетики в багатьох країнах дозволило зробити перші кроки у боротьбі з бідністю і підвищення доступу до електроенергії. А ще мала гідроенергетика сприяє досягненню цілей по зниженню випуску парникових газів у розвинених країнах.

## 1.2 Аналіз стану малої гідроенергетики в Україні

Для малої гідроенергетики України, ключовим джерелом енергії є малі річки, яких в державі нараховується 63029. До малих належать річки, площа водозабору яких до 2000 км<sup>2</sup>. Малі річки, нерівномірно розподілені по території, і основна їх частина знаходиться в Карпатському регіоні (рис.3).

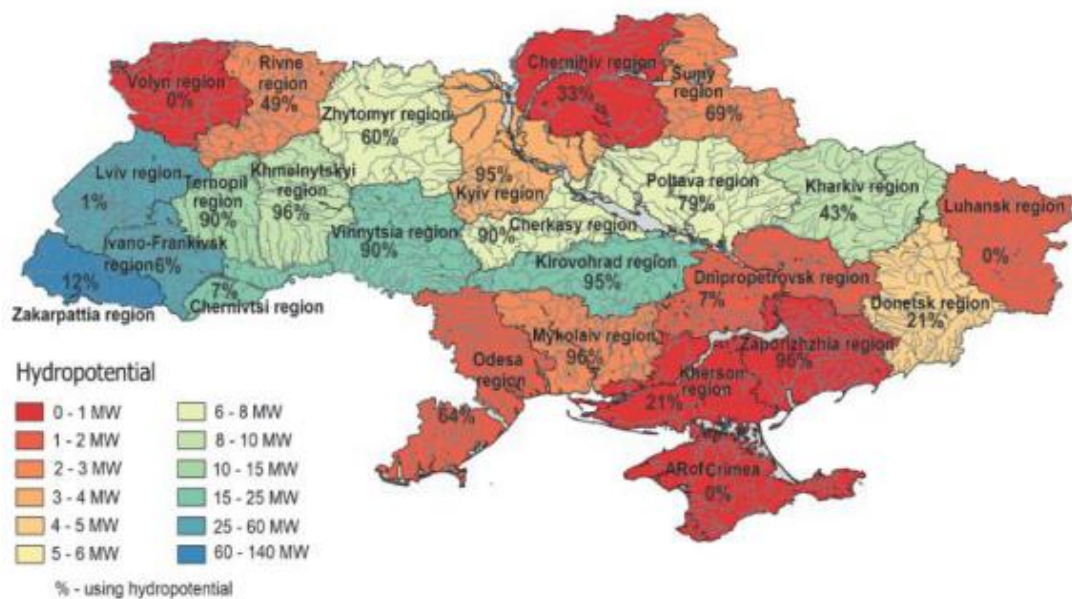


Рисунок 3 – Гідропотенціал розвитку малої гідроенергетики по регіонах України [20]

Тільки в трьох областях зосереджено більше 60 % загального гідропотенціалу, зокрема у Закарпатській – 35 %, Івано-Франківській – 16% і Львівській – 12%.

Значення гідроенергетичного потенціалу малих річок різняться, залежно від того хто проводив дослідження і яку методику використано для його визначення. Однак відомо, що гідропотенціал малих річок складає 28% від загального потенціалу усіх річок України [4]. Згідно даних ПрАТ «Укргідроенерго» технічний потенціал малих річок України складає 670 МВт.

Нажаль, тільки частина цього потенціал використовується. Наприклад, на Закарпатті, де є найбільше малих річок, освоєно лише 12 % від доступного гідропотенціалу, а У Львівській області лише 1% освоєно. Однак є області де технічний потенціал менше 6 %, і освоєний він вже на понад 90 %, зокрема це Вінницька, Черкаська і Хмельницька області (рис. 3) [10].

Мала гідроенергетика в Україні почала активно розвиватись з 1920-х років, зокрема в 1924 році працювали 84 ГЕС потужністю 4 МВт, а в 1929 – 150 ГЕС потужністю 8,4 МВт. У цей період було багато невеликих до 25 кВт гідроелектростанцій на базі водних млинів, для забезпечення власних потреб в енергії (рис. 4) [ 1; 20].

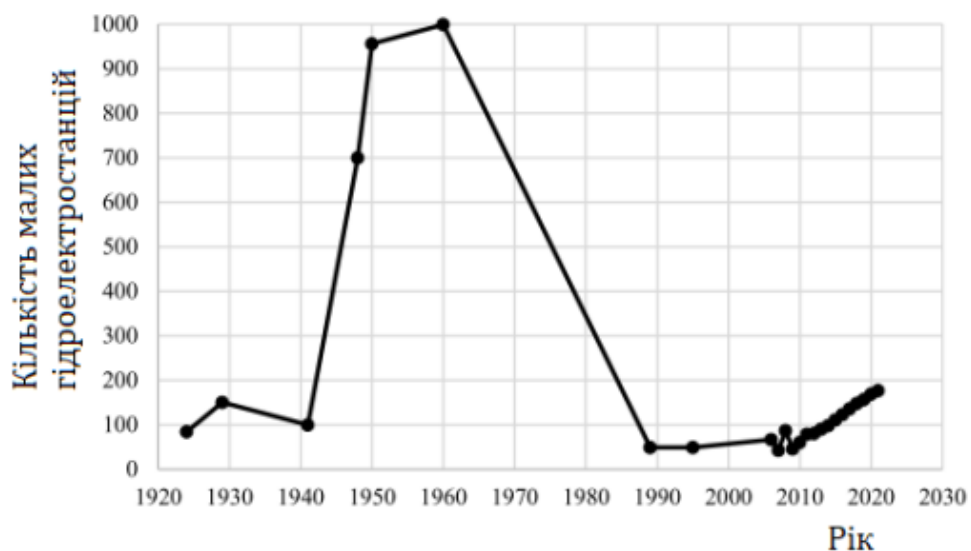


Рисунок 4 – Малі гідроелектростанції в Україні з 1924 по 2022 роки [1]

Стрімкий розвиток малої гідроенергетики тривав до 1960 року, кількість малих гідроелектростанцій в Україні досягла майже 1000 одиниць. Але все змінилось після того, як почалось велике будівництво, пов'язане з будівництвом великих ГЕС, об'єктами атомної та теплової енергетики. Тому в 70-80-х роках більшість малих гідроелектростанцій було демонтовано, залишилось 150 [2].

Тільки в дев'яностих роках прослідковується зацікавлення малою гідроенергетикою в деяких областях України, зокрема Хмельницькій, Вінницькій, Тернопільській. В основному відбувається реконструкція та модернізація гідроелектростанцій. Саме в цих регіонах нині діє біля 60 % від всіх малих гідроелектростанцій України.

Поштовхом до розвитку стало прийняття у 2008 році Закону про «зелений» тариф. Цей Закон дозволив здійснити стрімкий ривок в розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячній і вітровій енергетиці. Також було побудовано декілька гідроелектростанцій в Карпатському регіоні. Проте, незважаючи на значне зацікавлення в 2000-х роках щодо будівництва багатьох гідроелектростанцій на малих гірських річках, більшість з них залишились тільки на рівні проектів. І тому, на сьогодні діючими в Україні є 170 малих гідроелектростанцій потужністю до 10 МВт, загальною встановленою потужністю 180 МВт [3; 4].

Таким чином, значний гідроенергетичний потенціал малих річок України використовується лише частковою. А зважаючи на критичний рівень енергетичної безпеки держави, критично необхідно освоювати нові чисті джерела енергії, зокрема гідроенергію малих річок Карпатського регіону.

### **1.3 Аналіз основних типів малих гідроелектростанцій**

В Україні до малих відносять гідроелектростанції встановленою потужністю до 10 МВт. Розглянемо їх основні типи та умови використання.

*Гребельні гідроелектростанції.* У таких гідроелектростанціях концентрація напору води створюється за допомогою установки греблі, яка повністю перегороджує річку і підіймає рівень води в ній до потрібної позначки. За рахунок використання греблі утворюється водосховище. Переважно такі гідроелектростанції використовуються на рівнинних річках. Хоча напір можна створити штучно, та досягти необхідної потужності, однак даний тип негативно впливає на навколишнє середовище насамперед через затоплення територій, тому зараз їх рідко застосовують (рис. 5,а) [19].

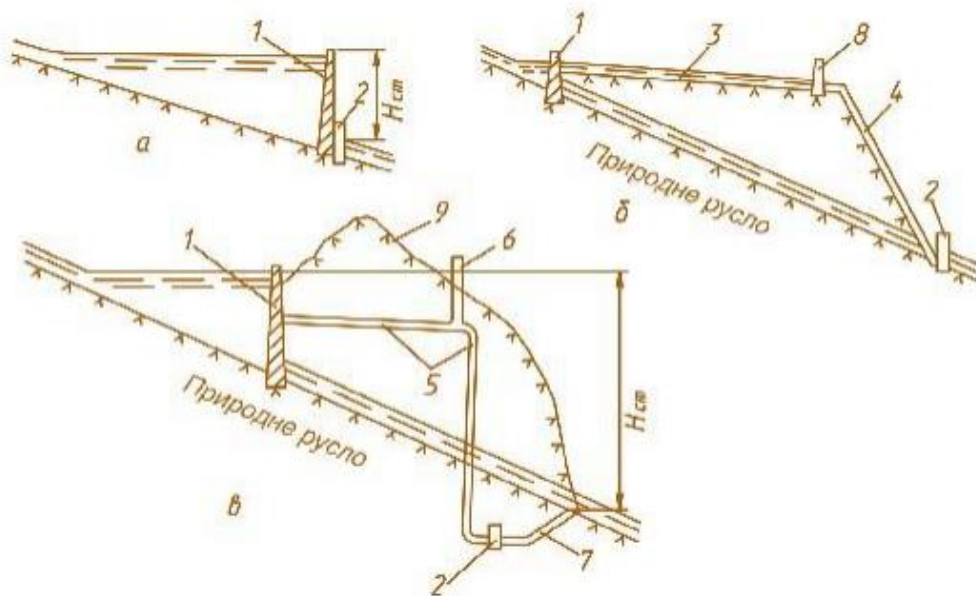


Рисунок 5 – Принципові схеми малих гідроелектростанцій: а – гребельна; б – дериваційна; в – комбінована; 1 – гребля; 2 – будинок ГЕС; 3 – дериваційний канал; 4 – напірний трубопровід; 5 – напірний тунель; 6 – зрівнювальний резервуар; 7 – відвідний тунель; 8 – водоприймач; 9 – природна поверхня берегового схилу [7]

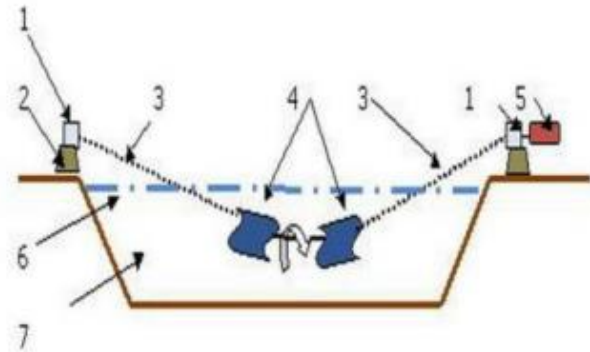
*Дериваційні.* За такої схеми частина води використовується з річки і подається дериваційним каналом на гідротурбіну (рис. 5,б). Дериваційні не так негативно впливають на навколишнє середовище як гребельні, однак їх використання дуже прив'язане до місцевості, адже необхідні значні ухили для створення напору, що актуально для гірських річок.

Також використовують комбіновані схеми, в яких напір частково створюється деривацією, а частково за допомогою греблі (рис. 5,в).

*Вільнопоточні гідроелектростанції*, які працюють за рахунок кінетичної енергії потоку річки (рис. 6).



а)



б)

Рисунок 6 – Загальний вигляд (а) та схема (б) вільнопоточної (гірляндної) гідроелектростанції: 1 – підшипник, 2 – опора, 3 – металевий трос, 4 – гідроколесо (турбіна), 5 – електрогенератор, 6 – вільна поверхня потоку, 7 – русло річки

За використання даного типу не можна отримати значні потужності через обмеженість швидкості води в річці, одна часто такої потужності вистачає для забезпечення потреб в електроенергії автономного споживача. Тим більше часто такі гідроелектростанції об'єднують в одну систему для задоволення потреб фермерських господарств, індивідуальних об'єктів тощо. Перевагою вільнопоточних гідроелектростанцій є те, ще немає потреби в будівництві будь яких гідротехнічних споруд, зокрема гребель, каналів, водозаборів. Гідроелектростанція працює безпосередньо в потоці річки, використовуючи її швидкість (кінетичну енергію).

Отже, вибір схеми і обґрунтування основних параметрів гідроелектростанції залежить від характеристик досліджуваної річки і здійснюють за результатами техніко-економічного обґрунтування допустимих варіантів.

## 1.4 Обґрунтування теми, мети та об'єкту досліджень

Україна володіє значним гідроенергетичним потенціалом малих річок, про що свідчить 63000 малих річок і струмків, які протікають територією держави. Гідроенергію річок можна використовувати по-різному, залежно від поставлених задач, схеми створення напору, розташування споживача електроенергії, екологічних вимог тощо. До обґрунтування параметрів гідроелектростанції потрібно підходити системно, порівнюючи різні варіанти з метою пошуку оптимального. Виходячи з цього, кваліфікаційна робота на тему «Обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції малої потужності» є актуальною і важливою.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції.

Для досягнення мети треба розв'язати наступні задачі:

- здійснити аналіз стану та перспектив малої гідроенергетики у світі;
- проаналізувати особливості розвитку малої гідроенергетики в Україні ;
- проаналізувати основні типи малих гідроелектростанцій;
- здійснити вибір річки та визначити її витрати води, швидкості потоку, руслову потужність;
- обґрунтувати тип і структуру вільнопоточної гідроелектростанції;
- обґрунтувати способи використання вільнопоточної гідроелектростанції;
- визначити основні характеристики пропелерної гідротурбіни;
- обґрунтувати параметри лопатей та мультиплікатора, підібрати генератор ;

- запровадити заходи з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях;

- здійснити техніко-економічне обґрунтування розробок кваліфікаційної роботи.

Об'єкт дослідження – річка, вільнопоточна гідроелектростанція, процеси виробництва електроенергії на основі використання гідроенергії.

Предмет дослідження – є залежність функціональних показників вільнопоточної гідроелектростанції від характеристик річки.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу і узагальнення сучасної науково-технічної літератури для формування вимог до систем виробництва електроенергії на річках; математичної статистики для визначення характеристик річки; кореляційно-регресійного аналізу.



## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ ВІЛЬНОПОТОЧНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ВАРІАНТІВ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

### 2.1 Аналіз типів вільнопоточних гідроелектростанцій

У першому розділі нами було розглянути основні типи малих гідроелектростанцій встановленою потужністю до 10 МВт. А у даному пункті проаналізуємо типи, можливості та умови використання гідроелектростанцій, які працюють безпосередньо у потоці річки, без спорудження додаткових гідротехнічних споруд.

Принциповою відмінністю вільнопоточної від класичної гідроелектростанції є використання нею не потенціальної енергії, яка створюється греблею чи деривацією, а кінетичною енергією водного потоку.

Аналогом такої гідроелектростанції є вітрова, яка використовує кінетичну енергію рухомого повітря. Зрозуміло що вільнопоточні гідроелектростанції не можуть мати великої встановленої потужності. На відміну від тих же вітрових, де збільшити встановлену потужність можна за рахунок збільшення розмаху лопатей робочого колеса, вільнопоточні обмежені глибиною малих річок. Однак їх можна використовувати для резервного енергозабезпечення віддалених споживачів, освітлення мостів у гірських регіонах, різноманітних технологічних процесів легкої промисловості тощо. Також на відміну від вітрових, на вільнопоточних постійно виробляється електрична енергія, адже потік води завжди рухається. Розглянемо детальніше основні типи вільнопоточних гідроелектростанцій, які можна встановити на малих річках.

Чи не найпростішим типом вільнопоточних гідроелектростанцій є водяне колесо (рис. 7). Водяне колесо використовувалось з давніх давен на невеликих річках і для забезпечення найрізноманітніших процесів, зокрема млинів. Монтаж його на річці є простим, та займає до тижня часу.



Рисунок 7 – Загальний вигляд водяного колеса

Водяне колесо з лопатями встановлюють перпендикулярно до поверхні води. Важливо частину колеса занурити у воду, зокрема менше половини. Тоді потік води, який рухається з певною швидкістю діє на лопаті і обертає колесо, обертовий момент передається на генератор і виробляється електричний струм. Потужність таких коліс є незначною і залежить від швидкості води. До вісімнадцятого століття ККД водяних коліс становив біля 20 %, а пізніше його збільшили до 60 %. Для ефективної роботи необхідні швидкості від 2 м/с [21].

Наступним варіантом є гірляндні гідроелектростанції, які являють собою металевий трос, на який жорстко закріплені ротори (турбіни) (рис. 8). Трос поперечно перекриває річку, тобто тягнеться від одного берега до іншого.

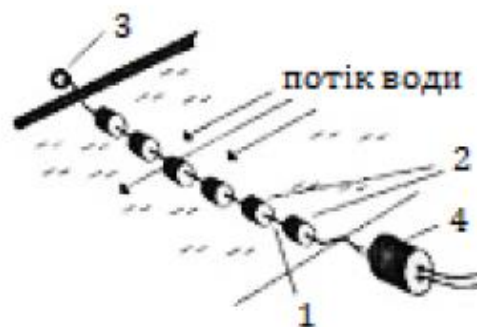


Рисунок 8 – Схема гірляндної гідроелектростанції: 1 – трос гнучкий металевий; 2 – ротори (турбіни); 3 – підшипник; 4 – генератор

Один кінець троса з'єднаний з підшипником, а інший з генератором і повністю з роторами занурений у воду. Під дією потоку рідини обертаються ротори, а від цього обертається сам трос і передає обертання на вал електрогенератора 4 [18].

Гірляндні гідроелектростанції були поширені в середині двадцятого століття, для забезпечення не значних за потужністю процесів. Основним недоліком є сама конструкція, яка є дуже матеріаломісткою та потребує повного перегородження річки, що недопустимо і небезпечно, а також через низький ККД.

Є багато різновидів конструкцій, представлених на рисунку 9 [25].

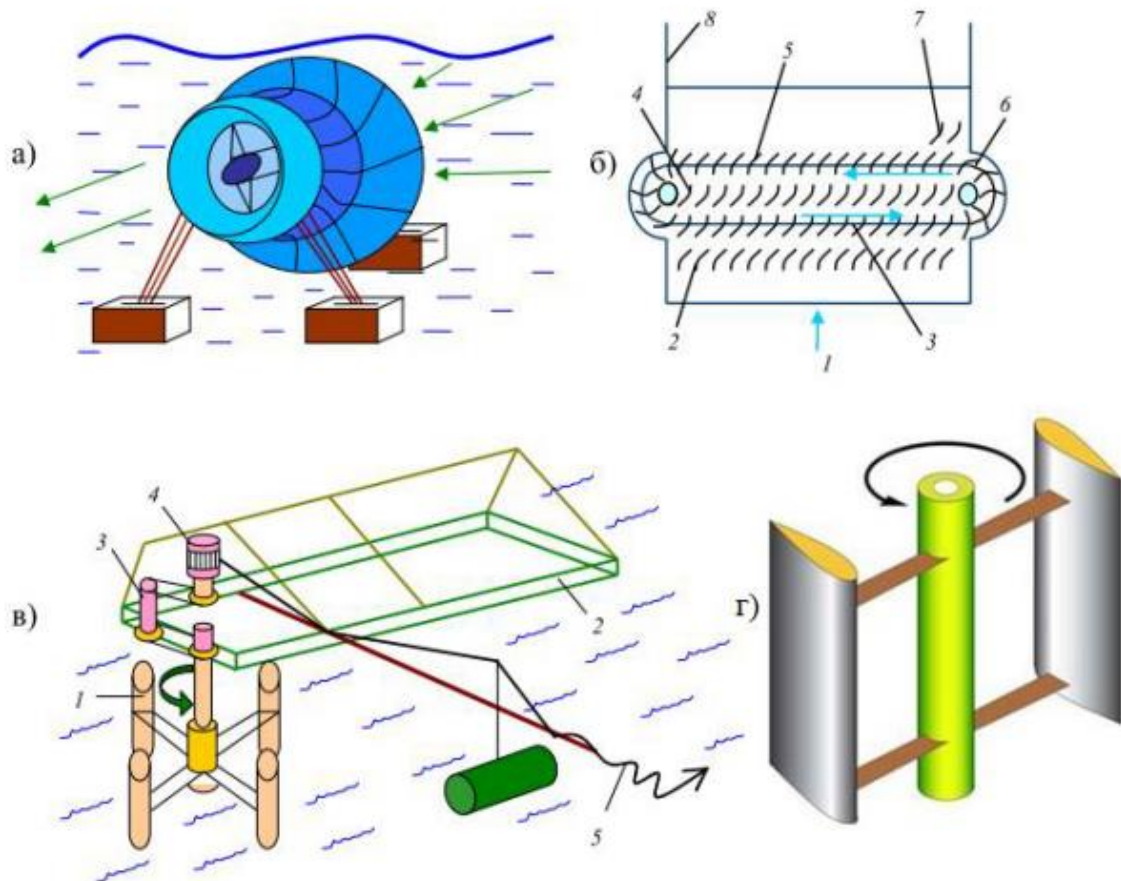


Рисунок 9 – Конструкція вільнопоточних гідроелектростанцій: а) з осовою гідротурбіною; б) з гідротурбіною Шнайдера (1 – потік води; 2 – перший ступінь напрямних лопатей; 3 – перший ступінь лопатей; 4 – другий ступінь напрямних лопатей; 5 – другий ступінь лопатей; 6 – приводний

ланцюг; 7 – третій ступінь напрямних лопатей; 8 – відсмоктувальна труба);  
 в) з турбіною карусельного типу (1 – турбіна карусельного типу; 2 – пліт для кріплення електромеханічного вузла; 3 – мультиплікатор; 4 – генератор; 5 – електрокабель від генератора до споживача); г – ротор Дарье

Зокрема на рисунку 9,г представлений загальний вигляд робота Дарье, який характеризується дуже простим механізмом, з вертикальним розміщенням ротора, який повертається за рахунок різниці тиску що створюється на лопатях, за рахунок обтікання рідиною складних поверхонь. Перевагою його також є те, що він може обертатись при будь якій зміні потоку рідини.

Поширеними також є осьові (пропелерні) гідротурбіни (рис 9,а) які мають багато різновидів, в основному залежно від орієнтації ротора (рис. 10).

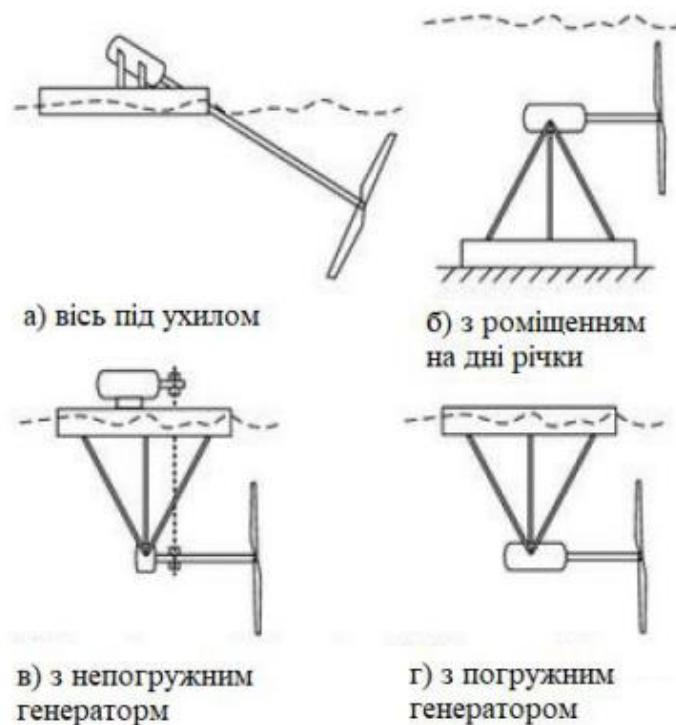


Рисунок 10 – різновиди горизонтальних турбін [22]

Вони повністю занурені у воду, і на відміну від вітрових мають значно меншу ширину лопаті, зокрема для води вистачає ширини 2см. Однак,

залежно від швидкості річки параметри і конфігурація лопатей можуть змінюватись.

На рисунку 11 показані основні типи гідротурбін які застосовуються на вільнопоточних гідроелектростанціях [23].

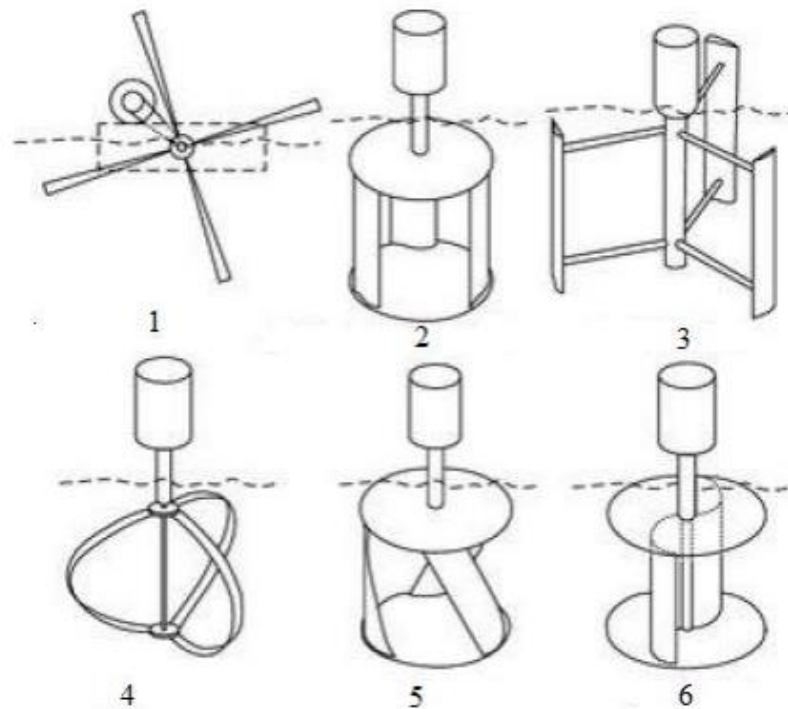


Рисунок 11 – Різновиди гідротурбін вільнопоточних гідроелектростанцій

Як бачимо з рисунка, конфігурацій гідротурбіни є багато, насамперед це пов'язано з тим, що розробники, науковці, представники конструкторських бюро, займаються постійним удосконаленням конструкцій вільнопоточних гідротурбін для підвищення коефіцієнта корисної дії в умовах обмеженості характеристик річки.

Отже якщо правильно підійти до вибору гідроустаткування та його обґрунтування, то можна отримати ряд переваг, а саме:

- генерація електроенергії відбувається з відновлюваного джерела, стабільнішого за сонячну чи вітрову енергію;
- близькість до кінцевого споживача, і як наслідок мінімальні втрати електроенергії при її передачі;

- низька вартість електроенергії, оскільки не потребують будь якого вхідного палива;
- повна відсутність будь-яких викидів в атмосферу, а також мінімальний вплив гідрологію річок і навколишнє середовище;
- вихід на повну потужність у малих гідроелектростанціях займає менше часу, ніж у генераторів на нафтопродуктах;
- мобільність.

Вибір тої чи іншої конструкції залежить від характеристик річки, і вимог споживача. Необхідно ефективно підбирати місце проектування на річці, і саму річку, оскільки малі струмки зимою замерзають а влітку пересихають.

## **2.2 Вибір річки та визначення її руслової потужності**

Першим кроком до обґрунтування параметрів гідроелектростанції є визначення потенційної ділянки для її спорудження і визначення потужності водотоку. Для означених конструкцій гідроелектростанцій важливо, щоб місце спорудження мало глибину від 1м (можна і глибше, це збільшить потужність внаслідок можливості встановлення більшої гідротурбіни) і ширини від 2 м. Також необхідно визначити потужність потоку, або руслову потужність.

Енергією водного потоку, або гідроенергією, є його здатність здійснювати роботу. Однак, якщо вода знаходиться в статичному положенні, зокрема в резервуарі, басейні, ставку і не витікає, то вона не виконує роботи. Але це не значить, що вода у такому стані не володіє енергією. Ця енергія води є енергією положення, або потенціальною енергією.

Вода, протікаючи в річці, здійснює роботу, протікаючи з верхів'я річки в низовину. Вода тече (або падає) під дією своєї ваги, тобто під дією сили тяжіння. Тому чи більше води в потоці, і чим більший ухил річки, а

відповідно і швидкість вища, тим більше в ньому кінетичної енергії. Це означає, що енергія потоку рідини залежить не лише від кількості води, тобто витрати, але і від швидкості її руху і напору (висоти перепаду).

Напір може бути створений природньо, наприклад коли є водоспади. Але для гідроенергетичного освоєння, переважно напори створюють штучно, або за допомогою греблі, або за допомогою дериваційного каналу (вода забирається з річки і подається на гідротурбінну каналом, що має ухил менший за річку), або з поєднання і деривації і греблі. На прикладі дериваційного каналу, зрозуміло, що напір – це різниця відміток між рівнем забору води в канал і нижнім рівнем води після виходу її з гідротурбіни.

Для вільнопоточних гідроелектростанцій, поняття напору розглядаються по іншому. Напір потрібний для визначення потужності вільнопоточної гідроелектростанції, яка залежить від:

- витрати води, яка проходить через гідротурбінну;
- динамічного напору (швидкісного напору), який являє собою діючу силу рухомого потоку рідини;
- ККД гідротурбіни.

Для розуміння швидкісного напору розглянемо приклад з греблею. Гребля перегороджує річку і за нею утворюється водосховище на висоту греблі. Якщо відкрити отвір в греблі, то вода буде вільно вилитись з деякої висоти  $H$  (м). Ця висота  $H$  і є напором (рис. 12).

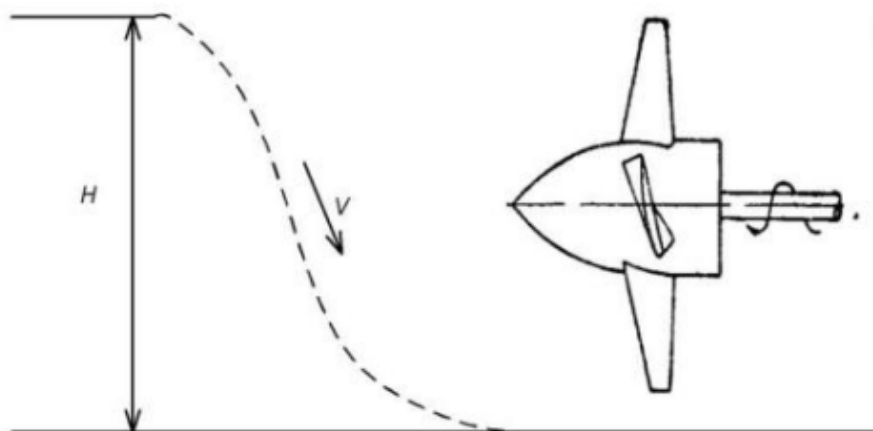


Рисунок 12 – Схема для визначення напору  $H$

По мірі падіння вода набуває швидкості  $v$  (м/с). Тоді швидкість можна визначити з виразу [7]

$$v = \sqrt{2gH}, \text{ м/с}, \quad (2.1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

З виразу (2.1) знайдемо напір  $H$

$$H = \frac{v^2}{2g}, \text{ м}. \quad (2.2)$$

Таким чином з виразу (2.2) можна визначити швидкісний напір. Тоді потужність водного потоку визначимо [7]

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H, \text{ кВт}, \quad (2.3)$$

де  $Q$  – витрата води м<sup>3</sup>/с.

Таким чином для визначення потужності водотоку необхідно мати значення витрати води і швидкості течії.

Оскільки швидкість і витрата води є мінливою протягом року, скористаємось даними облводгоспу. Для отримання цих даних проводяться щоденні дослідження на водомірних постах, де ведуться спостереження за рівнем води, швидкістю і витратою. Ці пости в першу чергу призначені для попередження паводків, тому відслідковується рівень води перед впадання меншої річки в більшу. А оскільки інших спостережень немає, використаємо такі дані в нашому дослідженні.

Для дослідження використано типово гірську річку Голятинка, яка є притокою Ріки і протікає у Хустському районі Закарпатської області. Довжина річки 20 км, площа водозабору 91 км<sup>2</sup>, а ухил річки 31 м/км [6].

Суттєвий ухил важливий для забезпечення необхідної швидкості та для збільшення встановлено потужності вільнопоточної гідроелектростанції. Також недалеко від водомірного поста, глибина річки складає 1,5 м, а ширина 3,5 м, що відповідає умовам щодо спорудження вільнопоточної гідроелектростанції.



Використовуючи дані щоденних спостережень за річкою, побудовано графік середньомісячних витрат води (рис. 13).



Рисунок 13 – Середньомісячні витрати води у створі річки Голятинка

У таблиці 1 наведено середньомісячні швидкості потоку рідини у досліджуваному створі річки Голятинка.

Таблиця 1 – Середньомісячні швидкості потоку у досліджуваному створі річки Голятинка

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Швидкість $v$ , м³/с	1,70	1,95	3,72	5,92	4,36	3,07	2,37	2,18	2,85	3,35	1,92	1,47

Як бачимо з таблиці 1, середня швидкість течії у досліджуваній річці Голятинка коливається від 1,47 м/с в грудні до 5,92 м/с в квітні. Це показує що вільнопоточну гідроелектростанцію можна використовувати цілий рік.

Таким чином визначені характеристики річки є вихідними даними для обґрунтування параметрів вільнопоточної гідроелектростанції на гірській річці Голятинка.

### 2.3 Обґрунтування типу, структури вільнопоточної гідроелектростанції та способів її використання

Від давніх часів людина селилась вздовж річок. І більшість міст зі зрозумілих причин будували річок. Зокрема і сьогодні до 45 % міського населення і 90 % сільського проживає на території басейнів малих річок [24]. Тому фермер, чи інший споживач енергії, що проживає на березі швидкої річки, може мати свою електростанцію, яка працює без витрат на паливо, і живиться за рахунок гідроенергії. Також особливістю малої гідроенергетики є комплексність використання водних ресурсів, встановлення на водотоках каскадів гідроелектростанцій для отримання енергії від локальних мереж.

Для дослідження ефективності використання нових джерел енергозабезпечення визначимо оптимальні способи перетворення енергії малих річок за допомогою вільнопоточних гідроелектростанцій.

Варіантів використання може бути декілька. Все залежить від вимог до гідроелектростанції, її структури, можливостей водотоку. Гідроелектростанцію можна застосовувати безпосередньо для виробництва постійного або змінного електричного струму. У цьому випадку гідротурбіна, яка знаходиться безпосередньо в річці, через мультиплікатор (або редуктор) може бути з'єднана з генератором, розташованим на березі річки (рис. 14).

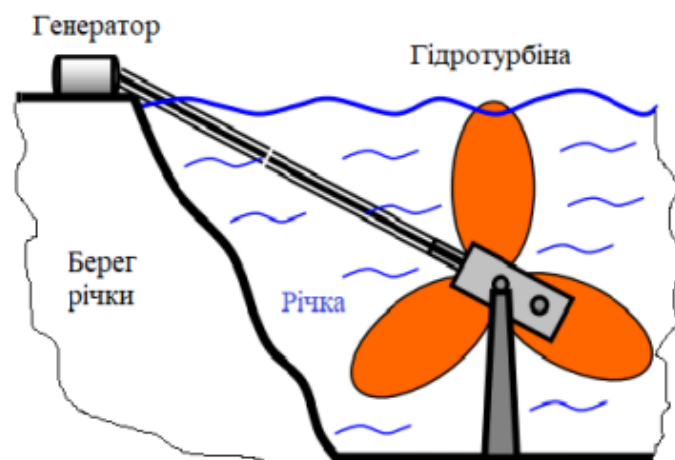


Рисунок 14 – Схема роботи вільнопоточної гідроелектростанції з генератором розміщеним на березі річки

Також гідроелектростанція може використовуватись як акумулююча, коли на вихідному валу від гідротурбіни крім генератора застосовують насоси, які закачують води резервуари (ємності), і ця вода використовується коли мале навантаження ні гідротурбіну.

Нами виділено основні варіанти використання гідроенергії в вільнопоточних гідроелектростанціях і зведені в таблицю 2.

Таблиця 2 – Використання гідроенергії в вільнопоточних гідроелектростанціях

№ з/п	Варіанти використання	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
1	Підводний турбогенератор змінного струму	1. Не потребує використання інвертора.	1. Складність виготовлення. 2. Збільшена вага заглибного агрегату. 3. Потрібне баластне навантаження.
2	Береговий турбогенератор постійного струму з акумулятором	1. Не потребує баластного навантаження. 2. Дозволяє отримувати короткочасну підвищену потужність.	1. Необхідний інвентор. 2. Періодично необхідно замінювати акумулятори.
3	Турбонасосний модуль з накопичувачем води і напірним турбогенератором змінного струму	1. Не потребує баластного навантаження. 2. Не потребує використання інвертора. 3. Дозволяє отримувати короткочасну підвищену потужність. 4. Регулювання потужності зміною подачі води.	3. Необхідно створювати водосховище.

## Продовження таблиці 2

1	2	3	4
		5. Використання води на зрошення.	
4	Комбінований агрегат з береговим генератором, акумуляторами, насосним модулем з бойлером для нагріву води	1. Дозволяє вирішити проблеми електрозабезпечення, холодного і гарячого водопостачання об'єктів. 2. Не потребує баластного навантаження. 3. В якості джерела енергії річка.	1. Необхідний інвертор на 220В. 2. Періодично необхідно замінювати акумулятори.

Розглянемо детальніше запропоновані варіанти. За першим варіантом турбогенератор (турбіна і генератор) знаходиться в потоці рідини і подає вироблений змінний електричний струм 220В на берег. У цьому варіанті немає необхідності в інверторі, однак якщо у випадку зменшення навантаження на гідротурбіну необхідне баластне навантаження.

За другим варіантом турбіна знаходиться в потоці з'єднана мультиплікатором зі встановленим на березі генератором постійного струму. Для одержання підвищеної потужності у річці паралельно можна встановити кілька гідроелектростанцій об'єднаними в локальну мережу (рис. 14).

Також можна розглядати варіант третій, коли гідротурбіна працює в парі з насосом, і таких установок може бути декілька, які подають воду з великим напором у водосховище-накопичувач гідроенергії.

Наступним варіантом одержання енергії від річки є комбінований спосіб, за якого застосовується дві установки. Наприклад турбогенератор (з генератором на березі річки) для виробництва електроенергії і турбонасос (гідротурбіна в парі з насосом) для подачі води до споживача (рис. 15).

За цього варіанту можна забезпечити гаряче водопостачання за рахунок річки, яка є джерелом енергії як для подачі води так і нагріву води. Тобто уся система є автономною без використання електроенергії з мережі.

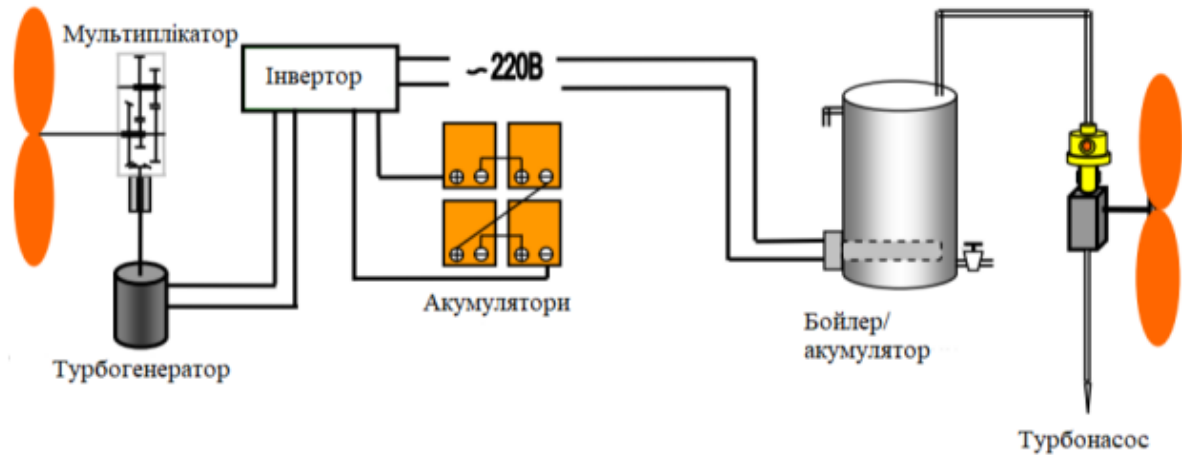


Рисунок 15 – Комбінований спосіб використання турбогенератора і турбокомпресора

Наявність акумуляторів дає змогу накопичити енергію у періоди доби коли є мінімального споживання. Коли акумулятори повністю зарядяться (при напрузі 14В), за допомогою терморегулятора включається автоматично електричний нагрівач води в бойлері, і відключається нагрівач при досягненні заданої температури води в бойлері.

Таким чином наявність структурі того чи іншого елемента гідроелектростанції залежить від вибору варіанту використання гідроенергії. Насамперед необхідно обґрунтувати параметри пропелерної вільнопоточної гідроелектростанції для умов досліджуваної річки Голятинка.

## 2 МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІЛЬНОПОТОЧНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 3.1 Визначення потужності лопатевої гідротурбіни

Для обґрунтування параметрів гідроелектростанції, важливо визначити не руслову потужність водотоку, а потужність гідротурбіни, що дає змогу підібрати генератор та інше додаткове обладнання. Для розрахунку потужності можна використовувати формули (2.2) і (2.3) тільки з врахуванням того, що у формулі (2.3) буде враховано ККД турбіни даного типу, а також витрата води що проходить через робоче колесо гідротурбіни.

Витрата води  $Q$  для вільнопоточної гідроелектростанції – це кількість води, яка проходить зі швидкістю потоку рідини за одиницю часу, через площу робочого колеса гідротурбіни, або іншими словами через площу проекції колеса. Для пропелерної турбіни ця площа рівна площі кола, накресленого діаметром, рівним діаметру робочого колеса гідротурбіни. В такому випадку витрату  $Q$  визначимо з виразу

$$Q = S \cdot v, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.1)$$

де  $S$  – площа проекції робочого колеса,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – швидкість потоку рідини,  $\text{м}/\text{с}$ .

Для розрахунку приймемо діаметр робочого колеса гідротурбіни  $D = 1\text{м}$ .

Варто детальніше зупинитись на швидкості потоку  $v$ , яка по суті є ключовим показником, що впливає на потужність гідроелектростанції. До визначення швидкості потрібно підходити дуже важливо. Швидкість течії є дуже мінливою, яка залежить від багатьох факторів. Вона міняється щосекунди, є різною на різних ділянках річки, і залежить від місцевості, опадів, глибини, ухилу і русла річки.

Як бачимо з формул (2.2), (2.3), (3.1), у визначенні витрати води швидкість має лінійну розмірність, при визначенні швидкісного напору підноситься до квадрату. Оскільки потужність залежить як від витрати води так і напору, значить вона залежить від  $v^3$ , тобто потужність пропорційна кубу швидкості русла річки. Ось чому зі зменшенням швидкості, дуже різко падає потужність гідротурбіни, а відповідно і самої гідроелектростанції. Проте, з іншої сторони, чим більша швидкість потоку тим більшу потужність гідроелектростанції можна одержати.

Використовуючи формулу (3.1) визначимо витрату води, яка проходить через робоче колесо гідротурбіни. Оскільки, нами було отримано значення помісячних середніх швидкостей у річці в досліджуваному створі, визначимо помісячні витрати води та зведемо їх в таблицю 3.

Таблиця 3 – Витрати води вільнопоточної гідроелектростанції по місяцях

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Швидкість $v, \text{ м}^3/\text{с}$	1,70	1,95	3,72	5,92	4,36	3,07	2,37	2,18	2,85	3,35	1,92	1,47
Витрата води ГЕС $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1,33	1,53	2,92	4,65	3,42	2,41	1,86	1,71	2,24	2,63	1,51	1,15

Використовуючи формулу (2.2) визначимо швидкісний напір. Отримані дані зведемо в таблицю 4.

Таблиця 4 – Швидкісний напір вільнопоточної гідроелектростанції по місяцях

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Швидкість $v, \text{ м}^3/\text{с}$	1,70	1,95	3,72	5,92	4,36	3,07	2,37	2,18	2,85	3,35	1,92	1,47
Швидкісний напір $H, \text{ м}$	0,15	0,19	0,71	1,79	0,97	0,48	0,29	0,24	0,41	0,57	0,19	0,11

Як бачимо з таблиці 3, середня витрата води через робоче колесо гідротурбіни коливається в межах 1,15 – 4,65 м<sup>3</sup>/с, а швидкісний напір (таблиця 4) в досліджуваному створі річки Голятинка – 0,11-1,79 м.

Таким чином маючи значення витрати води і швидкісного напору можемо визначити потужність вільнопоточної пропелерної гідротурбіни з виразу  $N_T$ , кВт [7]

$$N_T = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{TM} = 9,81 \cdot S \cdot \frac{v^3}{2g} \cdot \eta_{TM}, \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

де  $\eta_T$  – коефіцієнт корисної дії агрегату, що складається з пропелерної гідротурбіни та мультиплікатора,  $\eta_{TM}=0,6$ .

Отримані значення потужності гідротурбіни  $N_T$  зведено в таблицю 5.

Таблиця 4 – Потужність вільнопоточної гідроелектростанції по місяцях

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потужність $N_T$ , кВт	1,15	1,75	12,12	48,89	19,50	6,81	3,13	2,44	5,46	8,85	1,67	0,75

За отриманими даними побудовано графік залежності потужності пропелерної гідротурбіни від швидкості течії (рис.16).

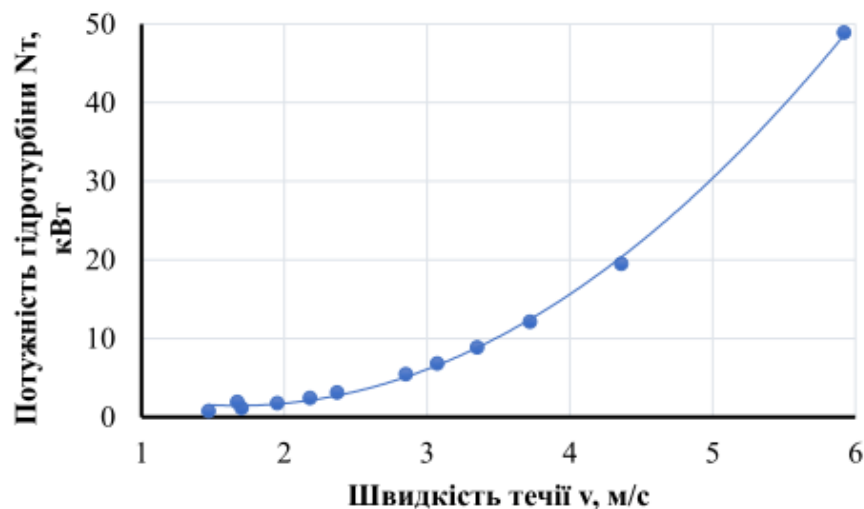


Рисунок 16 – Графік залежності потужності пропелерної гідротурбіни від швидкості течії



Як видно з рисунка потужність вільнопоточної гідроелектростанції залежить тільки від швидкості потоку, і є мінливою залежно від сезону. Для річки Голятинка вона може сягати майже 50 кВт за швидкості потоку біля 6 м/с. Зрозуміло що така швидкість спостерігається тільки в період паводків, і на неї не можна орієнтуватись, оскільки цей період є загрозою для вільнопоточних гідроелектростанцій. Для даної річки оптимальною є швидкість потоку в межах 1,47 – 3,0 м/с. Для визначення оптимальної потужності насамперед необхідно узгодити конфігурацію лопатей гідротурбіни.

### 3.2 Обґрунтування параметрів лопатей гідротурбіни

Для ефективних енергетичних показників гідротурбіни, важливим є обґрунтування орієнтації поперечної лінії лопаті пропелерної гідротурбіни по відношенню до площини обертання гідротурбіни. Для пропелерних гідротурбін лопаті виготовляють з листової сталі. Найпоширенішим профілем лопаті є щось середнє між гвинтами літаючого апарату і судовим гребним. Гідротурбіни такого типу ще називають осьовими оскільки потік води попадає на лопаті лише в осьовому напрямку. Загалом є багато конфігурацій лопатей, але ми зупинимось на турбіні з двома лопатями.

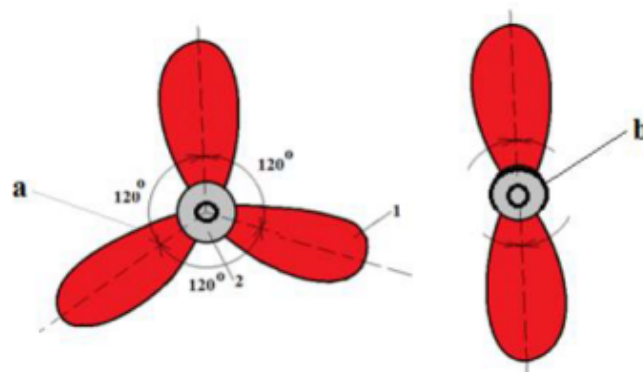


Рисунок 17 – Загальний вигляд лопатевої пропелерної гідротурбіни:

a – трилопатева гідротурбіна; b – дволопатева гідротурбіна

Зображення контурів перерізів лопаті біля її кінця та основи подано на рисунку 18. Як бачимо, поперечні лінії, на різних радіусах, по напрямку не збігаються. Кути  $\kappa_i$  між цими лініями та площиною обертання гідротурбіни складають кути скрутки лопатки на будь-якому радіусі.

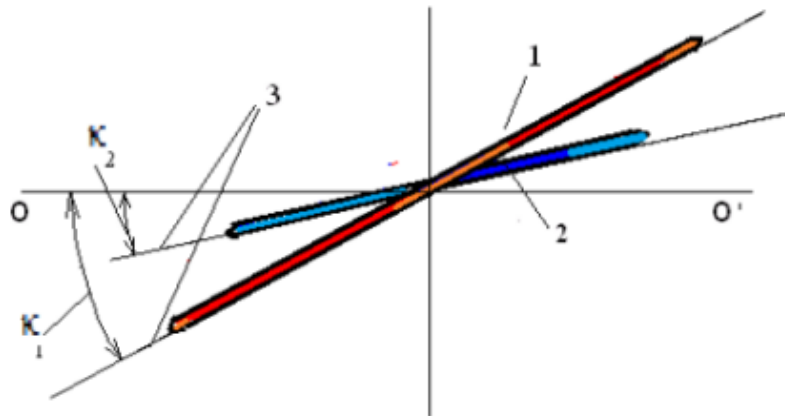


Рисунок 18 – Конттури січення лопаті перерізів лопатки: 1 – біля основи лопаті; 2 – у центрі лопаті; 3 – поперечні лінії, що визначають кут скрутки;  $\kappa_1$  – кут скрутки біля основи лопаті;  $\kappa_2$  – кут скрутки на кінці лопаті; O – O' – площина обертання гідротурбіни

Найвища продуктивність гідротурбіни досягається за умови, що кут атаки водотоку  $H$  і, пов'язаний з ним кут заклинення  $G$ , є оптимальними з точки зору сприйнятливості водяного потоку на будь-якому радіусі лопаті.

Для підвищення ефективності гідротурбіни, важливо забезпечити єдиний крок обертання лопаті на всіх її радіусах. Наприклад, потік води, який протікає з постійною швидкістю через переріз гідротурбіни, що обертається з частотою  $n$  і залишає віртуальний слід кінця лопаті у водному середовищі. Тоді, траєкторія руху кінців лопаті у водному середовищі буде рівномірною гвинтовою спіраллю, показаною на рисунку 19, з кроком  $b$  і діаметром рівним діаметру пропелерної гідротурбіни.

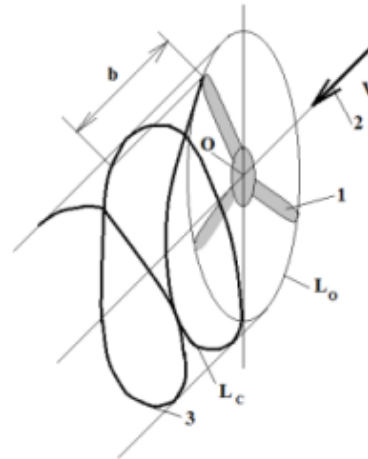


Рисунок 19 – Фізична модель віртуального сліду кінця лопаті гідротурбіни у водному потоці: 1 – турбіна; 2 – напрямок водного потоку; 3 – траєкторія руху кінця лопаті; O – вісь обертання гідротурбіни;  $b$  – крок лопаті;  $L_0$  – окружність описується кінцем лопаті в площині;  $L_c$  – віртуальний слід кінця лопаті у водному потоці за один оберт

Крок обертання лопаті  $b$  можна визначити з виразу:

$$b = \frac{v}{n}, \text{ м,} \quad (3.3)$$

де  $v$  – розрахункова швидкість потоку, м/с;  $n$  – розрахункова частота обертання гідротурбіни, об/с.

За теорією розрахунку гідроелектростанцій пропелерного типу можемо визначити швидкохідність гідротурбіни з виразу [22]

$$z = \frac{z_1 \cdot (3 + \frac{6}{i})}{9}, \quad (3.4)$$

де  $i$  – число лопатей, од;  $z_1=8$  – швидкохідність однолопатевого пропелера.

$$z = \frac{8 \cdot (3 + \frac{6}{2})}{9} = 5.$$

Тоді, для середньої швидкості 2,1 м/с, можемо визначити частоту обертання гідротурбіни за формулою [22]

$$n = \frac{19,1 \cdot z \cdot v}{D}, \text{ об/хв,} \quad (3.5)$$

де  $D$  – діаметр робочого колеса гідротурбіни,  $D=1$  м.

$$n = \frac{19,1 \cdot 5 \cdot 2,1}{1} = 200 \text{ об/хв.}$$

Тоді крок обертання лопаті визначимо за формулою (3.3)

$$b = \frac{2,1 \cdot 60}{200} = 0,63 \text{ м.}$$

Кут встановлення лопатей гідротурбіни визначимо за формулою

$$\alpha = \arctg \frac{b}{L_0}, \quad (3.6)$$

де  $L_0$  – окружність описується кінцем лопаті в площині,  $L_0 = 2\pi R$ .

$$\alpha = \arctg \left( \frac{0,63}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5} \right) = 11,3^\circ.$$

Отже визначений кут лопатей пропелерної гідротурбіни є оптимальним для середньої швидкості потоку, для забезпечення необхідної частоти обертання турбіни.

### 3.3 Обґрунтування компоновки гідроелектростанції та розрахунок мультиплікатора

Щодо компоновання основного обладнання можна виділити дві основні схеми гідроенергетичних установок малої потужності, зокрема установки «Турбіна – Генератор» та «Турбіна – Підвищуюча передача – Генератор» (рис. 20).

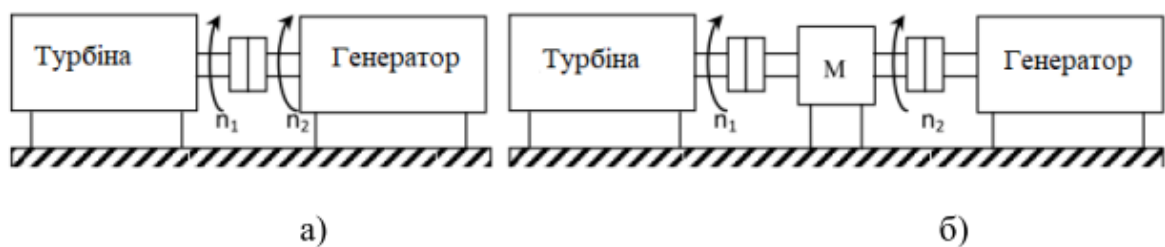


Рисунок 20 – Схема компоновання гідроелектростанції: а – «Турбіна – Генератор», б – «Турбіна – Підвищуюча передача – Генератор»

Найбільш поширеними є установки типу «Турбіна-Генератор», особливо це стосується великих гідроелектростанцій. Однак для гідроелектростанцій малої потужності, особливо коли є мінливими витрата води, або як в нашому випадку швидкість потоку, то необхідно застосовувати підвищуючу передачу, зокрема мультиплікатор.

Головні вимоги, які накладають пристрої що підключені до гідротурбіни (в даному випадку генератор) – це потужність і частота обертання генератора. В даному випадку, для генератора важлива велика частота обертання, оскільки це зменшує його габарити. А для вільнопоточної гідроелектростанції, а саме коли генератор теж розміщений у потоці рідини, це є важливо (рис. 21).

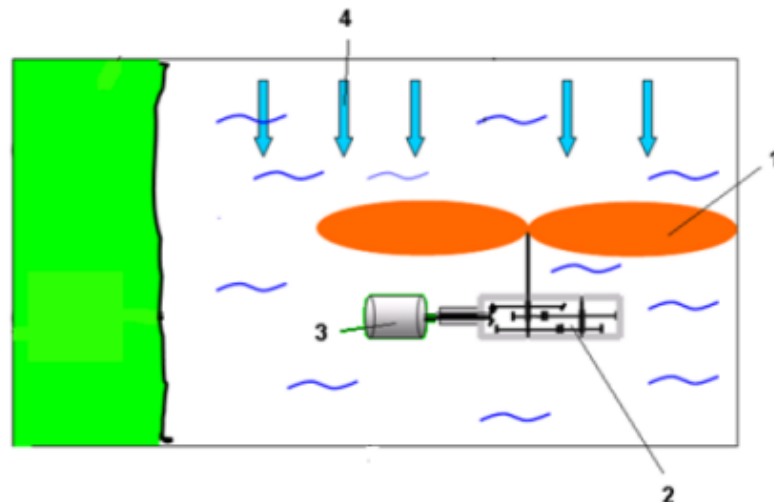


Рисунок 21 – Кінематична схема вільнопоточної гідроелектростанції, в якій генератор розміщений в потоці рідини: 1 – гідротурбіна, 3 – шестеренний мультиплікатор, 2 – генератор, 4 – напрямок потоку

В даному випадку ми зупинились на механічному мультиплікаторі. Його передаточне число розраховують залежно від параметрів прийнятого електрогенератора. Розрахована частота обертання гідротурбіни становить  $n_T=200$  об/хв. Для гідроелектростанцій малої потужності до 5 кВт, підходять асинхронні генератори з частотою обертання частота обертання  $n_G=3000$

об/хв. Тому розрахунок мультиплікатора будемо проводити саме для цих значень. Тоді передаточне число мультиплікатора  $i_m$  становитиме:

$$i_m = \frac{n_g}{n_T} = \frac{3000}{200} = 15, \quad (3.7)$$

Для отримання передатного відношення мультиплікатора 1:15 і розміщення шестерень у корпусі невеликого габаритного розміру для передачі обертання під кутом, застосовано мультиплікатор закритого типу з трьома ступенями підвищення частоти (рис. 22).

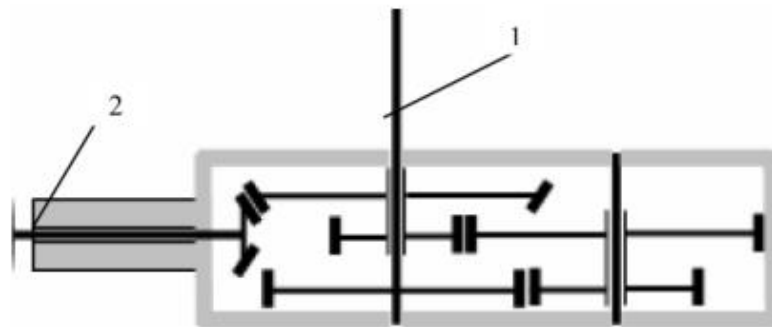


Рисунок 22 – Кінематична схема мультиплікатора:

1 – вал гідротурбіни; 2 – вал генератора

Два ступені є циліндричні з двома проміжними «паразитними» шестернями і одна ступінь – конічна, зв'язана з валом генератора. Передатне відношення першої пари циліндричних шестерень становить  $i_1 = 1:1,94$ , другої пари –  $i_2 = 1:2,73$ , конічної пари –  $i_3 = 1:2,85$ . Таким чином загальне передатне відношення  $i_m$  мультиплікатора визначимо:

$$i_m = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 = 1,94 \cdot 2,73 \cdot 2,85 = 15,09.$$

Для шестерень мультиплікатора приймаємо матеріал сталь 45.

### 3.4 Підбір генератора гідроелектростанції

Найбільш оптимальним типом генератора для потужності гідроелектростанції від 0,5 до 5 кВт є використання трифазного серійного короткозамкнутого асинхронного двигуна з конденсаторною системою

збудження, що дозволяє самостійно збуджувати генеруючу напругу. При використанні багатополосного асинхронного двигуна і мультиплікатора механічні втрати можна звести до мінімуму [8].

Включення індуктивності до контуру збудження дозволяє підвищити надійність самозбудження, зменшити ємність збудження та втрати холостого ходу асинхронного генератора. В результаті його самозбудження здійснюється при зниженому встановленому фазній напрузі. У результаті фазна напруга генератора знижується на величину  $\Delta U_G$  (до 10%). Схема підключення представлена на рисунку 23.

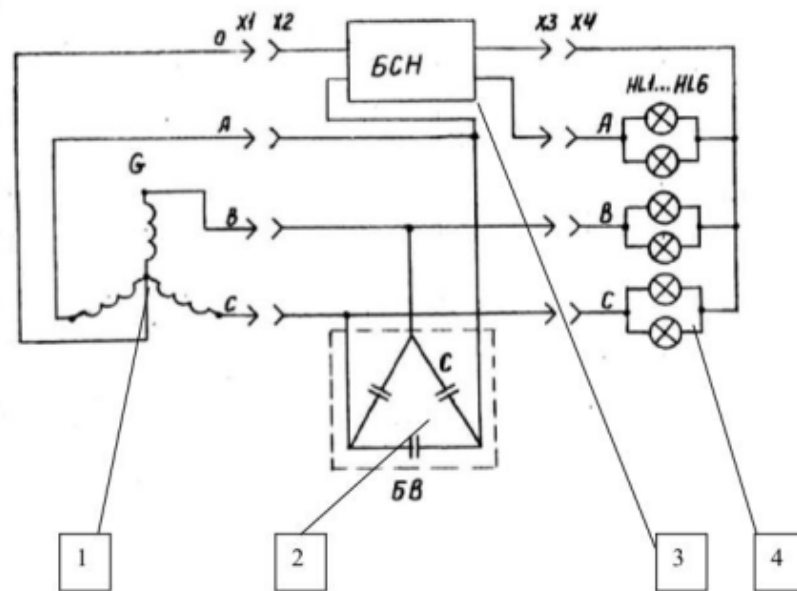


Рисунок 23 – електрична схема конденсаторного збудження та навантаження: 1 – обмотка статора; 2 – конденсатори; 3 – блок стабілізації напруги; 4 – навантаження

Такий спосіб використання серійного асинхронного електродвигуна як генератор вільнопоточної гідроелектростанції дозволяє знизити втрати генератора до 40% (порівняно з відомим способом збудження та роботи синхронних генераторів), і забезпечити «м'який» режим його самозбудження. Застосування в якості генераторів серійних асинхронних двигунів з блоком конденсаторного самозбудження дозволяє істотно знизити вартість електростанції і підвищити її надійність.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Охорона праці і техніка безпеки на гідроелектростанції**

Техніка безпеки повинна дотримуватися як під час експлуатації гідроелектростанції так і у період пусконаладжувальних робіт. Заходи щодо забезпечення безпеки на гідроспорудах та устаткуванні залежать від виду робіт. Територія гідроелектростанції, акваторії, приміщення та робочі місця повинні забезпечувати безпечну роботу обслуговуючого та ремонтного персоналу.

На території повинні постійно підтримуватись у справному стані мостові навколо будівель та споруд, дороги та проїзди, тротуари, водостічні труби та лотки. Через кювети, нагірні канали або траншеї, що перетинають проїжджі дороги, повинні влаштовуватись мости з поручнями.

При спрацьовуванні водосховища з метою огляду чи ремонту споруд перебування людей не допускається. Населення, що живе нижче греблі, заздалегідь повідомляється про подальше підвищення рівня води, а водні станції вище греблі припиняють пересування човнів та поромів.

Промивання наносів із басейнів- та водойм повинно виконуватися з дотриманням правил безпеки при експлуатації засобів гідромеханізації. Канали водоприймача, завалені наносами, прочищаються лише з боку верхнього б'єфу. Включення механізмів головних затворів греблі на спуск здійснюється лише після того, як черговий особисто переконується у відведенні всіх осіб із загрозованих зон.

Водолазні роботи на гідроелектростанції виконуються за спеціальними нарядами та технічними завданнями. У документації мають бути передбачені техніка безпеки виконання робіт.

Огляд та ремонт дериваційних каналів має бути організований так, щоб унеможливити падіння людей у воду. Доступ персоналу до випорожненої камери відстійника можливий після того, як черговий по споруді перевірить



та переконається у щільності закриття затвора та відключенні подачі струму до електродвигунів.

Експлуатація турбінних трубопроводів передбачає огляд та ремонт їх при відключеному та знеструмленому автоматичному захисті від розриву трубопроводів. На весь період ремонту трубопроводів дискові та кульові затвори біля напірного басейну або зрівняльних резервуарів повинні бути закриті, а затвори у турбін – відкриті.

Огляд та ремонт механізмів затворів гідротехнічних споруд дозволяється лише після вжиття заходів щодо запобігання випадковому включенню їх у роботу.

При чищенні та ремонті механізмів повинні бути вжиті заходи проти самостійного переміщення частин, що рухаються як в результаті випадкового включення джерела енергії, що живить машину або механізм, так і під дією власної ваги цих частин.

#### **4.2 Техніка безпеки під час експлуатації гідроелектростанцій**

Під час експлуатації гідроелектростанцій усі працівники повинні знати та точно виконувати правила техніки безпеки. При обслуговуванні гідроагрегатів потрібне дотримання наступних правил техніки безпеки.

1. Спостереження за роботою гідроагрегатів може бути доручено лише досвідченим особам, які успішно склали іспит на право обслуговування даного обладнання [8].

2. На кожному робочому місці повинні бути вивішені на видному місці необхідні креслення та схеми, а також докладні інструкції щодо обслуговування цього обладнання.

3. У разі потреби машиніст повинен передати спостереження за своїм робочим місцем черговому начальнику зміни.

4. Про всі помічені несправності необхідно негайно повідомити чергового начальника зміни.
5. Під час роботи гідроагрегатів забороняється проводити будь-які ремонти і чистку його обертових частин.
6. Забороняється проводити на ходу чистку різних частин турбіни, як, наприклад, ротора, хрестовини, стін кратера, валу тощо.
7. Чищення може проводитися тільки на зупинених машинах за спеціальним у кожному випадку дозволом чергового інженера.
8. При чищенні необхідно дотримуватися наступних запобіжних мір: настилати дошки, вивішувати на рукоятку направляючого апарату вивіску «не включати» тощо.
9. Машинний зал і всі прилеглі до нього приміщення повинні утримуватись у зразковій чистоті.
10. Усі приводні ремені та муфти обертання повинні бути надійно захищені захисними кожухами.
11. Категорично забороняється торкатися чи підходити до електричних виводів генератора як під час роботи машини, і під час її зупинки.
12. Усі робочі місця повинні мати освітлення, що гарантує правильність та безпеку обслуговування.
13. Категорично забороняється користуватися переносними лампами напругою понад 12 В.
14. Поручні та сходи повинні бути у справності.
15. Для виконання висотних робіт у приміщенні використовують драбини, які підбиті гумою та обладнанні гачками або застібками.
15. Для надання першої допомоги при нещасному випадку у будівлі гідроелектростанції мають бути носі, гумові мати, аптечка та інші засоби, передбачені положенням про охорону праці.
16. Вхід у приміщення машинного залу та інші робочі місця особам, які не пов'язані на даний час з їх обслуговуванням і не мають спеціального дозволу, забороняється.

### **4.3 Техніка безпеки на гідроелектростанції під час ревізій і ремонтів**

Під час ремонту або ревізії обладнання гідроелектростанції насамперед необхідно осушити турбіну та турбінний (підвідний) трубопровід. А технологічний процес огляду або ремонту повинен складатися з урахуванням правил техніки безпеки, а саме в забезпеченні: а) надійності тимчасових допоміжних споруд для виконання ремонтних робіт; б) знеструмлення або ізолювання кабелів високої напруги в районі виконання робіт; в) забезпечення достатнім освітленням та переносними лампами низької напруги; г) правильною організацією праці та розстановкою робочої сили.

Крім цього важливо врахувати наступні моменти:

- до роботи повинні допускатися робітники, які знають інструкцію з техніки безпеки;
- усі транспортно-підйомні механізми (крани, талі, лебідки) і засоби повинні бути перевірені та мати відповідні таблички про їх вантажопідйомність;
- місця, де проводяться електрозварювальні роботи, мають бути обгороджені щитами;
- ремонтне обладнання та інструменти повинні мати відповідні захисні пристрої;
- робітники, зайняті на обрубці, продуванні, шліфуванні, різанні, зварюванні, повинні виконувати роботи в захисних окулярах;
- забороняється проводити роботи або знаходитися під вантажем, що висить або транспортується.

### **4.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях на гідроелектростанціях**

Вважається, що виробництво електричної енергії на гідроелектростанції є ефективним і відносно безпечним. Але згідно даних

світової статистики виходить що аварії на гідровузлах можливі, а аварії на гідроелектростанціях останніми роками свідчать про збільшення їх ймовірності. Наслідки аварій, які можуть бути катастрофічні, і пов'язані з пошкодженням і руйнуванням гребель, і інших споруд, що примикають до них. Як показує статистика – кожні 5 років руйнується 1 гребля, та кожні 15 місяців відбувається 1 катастрофа в середньому із 50 людськими жертвами. Основною причиною цього є будівництво все більш високих гребель із великими водосховищами у складних природних умовах. З 300 аварій гребель у різних країнах за 175 років у 35 % випадків причиною було перевищення розрахункової максимальної скидної витрати води. Втрати населення, що у зоні дії хвилі прориву, можуть досягати вночі 90%, вдень 60%. Із загальної кількості постраждалих кількість загиблих може становити вночі 75%, удень 40%. Наслідки посилюються аваріями на потенційно небезпечних об'єктах у зоні затоплення. Найбільші аварії, які відбулися на гідроелектростанціях з 1928 року і по теперішній час, зокрема прорив плотин Сент-Франсіс (1928р, 600 жертв), Вайонт (1963р. 400 жертв), Ру (1975р. 170000 жертв) Шакидор (2005р.600 жертв) і багато інших, показують необхідність детального аналізу їх можливих наслідків та ретельної розробки заходів щодо їх запобігання.

Тому після аварій в багатьох країнах, були вжиті законодавчі заходи щодо безпеки гідроелектростанцій, що включають постійні спостереження за станом об'єктів, контроль за дотриманням норм та правил експлуатації, виявлення та усунення пошкоджень, виконання у строк профілактичних ремонтів, проведення регулярних інспекцій.

Таким чином, для зменшення наслідків аварій на гідротехнічних об'єктах важливо ретельно оцінювати характер небезпеки що може виникнути, розробляти та впроваджувати відповідні методики попередження надзвичайних ситуацій.

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Ефективність впровадження вільнопоточної пропелерної гідроелектростанції можна оцінити здійснивши техніко-економічні розрахунки.

Зрозуміло, що гідроелектростанції малої потужності, незалежно від типу потребують значних капіталовкладень (рис. 24) [18].

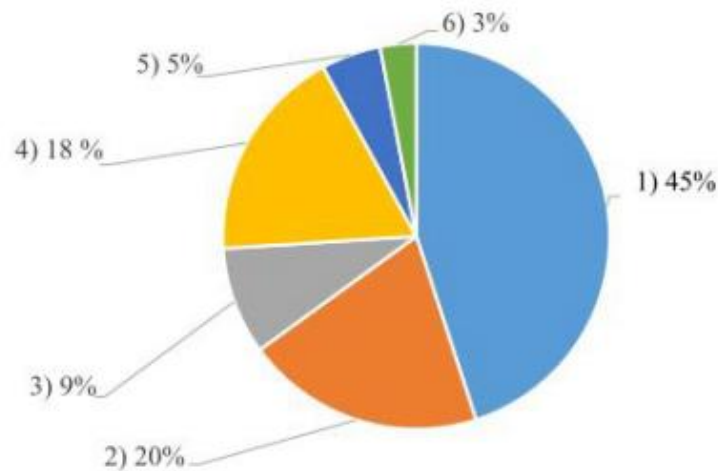


Рисунок 24 – Структура затрат на будівництво гідроелектростанції малої потужності: 1) будівельна частина; 2) проектні роботи; 3) непередбачувані затрати; 4) затрати на гідроагрегат (турбіну і генератор; 5) допоміжне електрообладнання; 6) інше обладнання

Але у якщо традиційних гідроелектростанцій, основна частина затрат йде на гідротехнічні споруди, а це до 45 % (рис. 24), то у випадку з вільнопоточними гідроелектростанціями таких затрат немає, оскільки відсутні будь які гідротехнічні споруди, як такі.

Для вільнопоточної гідроелектростанції визначимо які коти потрібно вкласти з виразу  $K$ , грн

$$K = Z_{ГТ} + Z_{Г} + Z_{Доп}, \text{ грн}, \quad (5.1)$$

де  $Z_{ГТ}$  – затрати на гідротурбіну з мультиплікатором, грн;  $Z_{Г}$  – затрати на асинхронний генератор, грн;  $Z_{Доп}$  – затрати на допоміжне обладнання, грн.

Для гідроелектростанції, приймаємо двигун асинхронний з короткозамкнутим ротором серії АМУ100S2 з конденсаторною системою збудження потужністю 5 кВт, вартість якого складає 13540 грн [9].

Що стосується вартості гідротурбіни з мультиплікатором, а також усім допоміжним обладнанням для її закріплення в потоці рідини, то можна приймати затрати з розрахунку 1000 дол/кВт [5], або згідно курсу НБУ станом на 12.12.23 р. 37,01 грн, складатиме 37010 грн/кВт.

Таким чином для гідроелектростанції потужністю 5 кВт, капіталовкладення розрахуємо

$$K = 13540 + 37010 \cdot 5 = 198590 \text{ грн.}$$

Річні відрахування на гідроелектростанцію визначимо

$$B = I \cdot K, \text{ грн,} \quad (5.2)$$

де  $I$  – відрахування на амортизацію, ремонт, обслуговування тощо (для об'єктів мало гідроенергетики можна приймати  $I = 7\%$  від капіталовкладень [7]).

$$B = 0,07 \cdot 198590 = 13901,3 \text{ грн.}$$

Собівартість виробленої на гідроелектростанції електроенергії можна розрахувати

$$z = \frac{B}{W}, \text{ грн/кВт} \cdot \text{год,} \quad (5.3)$$

де  $W$  – річне виробництво електроенергії гідроелектростанцією, кВт·год/рік.

Використовуючи дані таблиці 4, визначено, що за рік гідроелектростанція може виробляти 20000 кВт·год.

$$z = \frac{13901,3}{20000} = 0,69 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год.}$$

Враховуючи, що з 01.06.23 р. вартість електроенергії  $z^M = 2,64$  грн/кВт·год, визначимо прибуток від виробленої електроенергії на гідроелектростанції

$$\Pi = W (z^M - z), \text{ грн}, \quad (5.4)$$

$$\Pi = 20000 \cdot (2,64 - 0,69) = 39000 \text{ грн.}$$

Тоді термін окупності  $T_{ок}$  визначимо:

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi} = \frac{198590}{39000} = 5,09 \text{ років.} \quad (5.5)$$

Таким чином повернути вкладені кошти на впровадження однієї вільнопоточної пропелерної гідроелектростанції можна за 5 років.

## ВИСНОВКИ

Проаналізувавши стан малої гідроенергетики в Україні, встановлено, що ми маємо значний гідроенергетичний потенціал малих річок, який можна використовувати для забезпечення потреб в енергії споживачів. Оскільки є ряд екологічних вимог до освоєння потенціалу річок, нами обґрунтовано ефективність використання вільнопоточних гідроелектростанцій, що не потребує спорудження жодних гідротехнічних споруд.

Проаналізувавши існуючі типи малих гідроелектростанцій, зокрема вільнопоточних, нами обґрунтовано використання пропелерної гідротурбіни в умовах малої гірської річки Голятинка. Зокрема обґрунтовано вибір потенційного місця розташування гідроелектростанції, та визначено основні характеристики річки: витрату води, швидкість течії і руслову потужність. Середня швидкість в річці коливається в межах 1,47-5,92 м/с.

Обґрунтовано вільнопоточну гідроелектростанцію у складі дволопатевої пропелерної гідротурбіни, підвищуючої передачі і трифазного короткозамкнутого асинхронного двигуна АМУ100S2, працюючого в режимі генератора. Обґрунтовано параметри мультиплікатора, що дозволяє забезпечити передаточне відношення 1:15.

Обґрунтовано можливі варіанти використання гідроенергії в вільнопоточних гідроелектростанцій, зокрема робота гідроелектростанції для виробництва постійного струму, змінного струму, а також робота комбінована робота у в поєднанні з насосом.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях, і запропоновано рекомендації щодо їх покращення.

Техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність використання вільнопоточної гідроелектростанції, зокрема собівартість виробленої електроенергії складає 0,69 грн/кВт·год а термін окупності 5 років.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. «Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том I». Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ. 2018. 181 с.

2. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ, 2018. Т. II. Технологічні особливості малих ГЕС. 145 с.

3. Власюк Ю. С., Стефанишин Д. В. Про проблеми та перспективи малої гідроенергетики в Україні. Математичне моделювання в економіці. 2018. № 1. С. 126-138.

4. Гідроенергетика. : URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/hydroenergy> (дата звернення: 20.05.2023).

5. Гідротурбіна Мікрокрос 5-35 кВт : URL: <https://ua.all.biz/uk/gidroturbina-mikrokros-5-35-kvt-g12210300> (дата звернення: 15.06.2023).

6. Голятинка : URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B0> (дата звернення: 18.07.2023).

7. Золотухін В.І., Лутаєв В.В. Водноенергетичні розрахунки при проектуванні гідроелектростанцій : навч. посіб. Рівне, 2005. 203 с.

8. Експлуатація гідроагрегатів - техніка безпеки при експлуатації : URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/ekspluataciya-gidroagregatov-59.html> (дата звернення: 20.09.2023).

9. Електродвигун асинхронний АМУ100S2 : URL: <https://nep.ua/elektrodivigateli/3000-ob-min/elektrodivigatel-asinhronnyu-amu100s-2-5-kvt-3000-ob-min?sort=p.model&order=ASC> (дата звернення: 05.08.2023).

10. Кукурудза С. І., Сиротюк М. І., Кравченко Т. Я. Методика оцінки гідроенергетичних ресурсів малих річок (на прикладі Закарпаття) : тексти лекцій. Львів : Ред.-вид. відділ Львів. ун-ту, 1996. 70 с.

11. Ландау Ю. М., Сіренко Л. І. Гідроенергетика і навколишнє середовище. Київ: Лібра, 2004. 481 с.
12. Основні типи гідрогенераторів : URL: <https://alternative-energy.com.ua/uk/osnovni-tipi-gidrogeneratoriv/> (дата звернення: 15.10.2023).
13. Папков Б. В. Особливості безпеки гідроелектростанцій і наслідки аварій на них. Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її реалізації : праці IV міжнар. наук.-практ. семінару, 23-26 жовтня 2012 р. Національний гірничий університет. Дніпропетровськ, 2012. С. 121-124.
14. Пістун І. П. Безпека життєдіяльності: навч. посіб. Суми : Унів. кн., 1999. 301 с.
15. Прилуцький Є.В. Аналіз режимів роботи мікрогідроелектростанцій під час паралельної роботи на автономні мережі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Т. 30 (69) Ч. 2 № 3. С. 14–19.
16. Рудько Г. І., Консевич Л. М. Наукові основи екологічної оцінки та оптимального використання гідроресурсів Карпатського регіону України. Київ : Знання, 1998. 137 с.
17. Сиротюк М. І. Відновні енергетичні ресурси Закарпатської області: оцінка потенціалу та проблеми використання : дис. кандидата географ. наук : 11.00.11. Львів, 1997. 185 с.
18. Щербина О. М. Енергія для всіх : техн. довідник. Ужгород : Вид-во В. Падяка, 2000. 192 с.
19. Ashfaq H., Saood M., Singh R. Autonomous micro-hydro power system for distributed generation: a power quality analysis. *International journal of current engineering and scientific research*. 2015. Vol. 2(9). p. 1–6.
20. Halych O., Bilkova E., Nowak P., Riabenko O. Analysis of Hydropotential and Prospects for Small Hydropower Development in Ukraine. *Environmental and Climate Technologies*. 2023, vol. 27, no. 1. p. 763–774.
21. Micro Hydropower System - A Buyer's Guide. URL: [https://energypedia.info/wiki/File:Micro\\_Hydropower\\_System\\_-\\_A\\_Buyer%27s\\_Guide.pdf](https://energypedia.info/wiki/File:Micro_Hydropower_System_-_A_Buyer%27s_Guide.pdf) (дата звернення: 19.08.2023).

22. Sritram P, Suntivarakorn R. Efficiency Comparison of Hydro Turbines in a Micro Generator System from Free-flow Vortex. Preprints 2021, 2021100217. <https://doi.org/10.20944/preprints202110.0217.v1>

23. Sritram P, Suntivarakorn R. The effects of blade number and turbine baffle plates on the efficiency of free-vortex water turbines. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 257 (2019) 012040.doi:10.1088/1755-1315/257/1/012040.

24. The power of rivers. Finding balance between energy and conservation in hydropower development : URL: <https://www.nature.org/media/freshwater/power-of-rivers-report.pdf> (дата звернення: 28.10.2023).

25. Waterturbines URL: <http://waterturbines.wikidot.com/> (дата звернення: 05.11.2023).

26. World Small Hydropower Development Report 2022 : URL: <https://www.unido.org/WSHPDR2022> (дата звернення: 10.06.2023).