

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Ленцик Віталій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.9
(індекс)

Бакалаврська робота

Дослідження залежності потужності гідротурбіни від витрати та напору

під час проектування міні-ГЕС

(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 _____ В.В. Ленцик
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Ващишак Ірина Романівна, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

_____ Середюк О.Є.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень бакалавр

Спеціаліст 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій**

О. Є. Середюк

«___» _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Ленцику Віталію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження залежності потужності гідротурбіни від витрати та напорів під час проектування міні-ГЕС

керівник роботи Ващишак Ірина Романівна, канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом ІФНТУНГ від «24» квітня 2024 року № 271/7

2. Строк подання роботи студентом 14 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: лабораторна установка, атлас річок України, методика розрахунку гідропотенціалу

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

Вступ

1. Аналіз сучасного стану, проблем та перспектив розвитку гідроенергетики в Україні

2. Дослідження залежності потужності ГЕС від швидкості потоку та різниці рівнів води

3. Розташування міні-ГЕС та підбір основного обладнання

Висновки

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 24.04.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук та опрацювання літературних джерел та матеріалів.	24.04.2024-28.04.2024	
2	Аналіз сучасного стану, проблем, та перспектив розвитку гідроенергетики в Україні.	29.04.2024-05.05.2024	
3	Дослідження залежності потужності ГЕС від швидкості потоку та різниці рівнів води.	06.05.2024-29.05.2024	
4	Вибір місця розташування ГЕС та підбір основного обладнання.	30.05.2024-03.06.2024	
5	Оцінка екологічного та соціального впливу.	04.06.2024-06.06.2024	
6	Оформлення бакалаврської роботи.	07.06.2024-14.06.2024	

Студент _____
(підпис)

Ленцик В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ващишак І.Р.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 62 сторінки, 3 розділи, 41 рисунок, 6 таблиць, 6 діаграм, 1 додаток, 30 джерел.

Дослідження залежності потужності гідротурбіни від витрати та напору під час проектування міні-ГЕС.

Бакалаврська робота присвячена дослідженню залежності потужності гідротурбіни від витрати та напору води.

Метою бакалаврської роботи є проєктування малої гідроелектростанції.

У 1 розділі описано сучасний стан та перспективи розвитку гідроенергетики України та деталізовано будову, принцип роботи і особливості застосування гідроелектростанцій.

У 2 розділі описано дослідження залежності потужності різних типів гідротурбін від витрати та напору води.

У 3 розділі під час проектування малої гідроелектростанції здійснено підбір місця розташування обладнання для її побудови та функціонування.

У висновках наведені заключення щодо виконаних розділів бакалаврської роботи.

ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ; ГІДРОТУРБІНА; ГЕНЕРАТОР; МАЛА ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ; НАПР ВОДИ; ВИТРАТА ВОДИ; ГІДРОЕНЕРГЕТИКА.

ABSTRACT

The bachelor work contains: 62 pages, 3 chapters, 41 figures, 6 tables, 6 diagrams, 1 application, 30 sources.

Investigation of the dependence of hydroturbine power on flow and head in the design of mini-hydroelectric power plants.

The bachelor work is devoted to the study of the dependence of hydro turbine power on water flow and head.

The purpose of the bachelor work is to design a small hydroelectric power plant.

Section 1 describes the current state and prospects for the development of hydropower in Ukraine and details the structure, principle of operation, and application of hydropower plants.

Section 2 describes the study of the dependence of the power of different types of hydro turbines on water flow and head.

Section 3 describes the selection of equipment for the construction and operation of a small hydropower plant.

The conclusions provide summary on the completed sections of the bachelor work.

HYDROELECTRIC POWER PLANT; HYDRO TURBINE; GENERATOR;
SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANT; WATER PRESSURE; WATER
FLOW; HYDROPOWER.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ.....	10
1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку гідроенергетики в Україні.....	11
1.2 Будова і принцип роботи гідроелектростанцій.....	18
1.3 Постановка задачі на виконання бакалаврської роботи.....	23
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ГЕС ВІД ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ТА РІЗНИЦІ РІВНІВ ВОДИ.....	24
2.1 Опис лабораторної установки для дослідження об'єктів гідроенергетики.....	24
2.2 Теоретичні дослідження потужності.....	34
2.3 Вимірювання залежності потужності турбін від параметрів потоку води.....	37
2.3.1 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні турбіни Пелтона.....	40
2.3.2 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні поперечно-проточної турбіни.....	42
2.3.3 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні водяного колеса.....	44
Висновки до розділу 2.....	46
РОЗДІЛ 3 РОЗТАШУВАННЯ МІНІ ГЕС ТА ПІДБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	47
3.1 Критерії місця розташування міні ГЕС.....	47
3.2 Вибір гідротурбіни.....	49
3.3 Оцінка екологічного впливу.....	49
3.4 Оцінка соціального впливу.....	51

Висновки до розділу 3.....	54
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
ДОДАТОК А.....	61

ВСТУП

Актуальність роботи

Руйнування енергетичної інфраструктури України росією має катастрофічні наслідки. Російські війська систематично обстрілюють об'єкти електроенергетики, що призводить до аварійних відключень електроенергії по всій країні. Зокрема, постраждали великі електростанції, великі гідроелектростанції та основні розподільчі підстанції. Це призвело до серйозних проблем у забезпеченні потреб населення в електроенергії. Люди не можуть отримувати тепло, освітлення та інші необхідні послуги.

У таких умовах важливо розглянути альтернативні шляхи виробництва електроенергії. Одним із можливих рішень є використання малих гідроелектростанцій.

Гідроенергетика є відновлюваним джерелом енергії, яке не залежить від імпорту газу або інших енергоносіїв. В Україні є значний потенціал для розвитку гідроенергетики, зокрема на річках Дніпро, Дунай та ін.

Також слід розвивати відновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергетика. Ці джерела також не залежать від імпорту та можуть забезпечити стабільний розвиток енергетичного сектору України.

Важливо, щоб Україна якомога швидше відновила свою енергетичну інфраструктуру. Це дасть можливість забезпечити населення необхідними енергоносіями та сприятиме економічному відродженню країни.

Метою роботи є вирішення науково-практичної задачі в галузі відновлюваної енергетики та енергетичного менеджменту – проектуванні малої гідроелектростанції на базі гідрологічних досліджень та з урахуванням екологічних та соціальних впливів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики в Україні;

- дослідити залежність кількості електроенергії, яку можна отримати від малої гідроелектростанції, від швидкості потоку води при різних рівнях;
- спроектувати гідровузол для малої гідроелектростанції та проаналізувати екологічні та соціальні впливи.

Об'єктом дослідження є кінетична та потенціальна енергія потоку води при застосуванні різних типів турбін

Предметом досліджень є процес створення інженерного рішення для використання гідравлічної енергії з метою генерації електроенергії.

Методи дослідження при проектуванні гідроелектростанції включають гідравлічні моделювання для визначення режимів руху води, геологічні дослідження для оцінки ґрунтових умов, екологічні оцінки для визначення впливу на природне середовище, а також вивчення та врахування стандартів безпеки та нормативів для гідроенергетичних об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів

Вагомим практичним результатом виконання бакалаврської роботи є можливість впровадження даного проекту малої гідроелектростанції для електропостачання будинків та промислових об'єктів, враховуючи кліматичні, гідрологічні та екологічні аспекти.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Стрімкий розвиток суспільства, науки та техніки, який спостерігається протягом останніх десятиліть, зумовив величезний попит на енергоресурси. Уся сфера людського життя зосереджена на використанні електрики і з кожним днем людство все більше потребує її. Зростання необхідності в електроенергії при ресурсних і екологічних обмеженнях стає вже критичним фактором подальшого розвитку суспільних сфер життєдіяльності нашої економіки. На даному етапі розвитку енергетики все більш значуще місце посідає відновлювана, яка в подальшому взагалі може витіснити традиційну.

Питання електроефективності для України є особливо актуальним, оскільки споживання енергетичних ресурсів у нашій країні зорієнтовано на традиційні невідновлювані джерела енергії, до того ж Україна імпортує близько 50% електроенергії за високими цінами, що є дуже невигідним для економіки.

Гідроенергетика – це галузь відновлюваної енергетики, що вивчає використання потенціальної та кінетичної енергії води шляхом перетворення її в електричну.

Основними перевагами гідроенергетики порівняно з традиційними невідновлюваними джерелами є: низькі викиди парникових газів в навколишнє середовище; регулювання стічної системи - спроможність регулювання водосховищ дозволяє керувати водними ресурсами; здатність регулювати виробництво електроенергії в залежності від потреб, що дозволяє ефективно управляти попитом; досить тривалий термін їх служби.

1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку гідроенергетики України

В енергетичному комплексі України гідроелектростанції посідають третє місце після теплових та атомних. Сумарна встановлена потужність ГЕС України нині становить 8 % від загальної потужності об'єднаної енергетичної системи країни. Середньорічний виробіток електроенергії гідроелектростанціями дорівнює 10,8 млрд кВт·год. Встановлено, що економічні та технічні можливості використання гідроенергоресурсів України дорівнюють близько 20 млрд кВт·год., а нині використовується не більше 50 %. Основний використовуваний потенціал зосереджений на ГЕС Дніпровського каскаду (потужність — 3,8 ГВт, виробіток — 9,9 ГВт·год): Дніпровська ГЕС, Київська ГАЕС (гідроакumuлююча), Ташлицька ГАЕС.

Карта гідроелектростанцій України подана на рис. 1.1.

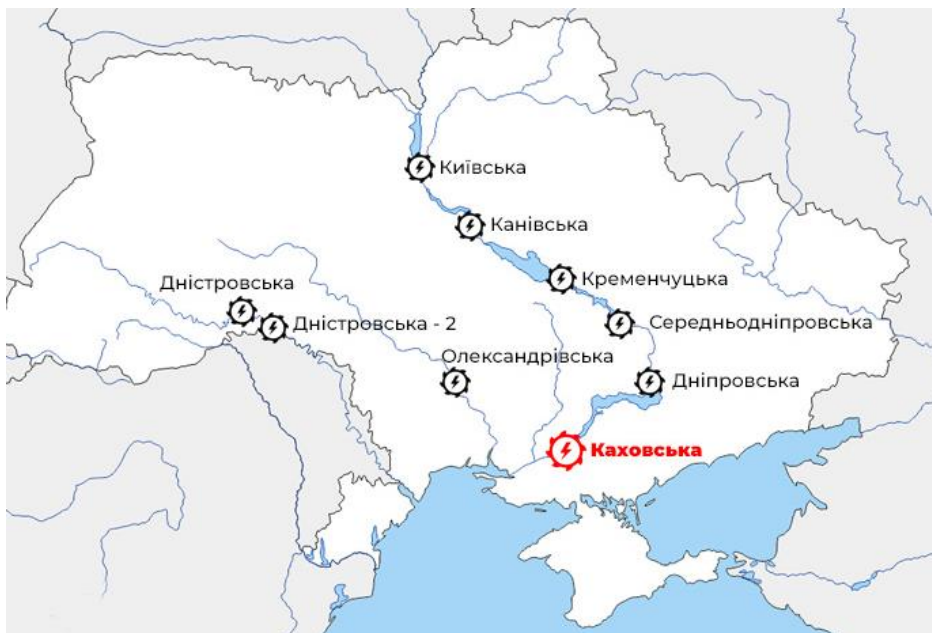


Рисунок 1.1 – Карта гідроелектростанцій України [1]

Окрім ГЕС і ГАЕС, в Україні нині експлуатуються 49 так званих малих ГЕС, які виробляють понад 200 млн кВт·год електроенергії. Але вони мають недоліки: швидке зношення обладнання, пошкодження споруд напірного

фонтана, замулення водосховищ, недостатнє використання засобів автоматики та контролю.

В Україні в умовах енергетичного переходу, де пріоритетну роль відведено ВДЕ із прискореним розвитком, що створює нові умови і вимоги до роботи ОЕС, зміни клімату зі збільшенням екстремальних явищ, таких, як повені, посухи, зростає значення гідроенергетики. Бо саме вона комплексно розв'язує проблеми економіки, зокрема електроенергетики, водного господарства, захисту від повеней і посух, екологію та інше.

Як і у світі, гідроенергетика в Україні в умовах швидкого зростання потужностей СЕС та ВЕС з нестійким виробництвом електроенергії з потужністю ГЕС, ГАЕС приблизно 12% загальної потужності ОС виконує важливу роль, забезпечуючи балансування ОЕС, частотний та аварійний резерви і загалом її стабільну роботу. Так, у лютому 2021 року в критичній ситуації, коли аварійно відключилися блоки Запорізької ТЕС, втрачену потужність підхопили саме ГЕС. В аналогічній ситуації, яка склалася 25 січня 2022 року з аварійною зупинкою двох блоків АЕС (потужністю по 1000 МВт), саме швидке введення агрегатів ГЕС і ГАЕС забезпечило стабільну роботу Об'єднаної енергосистеми країни.

Порівняно з Євросоюзом, де в 2021-му частка зеленої електроенергії, виробленої ВДЕ, зокрема ГЕС, ВЕС та СЕС, становила 38%, АЕС — 25%, а з викопного палива — 37%, в Україні в 2021 році було вироблено з ВДЕ 14,7%, зокрема ГЕС і ГАЕС 6,7%, СЕС, ВЕС — 8%, АЕС — 55%, ТЕС — 30,3%.

У наших умовах з подальшим розвитком ОС України зі зміною структури генеруючих потужностей, використанням інноваційних технологій, де атомна енергетика залишиться основою ОЕС із поступовим зменшенням потужностей ТЕС та швидким зростанням ВДЕ, проблема регулювання ОС стає ключовою, її можна розв'язати переважно за рахунок збільшення потужностей ГЕС і ГАЕС. Важливо, що вслід за США в ЄС розглядають належність атомної енергетики до зеленої генерації поряд з ВДЕ.

В Україні, де водні ресурси дуже обмежені, особливо на півдні, важливе значення для економіки мають водосховища ГЕС комплексного призначення. Із

сумарним середньорічним стоком усіх річок близько 87 км³, лише 52 км³ формується на території України, а в маловодні роки об'єм річного стоку знижується до 30 км³. Об'єм річкового стоку, що припадає на одного жителя, один з найнижчих серед країн Європи.

У таких умовах з дуже нерівномірним розподілом стоку річок на території країни та за сезонами року для його регулювання й раціонального використання створено 1090 водосховищ корисним об'ємом 25,3 км³. Адже саме річки з водосховищами з дуже обмеженими об'ємами підземних вод — основне джерело водопостачання у країні.

Так, за рахунок водних ресурсів Дніпра з каскадом водосховищ ГЕС корисним об'ємом 18,4 км³ забезпечується водопостачання населення, промисловості, сільського господарства та зрошення на території, де проживає близько 70% населення. Воду із дніпровських водосховищ перекидають каналами в маловодні райони Донбасу, Кривого Рогу, Приазов'я тощо, зрошують понад мільйон гектарів посушливих земель на півдні країни.

Про спустошливі посухи в басейні Дніпра, які були, наприклад, 1652 і 1680 років, в історичних документах написано: «Стояла страшна суша та спека сонячна, повисихали води і трави». В останнє десятиріччя в посушливі маловодні 2015, 2018, 2019 і 2020 роки водосховища в повному обсязі забезпечили водопостачання та санітарно-екологічні попуски в нижній течії в розмірі 500 м³/с для запобігання засоленню Дніпровської дельти, Дніпро-Бузького лиману та погіршення санітарної ситуації.

В умовах негативного впливу зміни клімату зі зменшення водності річок корисний об'єм дніпровських водосховищ — це стратегічний запас прісної води, гарантія того, що населення, економіка та довкілля будуть забезпечені водою в посушливі маловодні роки. Забезпечення водою — це питання національної безпеки.

Водосховища Дніпровського каскаду ГЕС стали природною частиною довкілля, їх широко використовують для рекреації. На їхній території розташовано об'єкти природно-заповідного фонду національного значення: ландшафтні заказники, природні заповідники, орнітологічні заказники тощо.

Важливе значення має водосховище Дністровської ГАЕС (рис. 1.2) корисним об'ємом 2 км^3 , яке забезпечує водопостачання в маловодні роки нижче розташованих районів України, а також Молдови, захист від великих повеней, санітарно-екологічний попуск в розмірі $100 \text{ м}^3/\text{с}$. У липні 2008 року, коли була велика повінь (повторюваністю раз в 100 років), завдяки регулюванню Дністровського водосховища (рис. 1.3) витрати нижче від нього було знижено більш як на 30%, а рівні води у Дністрі — понад 2 м, що значно зменшило шкоду від повені на території України і Молдови.



Рисунок 1.2 – Дністровська ГАЕС [2]



Рисунок 1.3 – Дністровське водосховище [3]

Досвід експлуатації водосховищ ГЕС Дніпровського та Дністровського каскадів свідчить, що вони надійно забезпечують захист від катастрофічних

наслідків, значно знижено ризики завдання шкоди довкіллю, населенню, економіці.

У карпатському регіоні великої шкоди населенню, довкіллю, економіці завдають періодично повторювані катастрофічні повені. Так, у басейні річки Тиса катастрофічні сніжно-дощові та зливо-дощові повені з тяжкими наслідками останніми десятиріччями були в 2000, 2001, 2008, 2015, 2017, 2019, 2020 роках. Тому проблему захисту від повеней у цьому регіоні, яка має комплексний характер, слід розв'язувати разом з водогосподарським і гідроенергетичним використанням річок, враховуючи, що тут найбільші в Україні невикористані гідроенергетичні ресурси.

Нині в Україні гідроенергетичні ресурси забезпечують річний виробіток електроенергії всіма ГЕС в середньому 11 млрд кВт г із загальною потужністю 4,8 млн кВт, в зокрема малі ГЕС (до 10 МВт) — всього 0,1 млн кВт (2,1% загальної потужності) з виробітком 0,23 млрд кВт г (2,3% загального виробітку). У країнах ЄС (наприклад Австрії, Франції, Італії, Польщі, Швейцарії) потужність малих ГЕС становить 8—20% загальної потужності ГЕС.

Згідно із попередніми проектними напрацюваннями та дослідженнями, перспективний невикористаний гідроенергетичний потенціал країни може становити приблизно 4 млрд кВт г для середніх і малих ГЕС, зокрема для малих ГЕС — 1—1,5 млрд кВт г. Більшість цього потенціалу — в карпатському регіоні. Рациональне використання цього великого і невикористаного потенціалу потребує, звичайно, зважених рішень з урахуванням впливу на довкілля.

Оскільки в сучасних умовах саме вплив ГЕС та їхніх водосховищ на довкілля — один з найважливіших визначальних чинників, економічно ефективний та екологічно допустимий потенціал буде меншим і визначається на основі виконання за перспективними ГЕС техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) або попереднього ТЕО з урахуванням комплексного використання водосховищ.

Із подальшим розвитком Об'єднаної енергосистеми України визначальне значення для забезпечення потреб у високоманеврових регулюючих та акумулюючих потужностях слід надавати саме ГАЕС. У цьому переконує

світовий досвід. Із сучасних технологій балансування електроенергії в ОС саме ГАЕС найефективніші та найрозповсюдженіші у світі. Вони становлять майже 94% всіх регулюючих потужностей. Бо мають, крім всього, істотні переваги за вартістю, ємкістю, періодом експлуатації над промисловими акумуляторами. Тому там, де сприятливі природні умови, передовсім будують гідроакумулюючі електростанції. ГАЕС можуть не тільки виробляти електроенергію як гідроелектростанції, а й споживати надлишки електроенергії (наприклад, які виробляють АЕС у нічні години або ВЕС і СЕС — протягом доби), закачуючи воду з нижньої у верхню водойму, завдяки чому регулюють графік навантажень в широкому діапазоні.

Із загальною потужністю ГАЕС у світі приблизно 170 млн кВт, зокрема в Європі більш як 53 МВт (в Німеччині — 5,7 МВт, Франції — 5,7 МВт, Італії — 4 млн кВт), в Україні на сьогодні потужність ГАЕС становить лише 2,0 млн кВт. А в інших країнах спостерігається широке будівництво таких електростанцій. За даними Міжнародної гідроенергетичної асоціації, до 2030 року прогнозують збільшення їхніх потужностей вдвічі.

В Україні в західній, південно-західній, центральній, північній, дніпровській регіональних енергосистемах є майданчики нових перспективних середніх (потужністю до 300 МВт) та великих (потужністю 500—1300 МВт) ГАЕС попередньо загальною потужністю 10 млн кВт. Саме вони спроможні значною мірою забезпечити балансування ОЕС України з подальшим її розвитком. А використання як нижніх водойм ГАЕС наявних водосховищ на перспективних великих та деяких середніх ГАЕС дає змогу істотно знизити негативний вплив на довкілля. На півдні країни розглядають спорудження ГАЕС з використанням як водосховищ відпрацьованих кар'єрів, в яких видобували каміння, глину та інші будівельні матеріали.

На рис. 1.4 зображена гідроакумулююча Ташлицька гідроелектростанція.



Рисунок 1.4 – Ташлицька ГАЕС [4]

Істотний нюанс: під час будівництва ГАЕС інвестиції залишаються в Україні у виконанні всіх робіт, зокрема технологічному обладнанні, що з урахуванням мультиплікаційного ефекту забезпечить подальший розвиток економіки, вітчизняної промисловості зі створенням тисяч робочих місць, а також сприятиме соціально-економічному розвитку регіонів та поліпшенню умов життя населення.

Інтеграція ОЕС України з європейською енергосистемою з упровадженням спільного ринку електроенергії дасть потужний поштовх розвитку загалом економіки держави й умов для прискореного розвитку економіки західного регіону, що склалися внаслідок війни. Тут, до речі, досить сприятливі природні умови для швидкого зростання, крім гідроенергетики і ВДЕ. Усе це відкриває широкі можливості Україні стати провідним гравцем на європейському ринку електроенергії, різко збільшивши експорт електроенергії без вуглецевого сліду, насамперед за рахунок найбільш потрібної та дорогої з великою додатковою вартістю високоманеврової балансуєчої електроенергії та допоміжних послуг.

Подальший розвиток гідроенергетики, зокрема малих та середніх ГЕС із водосховищами комплексного призначення, з розв'язанням водогосподарських і екологічних проблем, захисту від повеней в умовах зміни клімату потребують державної підтримки. Адже саме високоманеврові регулюючі ГАЕС гарантують

забезпечення стабільного, ефективного розвитку ОЕС України в умовах подальшого зростання потужностей сонячних та вітрових електростанцій.

Ситуація потребує прискореного ухвалення законодавчо-нормативних актів для післявоєнного розвитку електроенергетики, причому на новій інноваційній основі. Питання досить актуальне, бо ухвалений недавно важливий закон про системи накопичення електроенергії не враховує ГАЕС, створюючи неконкурентне середовище. Верховна Рада надала односторонню перевагу системам промислових акумуляторів, які здебільшого приватні. Це неприйнятний не державницький підхід, тому цей закон потребує внесення відповідних правок. [5]

1.2 Будова і принцип роботи гідроелектростанцій

Гідроелектростанція складається з декількох основних компонентів:

- Водосховище – це збірна площа води, яку можна використовувати для виробництва електроенергії (рис. 1.5). Великі гідроелектростанції часто використовують великі річкові або гірські водосховища.

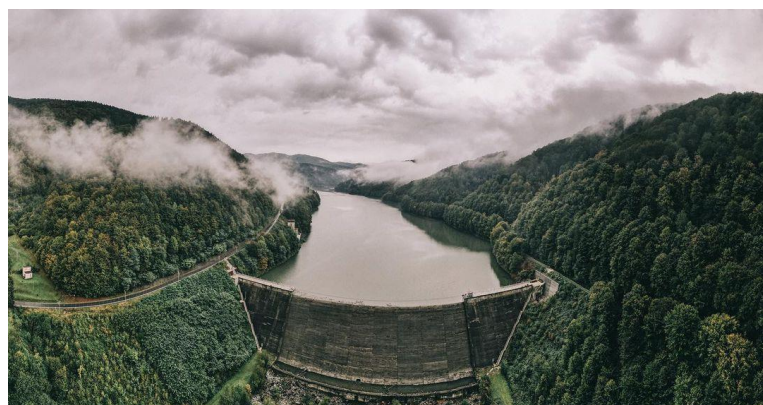


Рисунок 1.5 – Водосховище [6]

- Гребля – бетонна або земляна споруда, яка утримує воду в водосховищі (рис. 1.6). Вона може також включати споруду зі шлюзами для регулювання рівня води.



Рисунок 1.6 – Гребля [7]

- Водозабірна споруда – це елемент, який керує потоком води і направляє його на гідротурбіни (рис 1.7).

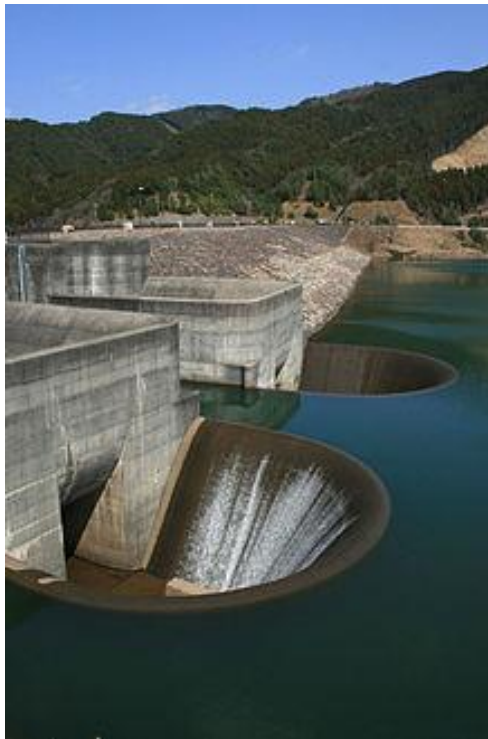


Рисунок 1.7 – Водозабірна споруда [8]

- Гідротурбіни – машини, які перетворюють енергію потоку води в механічну енергію обертання (рис. 1.8).

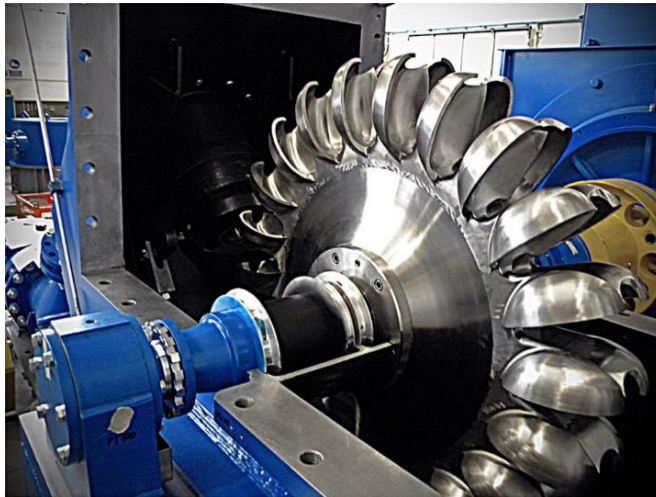


Рисунок 1.8 – Гідротурбіна [9]

- Генератори – обладнання для перетворення механічної енергії, отриманої від гідротурбін, в електричну енергію (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Генератор ГЕС [10]

- Трансформатори – використовуються для підвищення напруги з метою транспортування електроенергії по лініях високої напруги (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Трансформатор ГЕС [11]

- Гідроелектростанційна будівля – це споруда, в якій розташовані турбіни, генератори та інші елементи (рис 1.11).



Рисунок 1.11 – Гідроелектростанційна будівля ГЕС [12]

Гідроелектростанції можуть бути великими (з великими водосховищами) або малими (з малими водосховищами чи без них), залежно від потужності та потенціалу водного об'єкта.

Для роботи гідроелектростанції потрібен перепад висоти русла річки. Щоб його створити, будують греблю, що також слугує водосховищем та дає змогу працювати ГЕС у будь-який час. В результаті вода падає з висоти, потрапляє на лопаті турбіни і змушує їх крутитися, а ті, у свою чергу, змушують обертатися вал генератора і виробляти електроенергію. Також для створення потрібного

тиску води застосовується деривація – відведення води від русла річки каналом або системою водоводів до гідротехнічних споруд. Інколи використовується одночасно і гребля, і деривація. Будову гідроелектростанції можна спостерігати на рис. 1.12.

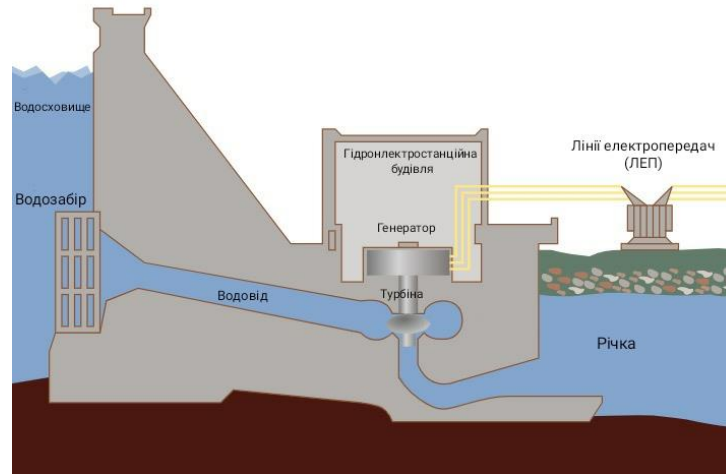


Рисунок 1.12 – Будова гідроелектростанції [13]

Гідроакумулююча електростанція – це електростанція, що використовує у своїй роботі комплекс генераторів та насосів або оборотні гідроелектроагрегати, що можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі насоса. Під час нічного «провалу» енергоспоживання гідроакумулююча електростанція отримує з мережі дешеву електроенергію та використовує її, щоб закачати воду. Під час ранкового та вечірнього піків енергоспоживання, ГАЕС спускає воду і, таким чином, виробляє дорогу «пікову» електроенергію для мережі. Будова гідроакумулюючої електростанції зображена на рис. 1.13.

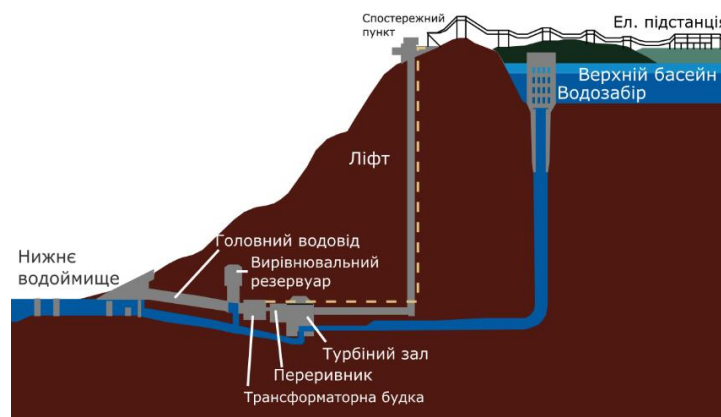


Рисунок 1.13 – Будова гідроакумулюючої електростанції [14]

1.3 Постановка задачі на виконання бакалаврської роботи

Гідроенергетика відіграє важливу роль в енергетичному комплексі України, займаючи третє місце після теплових та атомних електростанцій. З встановленою потужністю близько 8% від загальної потужності об'єднаної енергетичної системи країни, гідроелектростанції України забезпечують значний внесок у виробництво електроенергії, балансування системи, а також забезпечення аварійних резервів. Особливо важливим є потенціал гідроелектростанцій Дніпровського каскаду та малих гідроелектростанцій, які, незважаючи на певні недоліки, зокрема зношеність обладнання, сприяють розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

Серед проблем, що потребують вирішення, виділяються необхідність модернізації обладнання малих гідроелектростанцій, управління водними ресурсами в умовах змін клімату та забезпечення стабільного водопостачання. Важливо зазначити, що гідроенергетика в Україні може бути ключовим елементом у стратегії переходу до відновлюваних джерел енергії, особливо з урахуванням європейського досвіду.

У підсумку, гідроенергетика в Україні має значні перспективи розвитку, що потребує державної підтримки, інноваційних підходів та врахування екологічних аспектів. Її розвиток сприятиме не лише енергетичній безпеці країни, а й поліпшенню умов життя населення та економічному зростанню, що особливо актуально в післявоєнний період.

Для того, щоб встановлена міні гідроелектростанція була енергоефективною потрібно провести попередні дослідження, а саме:

- Дослідити територію де буде встановлено гідроелектростанцію
- Дослідити напір та величину потоку води
- Підібрати необхідне гідрообладнання за результатами дослідження
- Оцінити екологічні та соціальні наслідки.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ГЕС ВІД ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ТА РІЗНИЦІ РІВНІВ ВОДИ

Для дослідження залежності потужності гідроелектростанції від швидкості потоку та різниці рівнів води було використано лабораторну установку leXsolar-Hydropower.

У ході дослідження було проведено аналіз технічних характеристик, принципів роботи та ефективності трьох типів гідротурбін – турбіни Пелтона, поперечно-проточної турбіни та водяного колеса. Також були розглянуті параметри витрати води та висоти подачі води, при яких кожна турбіна показує найкращі результати.

2.1 Опис лабораторної установки для дослідження об'єктів гідроенергетики

Лабораторна установка leXsolar-Hydropower для дослідження об'єктів гідроенергетики зображена на рис. 2.1 [15].

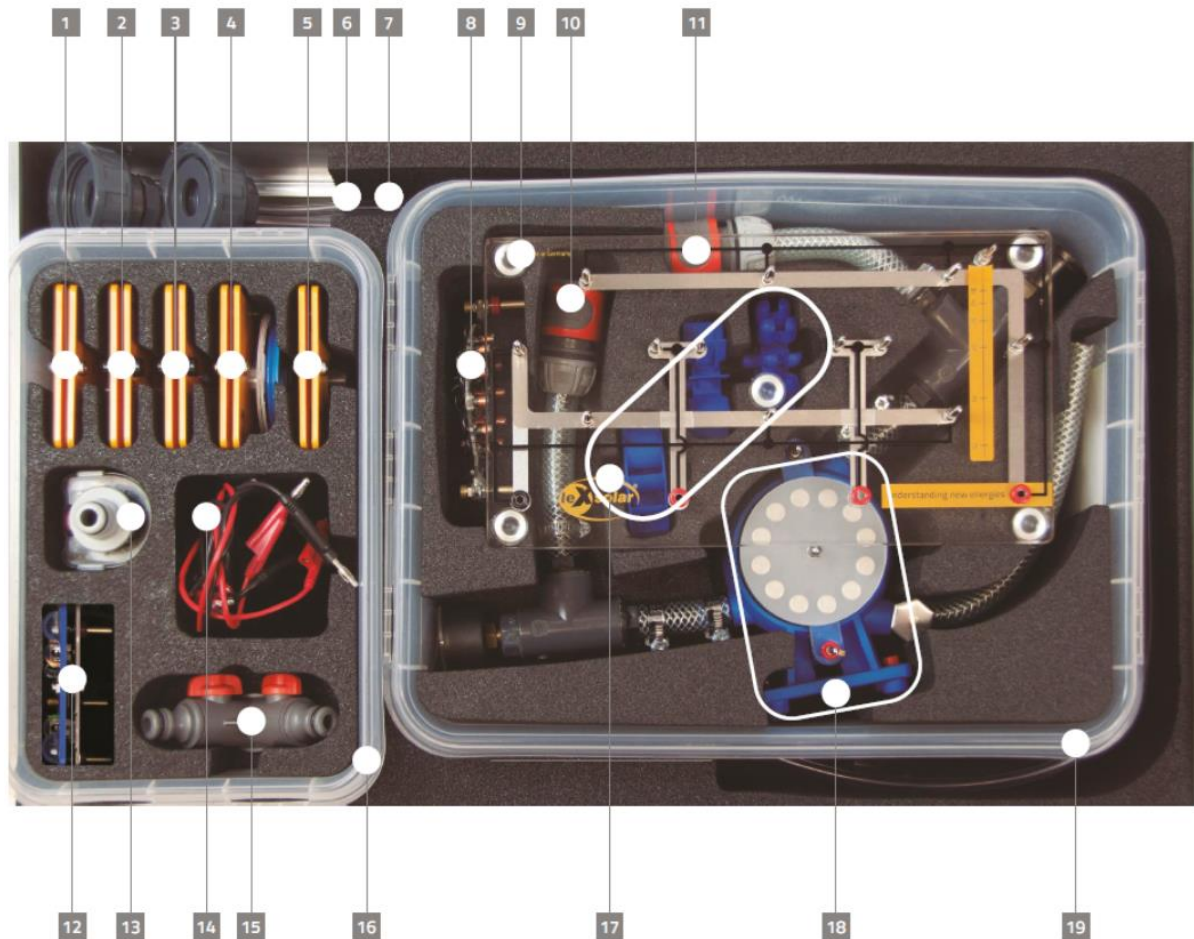


Рисунок 2.1 – Лабораторна установка leXsolar-Hydropower
для дослідження об'єктів гідроенергетики:

- 1 – модуль лампочки;
- 2 – LED-модуль, 2 mA, червоний;
- 3 – модуль резистора;
- 4 – модуль двигуна без редуктора, комплект кольорових дисків;
- 5 – модуль звуковий;
- 6 – набір напорів, 4 мм/8 мм/12 мм;
- 7 – з'єднувальний набір;
- 8 – індукційний генератор;
- 9 – базовий блок;
- 10 – манометр, 2 бар;
- 11 – манометр, 4 бар;
- 12 – AV-модуль;
- 13 – витратомір води;
- 14 – провід чорний 25 см, 50 см, провід червоний 25 см, 50 см;

- 15 – впускний з'єднувач;
- 16 – контейнерний ящик на 6 л;
- 17 – комплект турбін;
- 18 – корпус водяної турбіни;
- 19 – контейнер для води.

Для кожного компонента є назва з номером артикула, зображенням, піктограмою принципової схеми та інструкцією з експлуатації [15].

Базовий блок (рис. 2.2) являє собою макетну плату, до якої можна підключити до 3 компонентів у послідовне та паралельне підключення.

Струм тече по проводах з нижньої сторони. Для з'єднання компонентів базового блоку з іншими компонентами на нижньому кінці є 4 клеми. На друкованих схемах показано послідовне та паралельне з'єднання. Для переходу між послідовним і паралельним з'єднанням модулі потрібно повернути на 90°.

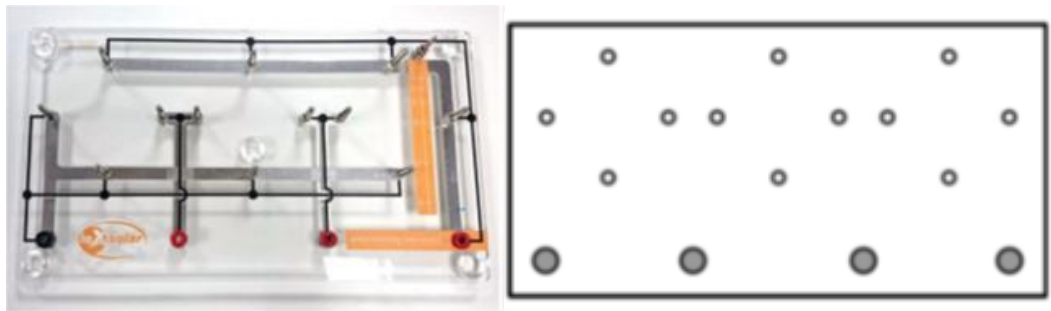


Рисунок 2.2 – Базовий блок

Корпус турбіни (рис. 2.3) має 2 входи (припливи) і 1 вихід.

Турбінний комплект складається з водяного колеса, поперечно-поточної та турбіни Пелтона. Під час експериментів з водяним колесом і поперечно-поточною турбіною використовується верхній приплив. За допомогою турбіни Пелтона вода повинна проходити через нижній приплив.

Вал з'єднує турбіну з білим магнітним диском на зовнішній стороні корпусу. Поверх нього можна прикріпити індукційний генератор. Генератор складається з котушок, діодів і конденсаторів. Коли крутиться турбіна, крутиться і магнітний диск. Це викликає зміну магнітного поля в котушках і індукується

напруга. Синусоїдальна напруга випростовується діодами і згладжується конденсаторами.

Манометри (рис. 2.4) показують тиск, під яким вода надходить в турбіну. Манометр 4 бар встановлюють на нижньому припливі, 2 бар – на верхньому.

Витратомір (рис. 2.6) встановлюється на впускний з'єднувач (рис. 2.5). Він має різноманітні програми, які можна вибрати, натиснувши помаранчеву кнопку. Для лабораторних експериментів завжди використовується режим «літрів за хвилину».

Армований шланг (рис. 2.7) має функцію з'єднання водотурбінного комплексу з водопроводом. Одним кінцем він повинен бути надітий поверх водяного витратоміра, іншим кінцем до водопроводу.

Кожен набір потоку (рис. 2.8) складається зі шланга довжиною 1 м і з'єднувальної частини. Набори потоку варіюються за внутрішнім діаметром 4 мм, 8 мм і 12 мм. За допомогою з'єднувального елемента проточний набір можна під'єднати до нижньої частини блоку потоку.

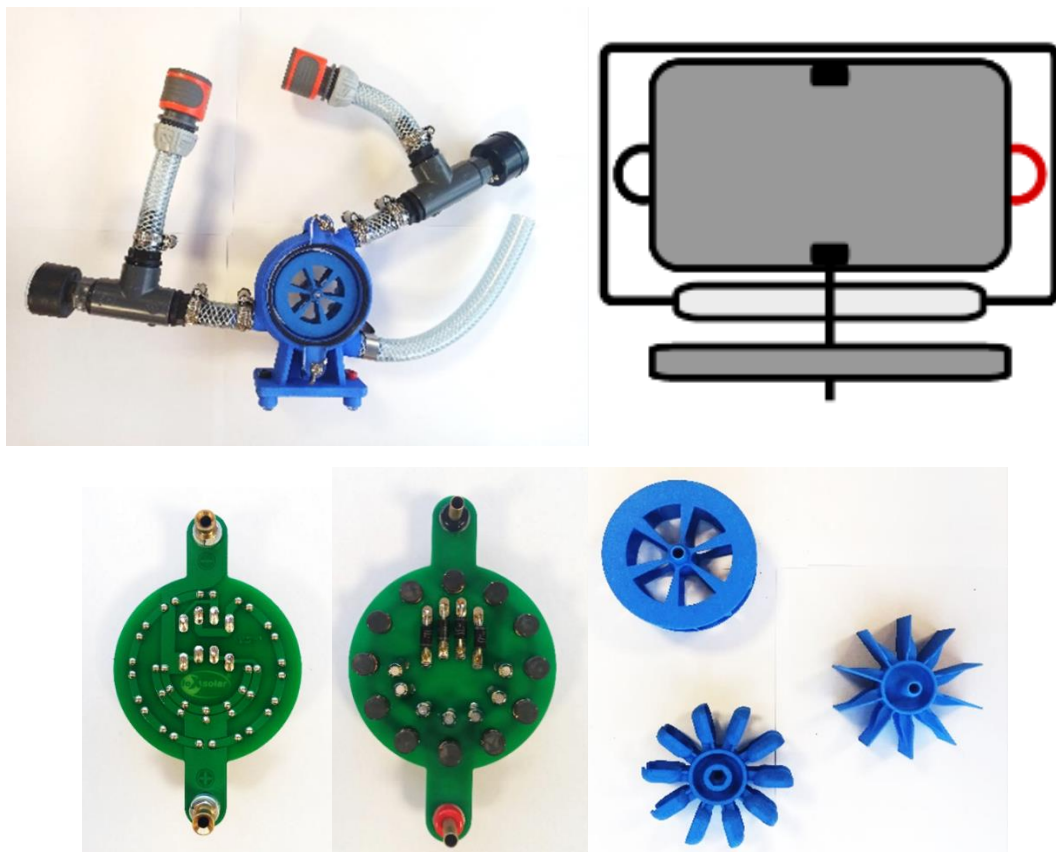


Рисунок 2.3 – Корпус водяної турбіни з індукційним генератором і комплектом турбін



Рисунок 2.4 – Манометри (2 бар та 4 бар)



Рисунок 2.5 – Впускний з'єднувач



Рисунок 2.6 – Витратомір води

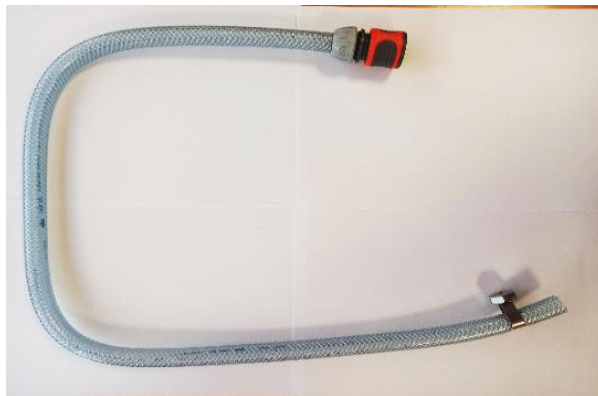


Рисунок 2.7 – Армований шланг 12/18 мм

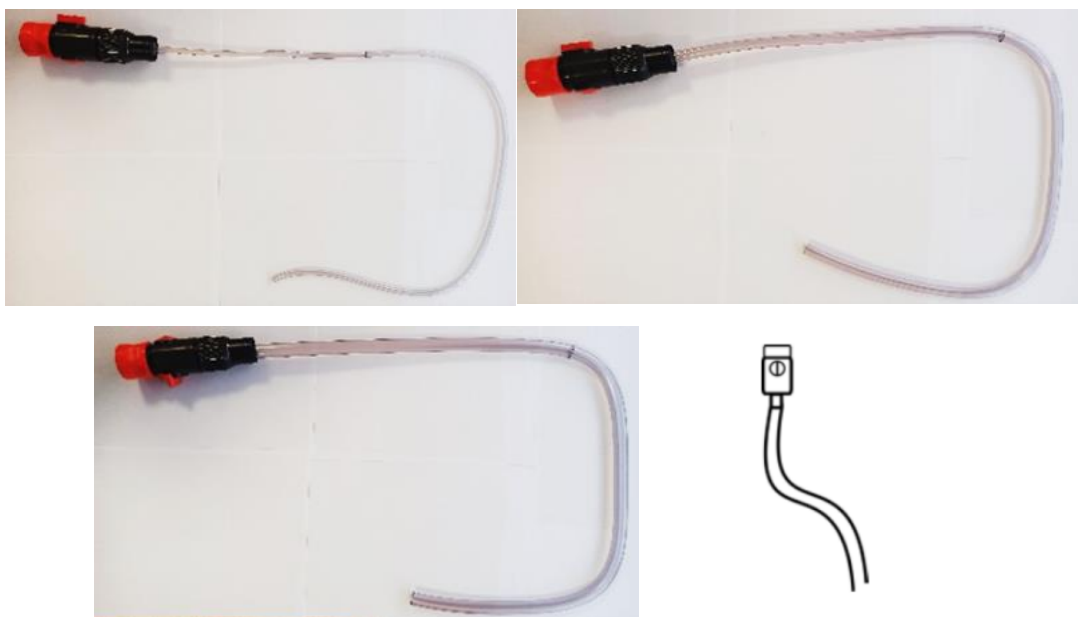


Рисунок 2.8 – Набір напорів, 4 мм/8 мм/12 мм

З'єднувальний клапан використовується для відкриття і закриття входу води (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – З'єднувальний клапан (закритий та відкритий)

Для розмітки висоти кожен шланг має ущільнювальне кільце, яке можна витягнути в потрібне місце.

Контейнер (рис. 2.10) має дренаж, до якого можна підключати проточні набори. А також має похиле дно, завдяки чому вода може безперервно стікати.

Контейнерний ящик (рис. 2.11) призначений для уловлювання води, що витікає з проточних комплектів.

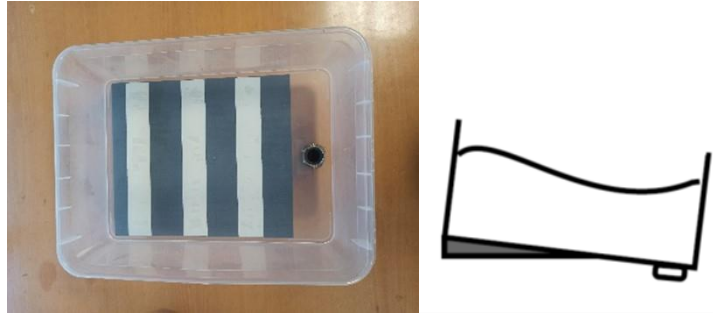


Рисунок 2.10 – Контейнер для води

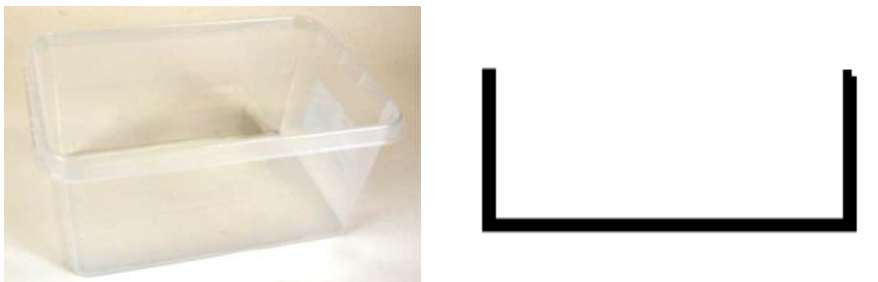


Рисунок 2.11 – Контейнерний ящик на 6 л

AV-модуль (рис. 2.12) – це комбінований вимірювач напруги та струму. Він містить 3 кнопки, функції яких описані на дисплеї відповідно. При натисканні випадкової кнопки модуль вмикається. У вимкненому стані дисплей відображає емблему leXsolar.

За допомогою верхньої правої кнопки режим вимірювання можна перемикає між режимом напруги, режимом струму або комбінованим режимом напруга-струм. І режим вимірювання, і необхідний кабель підключення буде позначено символами електричної ланки на дисплеї. Слідкуйте за тим, щоб у режимі напруги до правого гнізда не подавався струм. У комбінованому режимі напругу можна виміряти як з правого, так і з лівого гнізда. Вплив внутрішнього опору вимірювання струму компенсується внутрішнім опором приладу. Виміряні значення виводяться на дисплеї в натуральних одиницях. Коли

позитивний полюс під'єднано до червоного гнізда, а негативний полюс – до чорного, значення напруги буде додатним. Коли струм подається зліва направо, значення струму також буде додатним. Навпаки, змінюється алгебраїчний знак.

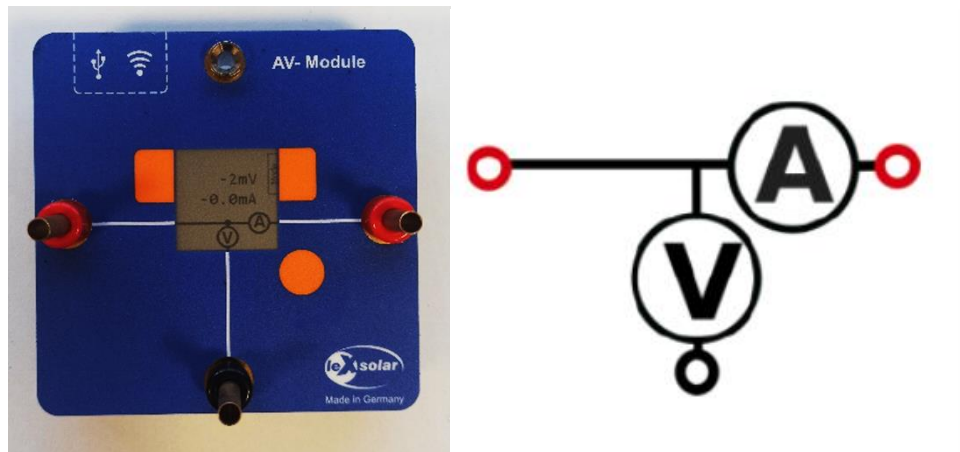


Рисунок 2.12 – AV-модуль

Через 30 хвилин без натискання кнопки або через 10 хвилин вимірювання постійного значення модуль автоматично вимкнеться. Він може вимірювати напругу до 12 В і струм до 2 А. У разі перевищення одного з значень модуль перериває потік струму і показує «overcurrent» або «overvoltage». Це повідомлення про помилку можна підтвердити, натиснувши кнопку. Модуль відновить вимірювання, коли значення досягнуть прийнятних значень.

Вимірювання напруги: діапазон: 0...12 В, точність: 1 мВ, автоматичне відключення при перенапрузі >12 В.

Поточний струм: діапазон: 0...2 А, точність: 0,1 мА (0...199 мА) і 1 мА (200 мА...1 А), автоматичне відключення при перевищенні струму >2 А, внутрішній опір <0,5 Ом (0...200 мА); <0,2 Ом (200 мА...2 А).

Модуль лампочки (рис. 2.13). Технічні характеристики: Лампочка $P_{typ} = 200$ мВт (при 3,5 В). Запобіжники працюють до максимальної напруги 6 В.

У середині LED-модуля (рис. 2.14) знаходиться червоний світлодіод з довжиною хвилі випромінювання 697 нм. Щоб світлодіод загорівся, має бути мінімальна напруга 1,7 В.

Рупор (рис. 2.15) починає шуміти від 0,7 В і 0,3 мА.

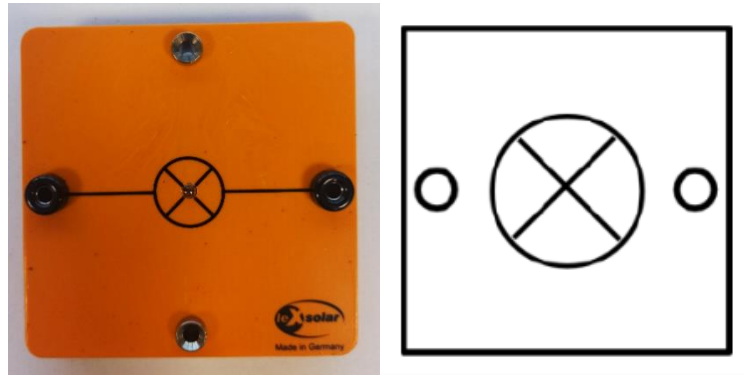


Рисунок 2.13 – Модуль лампочки

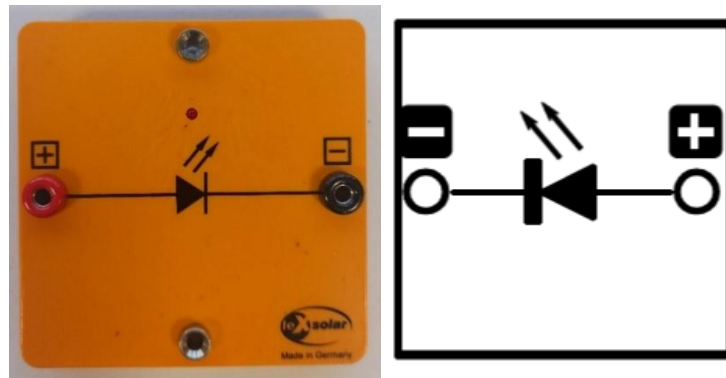


Рисунок 2.14 – LED-модуль, 2 mA

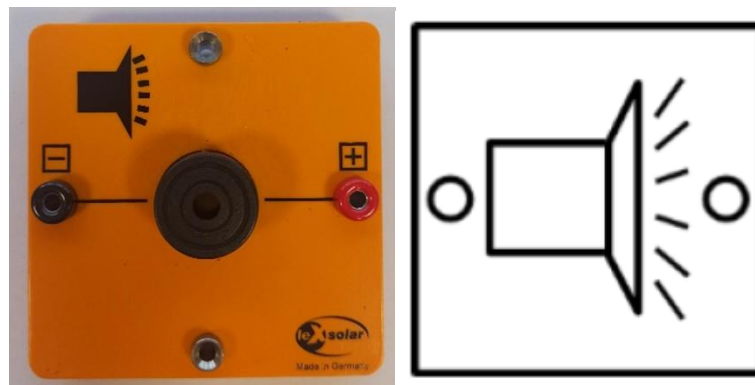


Рисунок 2.15 – Звуковий модуль

Модуль двигуна (рис. 2.16) містить двигун постійного струму, який обертається в певному напрямку в залежності від прикладеної напруги. Для його обертання потрібна мінімальна напруга 0,35 В. За допомогою синього пластикового диска можна з'єднати кольорові диски з модулем двигуна. Як показано на рисунку, є два затискачі, які тримають кольорові диски на місці. Можна проілюструвати оптичні ілюзії (адитивне змішування кольорів).



Рисунок 2.16 – Модуль двигуна без редуктора, комплект кольорових дисків

Модуль резистора (рис. 2.17) містить омичний резистор 33 Ом. Максимальна потужність розсіювання може досягати 2 Вт.

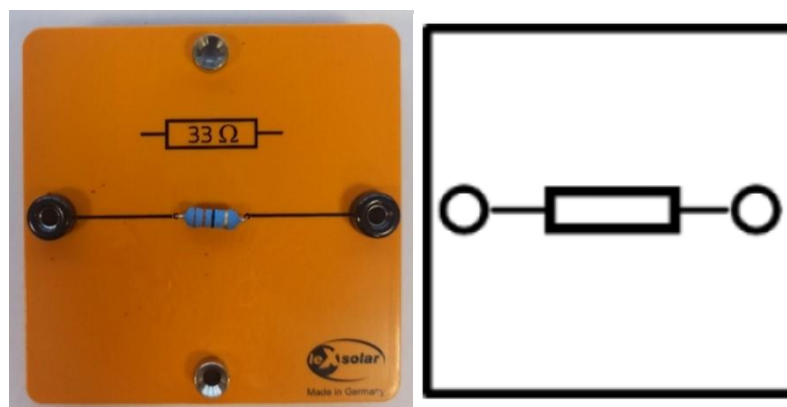


Рисунок 2.17 – Модуль резистора

2.2 Теоретичні дослідження потужності

Водна енергія (гідроенергія) – механічна енергія води водотоку (наприклад річки) з поздовжнім ухилом (падінням), яким вода рухається під дією власної маси, а також потенційна енергія води в штучних (водоймища) або природних (озера) водоймах, розташованих на певній висоті над рівнем моря [16].

ГЕС виробляє електроенергію в результаті перетворення енергії водного потоку. Ріки, спускаючись із гір і височин до морів і озер, мають постійно поновлювану природою енергію. У природних умовах ця енергія витрачається на подолання сил тертя при взаємодії потоку з руслом, на подолання порогів та інших перешкод, переміщення наносів.

На деяких річках самою природою створені зосереджені перепади рівнів – водоспади. У ряді випадків вони використовувалися для створення напорів ГЕС.

На ГЕС можна використовувати також перепад між рівнями води двох суміжних річок у місцях їх порівняно невеликого віддалення.

Енергія річки на ГЕС перетворюється в електроенергію при створенні на виділеній ділянці річки зосередженого перепаду (напору) [17].

Потік рідини характеризується рядом геометричних та гідравлічних параметрів, якими користуються при конструюванні русел та гідравлічному розрахунку потоків.

Середньою швидкістю потоку V , м/с у перерізі називається така однакова для всіх точок перерізу потоку швидкість руху речовини, при якій через цей переріз проходить та ж витрата, що і при дійсному розподілі швидкостей руху речовини (рис. 2.18).

Широке коло питань технічної механіки рідини вирішують методом гідравліки. Течію рідини подумки розбивають на ряд елементарних струминок, щоб вісь кожної з них була дотична до напрямку швидкості (рис. 2.19).

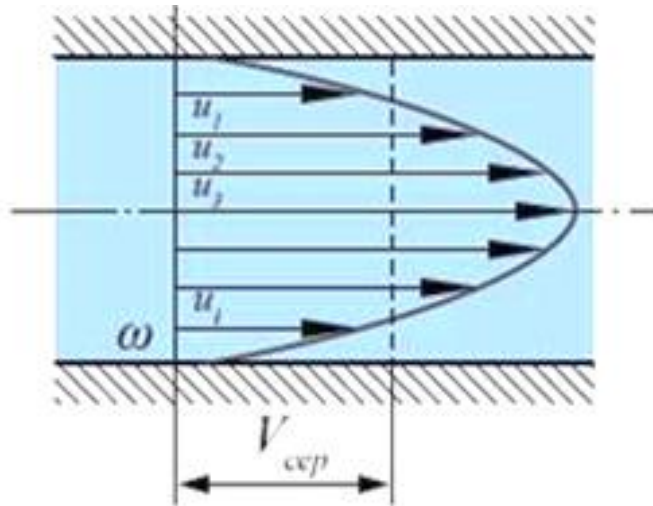


Рисунок 2.18 – Епюра швидкостей

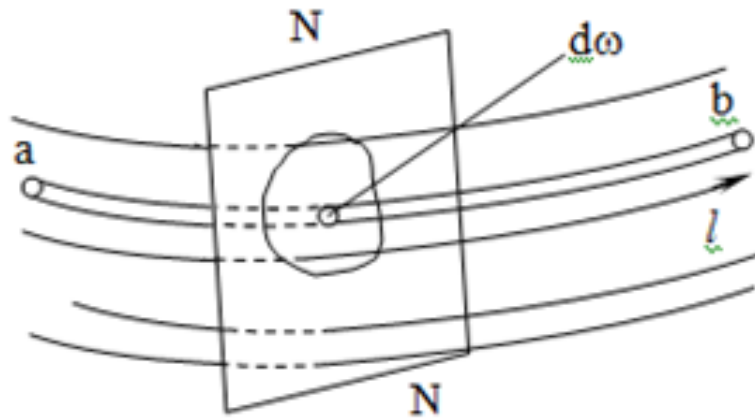


Рисунок 2.19 – Рух потоку рідини

Потім дійсну течію з різними швидкостями окремих струминок заміняють розрахунковою моделлю потоку, котрий рухається як одне суцільне ціле з сталою для всіх частинок в даному перерізі швидкістю. При такій схематизації течії швидкості і прискорення в напрямку, нормальному до основного руху, не враховуються. Для опису такої течії достатньо тільки однієї координати простору – відстані l вздовж вісі потоку від перерізу, що розглядається, відносно деякої початкової точки O .

Живим перерізом ω , m^2 називається площа поперечного перерізу потоку, яка нормальна до напрямку течії.

Для розрахунку витрати використовують значення середньої швидкості потоку як усередненої характеристики інтенсивності протікання речовини.

Витратою потоку Q , $\text{м}^3/\text{с}$ називається об'єм рідини, який протікає за одиницю часу через живий переріз потоку [17]:

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (2.1)$$

де W – об'єм рідини, м^3 , який протікає за час t , с через живий переріз потоку.

Середня швидкість потоку V , $\text{м}/\text{с}$, визначається за формулою [17]:

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (2.2)$$

Енергію водотоку за час t на виділеній ділянці ріки між перетинами 1-1 і 2-2 (рис. 2.20) можна визначити як різницю енергії потоку в цих перерізах на підставі рівняння Бернуллі [16]:

$$E_B = \rho \cdot g \cdot W \cdot (Z_1 - Z_2 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} - \frac{a_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} - \frac{a_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g}), \quad (2.3)$$

де E_B – енергія водотоку на виділеній ділянці, Дж; g – прискорення вільного падіння, $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$ (для водотоків із чистою прісною водою $\rho=1000 \text{ кг}/\text{м}^3$); W – обсяг стоку води, м^3 ; Z_1 і Z_2 – геометрична висота над площиною порівняння в перерізах 1-1 і 2-2, м; P_1 і P_2 – тиск у перерізах 1-1 і 2-2, Па; V_1 і V_2 – середня швидкість води в перерізах 1-1 і 2-2, $\text{м}/\text{с}$; a – коефіцієнт кінетичної енергії (Кориоліса).

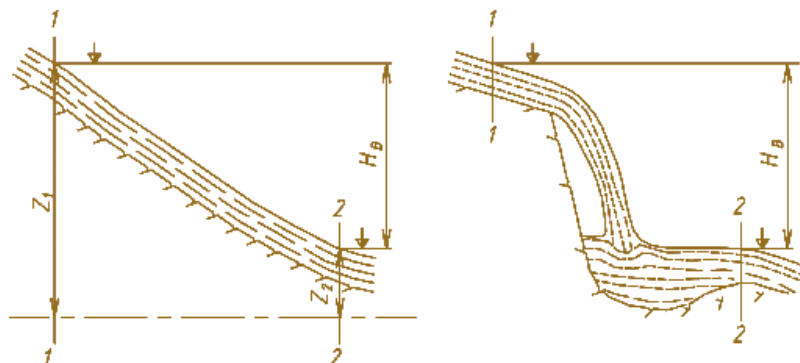


Рисунок 2.20 – Схеми природних водойм

З огляду на те, що в природних умовах різниця кінетичної енергії в перерізах 1-1 і 2-2 досить незначна, то нею можна знехтувати.

Тоді для водотоків із чистою прісною водою енергію й потужність водотоку можна визначити за формулами [16]:

$$E_B = \rho \cdot g \cdot W \cdot H_B, \quad (2.4)$$

$$P_B = \frac{E_B}{t} = \frac{\rho \cdot g \cdot W \cdot H_B}{t}, \quad (2.5)$$

де напір на виділеній ділянці $H_B = Z_1 - Z_2$ дорівнює різниці рівнів (падінню рівня) вільної поверхні водотоку на виділеній ділянці ріки, м; E_B – потенційна енергія, Дж; P_B – середня потужність водотоку за час t на виділеній ділянці, Вт.

2.3 Вимірювання залежності потужності турбін від параметрів потоку води

Схема установки для дослідження продуктивності різних типів турбін (турбіна Пелтона, поперечно-проточна турбіна, водяне колесо) при роботі з різноманітними імітаторами споживачів зображена на рис. 2.21.

Схема установки для дослідження потужності різних типів турбін (водяне колесо, поперечно-проточна турбіна, турбіна Пелтона) при роботі з резистивним навантаженням зображена на рис. 2.22.

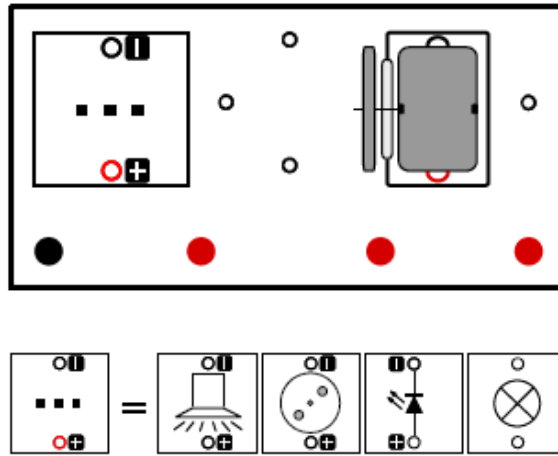


Рисунок 2.21 – Схема установки для дослідження продуктивності різних типів турбін при роботі з різноманітними імітаторами споживачів

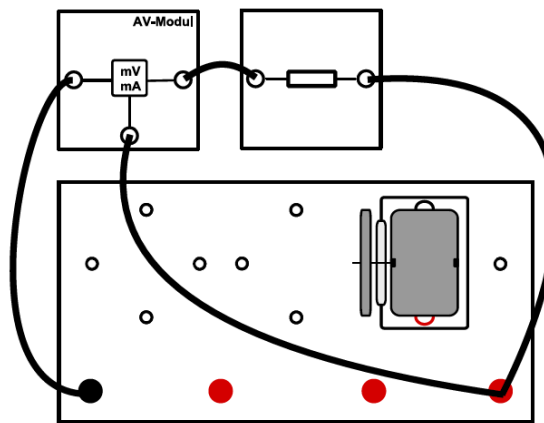


Рисунок 2.22 – Схема установки для дослідження потужності різних типів турбін

Перелік обладнання:

- водяне колесо, поперечна турбіна, турбіна Пелтона,
- водотурбінний комплекс,
- базова панель,
- модуль звукового сигналу,
- модуль двигуна,
- світлодіодний модуль,
- модуль лампочки.
- резистивний модуль,
- AV-модуль.

Вимірювання залежності потужності кожної з трьох турбін (зображені на рис. 2.23) від швидкості потоку та різниці рівнів води проводились по декілька разів. В таблицях 2.1 – 2.6 наведені усереднені значення потужностей. В додатку А наведені всі результати вимірювань потужностей гідротурбін. На діаграмах 2.1 – 2.6 проілюстровані графіки залежності потужності турбін.

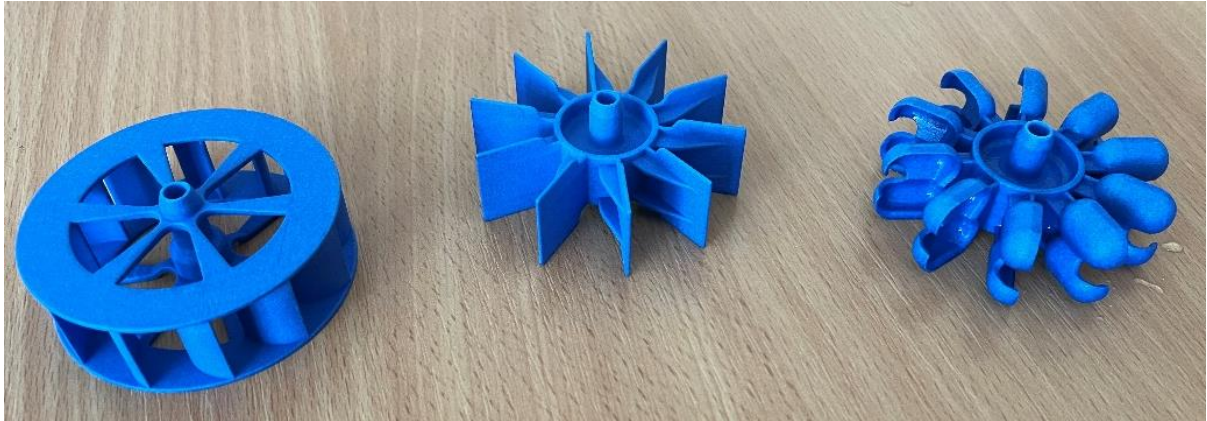


Рисунок 2.23 – Досліджувані гідротурбіни

На рис. 2.24 можна спостерігати процес вимірювання потужності гідротурбін.

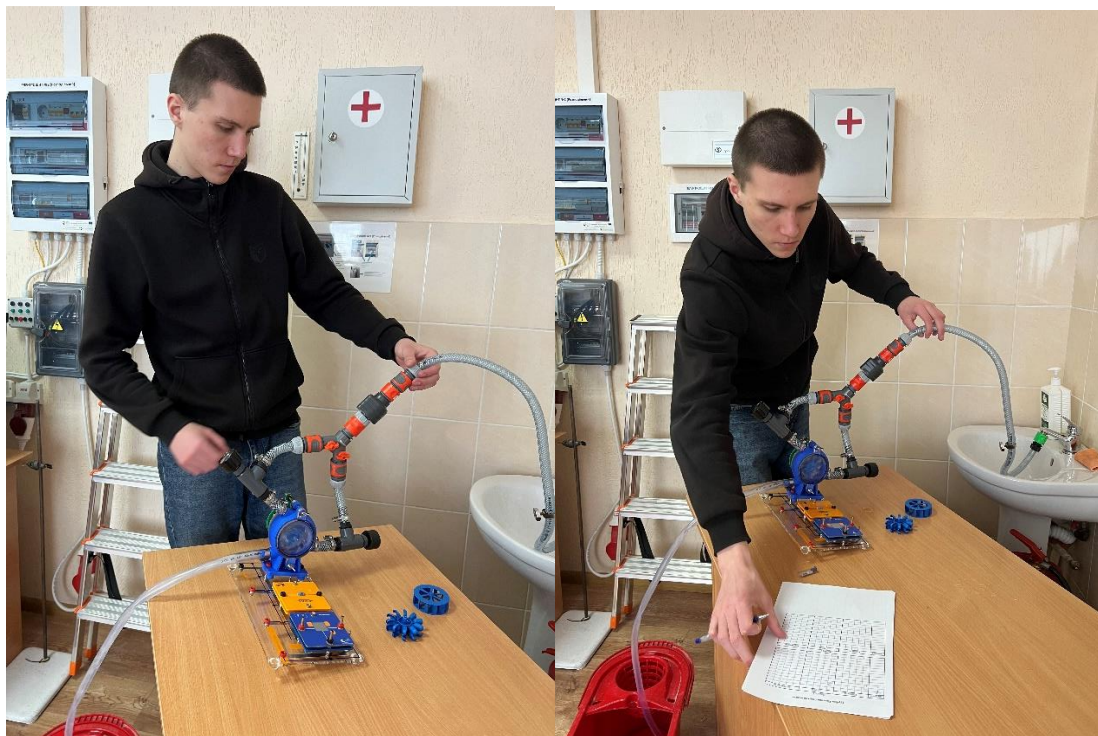


Рисунок 2.24 – Процес вимірювання потужності гідротурбін

2.3.1 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні турбіни Пелтона

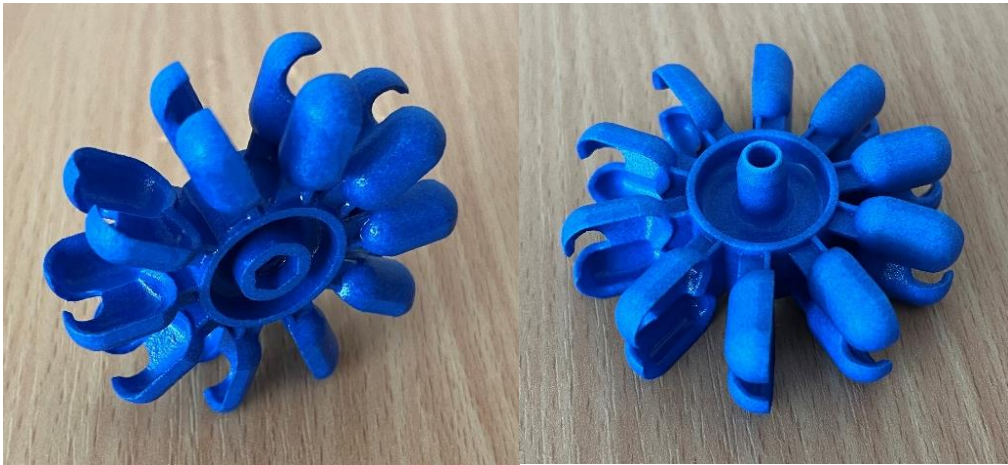
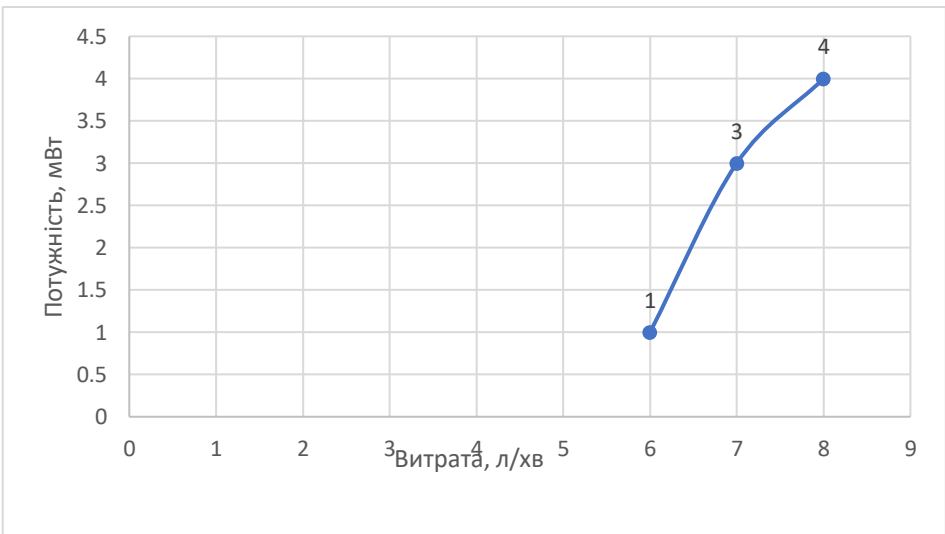


Рисунок 2.25 – Турбіна Пелтона

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання потужності турбіни Пелтона при верхній подачі води:

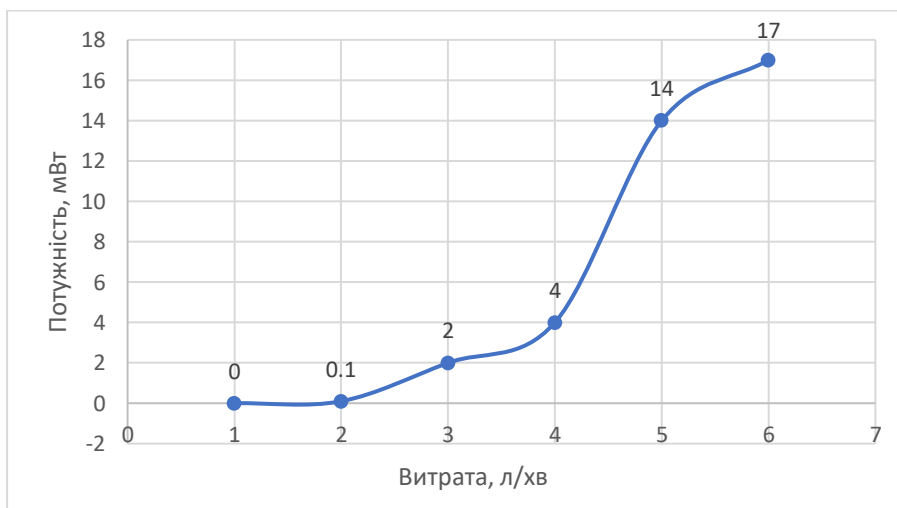
Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
8	0,044	0,102	0,004
7	0,034	0,074	0,003
6	0,016	0,04	0,001



Діаграма 2.1 – Графік залежності потужності турбіни Пелтона від витрати води при верхній подачі води

Таблиця 2.2 – Результати вимірювання потужності турбіни Пелтона
при нижній подачі води:

Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
6	0,061	0,273	0,017
5	0,08	0,173	0,014
4	0,04	0,092	0,004
3	0,028	0,065	0,002
2	0,006	0,018	0,0001
1	-0,003	0	0



Діаграма 2.2 – Графік залежності потужності турбіни Пелтона
від витрати води при нижній подачі води

2.3.2 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні поперечно-проточної турбіни

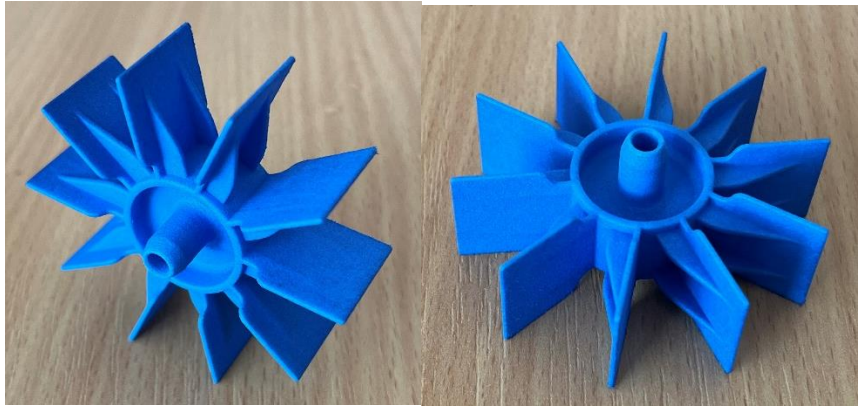
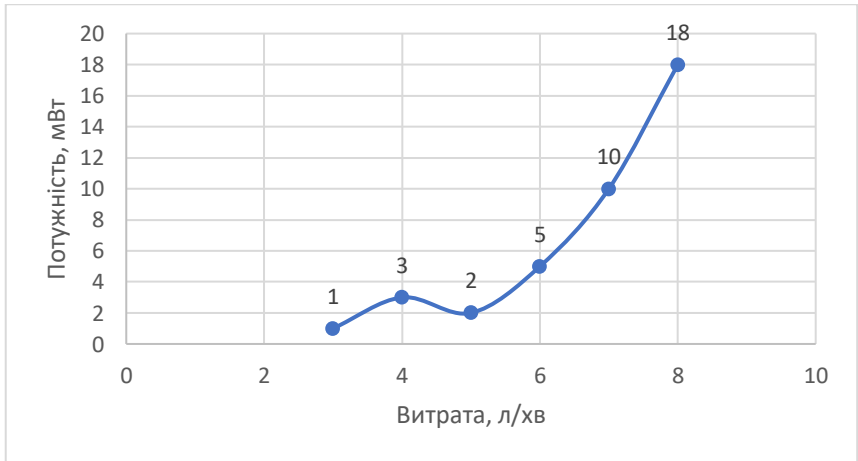


Рисунок 2.26 – Поперечно-проточна турбіна

Таблиця 2.3 – Результати вимірювання потужності поперечно-проточної турбіни при верхній подачі води:

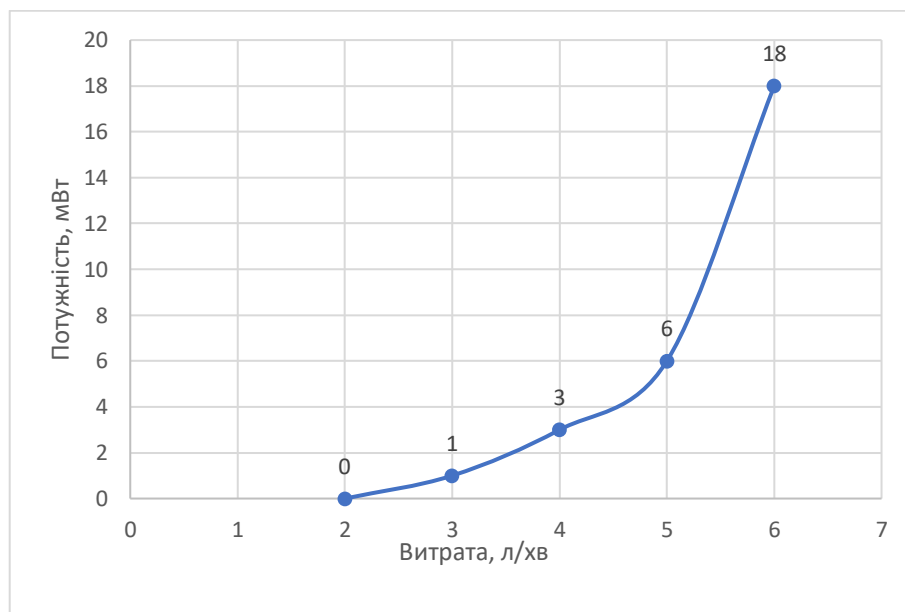
Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
8	0,09	0,2	0,018
7	0,069	0,15	0,01
6	0,048	0,11	0,005
5	0,033	0,07	0,002
4	0,035	0,085	0,003
3	0,02	0,045	0,001



Діаграма 2.3 – Графік залежності потужності поперечно-проточної турбіни від витрати води при верхній подачі води

Таблиця 2.4 – Результати вимірювання потужності поперечно-проточної турбіни при нижній подачі води:

Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
6	0,09	0,2	0,018
5	0,05	0,12	0,006
4	0,035	0,08	0,003
3	0,02	0,055	0,001
2	0	0,001	0



Діаграма 2.4 – Графік залежності потужності поперечно-проточної турбіни від витрати води при нижній подачі води

2.3.3 Дослідження залежності потужності гідроелектростанції при використанні водяного колеса

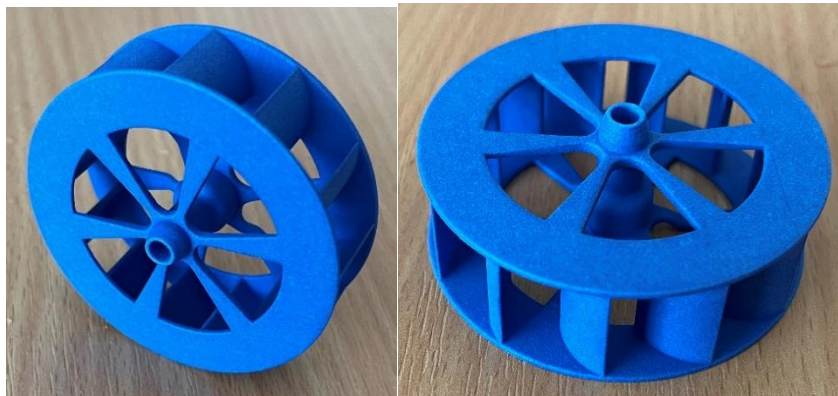
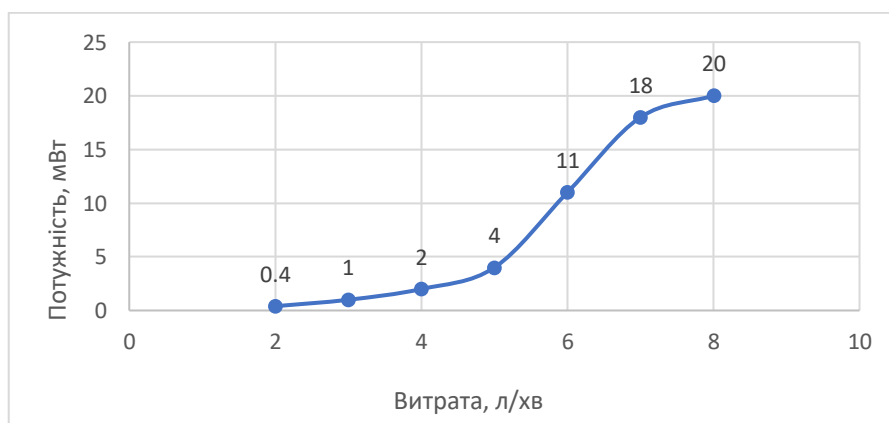


Рисунок 2.27 – Водяне колесо

Таблиця 2.5 – Результати вимірювання потужності водного колеса
при верхній подачі води:

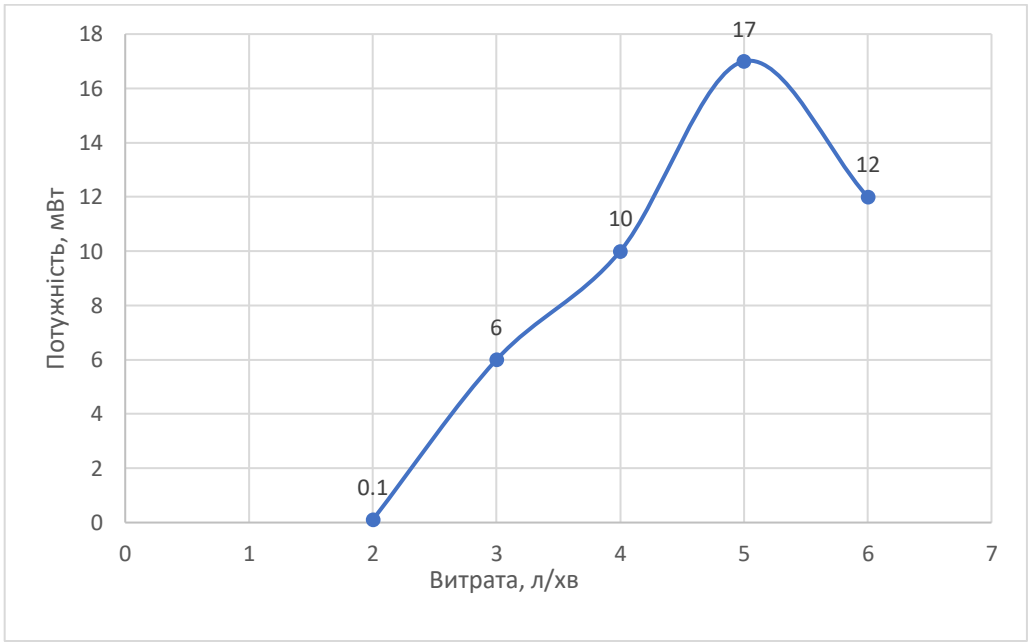
Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
8	0,09	0,22	0,02
7	0,09	0,2	0,018
6	0,07	0,16	0,011
5	0,04	0,095	0,004
4	0,03	0,08	0,002
3	0,02	0,06	0,001
2	0,01	0,04	0,0004



Діаграма 2.5 – Графік залежності потужності водяного колеса
від витрати води при верхній подачі води

Таблиця 2.6 – Результати вимірювання потужності водного колеса
при нижній подачі води:

Витрата, л/хв	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
6	0,05	0,24	0,012
5	0,085	0,2	0,017
4	0,065	0,15	0,01
3	0,05	0,11	0,006
2	0,005	0,02	0,0001



Діаграма 2.6 – Графік залежності потужності водяного колеса
від витрати води при нижній подачі води

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Проведені дослідження дозволили отримати детальні уявлення про залежність потужності гідроелектростанцій від швидкості потоку та різниці рівнів води, використовуючи лабораторну установку leXsolar-Hydropower. У ході експериментів було проаналізовано технічні характеристики та ефективність трьох типів гідротурбін: турбіни Пелтона, поперечно-проточної турбіни та водяного колеса.

Встановлено, що кожна з турбін має свої оптимальні параметри витрати води та висоти подачі, за яких досягається максимальна потужність. Зокрема:

- Турбіна Пелтона демонструє високу ефективність при використанні нижнього припливу води і вищих швидкостях потоку, що пояснюється її конструкційними особливостями, які дозволяють максимально використовувати кінетичну енергію води.
- Поперечно-проточна турбіна показує найкращі результати при середніх значеннях швидкості потоку та висоти подачі води, що робить її універсальним рішенням для різних умов експлуатації.
- Водяне колесо є найбільш ефективним при середніх швидкостях потоку за умови нижнього припливу води, та при високих швидкостях потоку за умови верхнього припливу води.

Дослідження, проведені на лабораторній установці, підтвердили, що механічна енергія води може ефективно перетворюватися на електричну енергію за допомогою відповідних гідротурбін. Було визначено ключові гідравлічні та геометричні параметри, які впливають на ефективність роботи гідроелектростанцій. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації роботи існуючих ГЕС та проектування нових установок з урахуванням специфічних умов кожного конкретного випадку.

Загалом, дослідження показали, що правильний вибір типу турбіни та її параметрів може суттєво підвищити ефективність гідроелектростанцій, що є важливим для розвитку стійкої та екологічно чистої енергетики.

РОЗДІЛ 3

РОЗТАШУВАННЯ МІНІ ГЕС ТА ПІДБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1 Критерії місця розташування міні ГЕС

Для того, щоб обрати місце розташування гідроелектростанції, спочатку потрібно звертати увагу на декілька критеріїв: площа затоплюваних земель, розміри електростанції, використання потужності, задоволення попиту, відстань до споживача, вартість проекту. Споруда гідроелектростанції повинна забезпечувати високу ефективність агрегатів, що підтримують стабільний графік виробництва електроенергії, а також розташовуватися поблизу об'єктів інфраструктури, оскільки через її невелику потужність недоцільно передавати електроенергію на великі відстані. Крім того, місцевість повинна мати відповідний рельєф для будівництва споруди та мінімальний екологічний вплив на навколишнє середовище. Проект повинен містити детальний економічний аналіз, включаючи всі можливі витрати та терміни окупності.

На основі аналізу критеріїв, гідрологічних показників річок Івано-Франківської області, встановлено, що для проектування і будівництва міні ГЕС добре підходить р. Бистриця-Солотвинська. Річка протікає через м. Івано-Франківськ, а отже, міні гідроелектростанція може забезпечити місто додатковими джерелами електроенергії, що зменшить залежність від зовнішніх постачальників та підвищить енергетичну безпеку.

Річка Бистриця-Солотвинська – річка в Івано-Франківському районі Івано-Франківської області України, лівий витік р. Бистриці. Бере початок у Горганах, поблизу підніжжя г. Сивуля Велика. Неподалік від с. Вовчинця, що біля м. Івано-Франківська, зливається з р. Бистрицею Надвірнянською та утворює р. Бистрицю. Довжина річки – 82 км, площа басейну — 795 км². [18]

Тече переважно в північно-східному напрямку. У горах, до с. Порогів, річкова долина має V-подібну форму, нижче розширюється та поблизу селища

Солотвина сягає 2 км завширшки. У межах Бистрицької улоговини долина широка; лівий берег високий, крутий, порізаний ярами й долинами лівих приток, здебільшого вкритий лісом; правий — пологий, невисокий, зайнятий сільськогосподарськими угіддями. Русло звивисте, дуже розгалужене. У верхів'ї розташовані водоспади й пороги. Похил річки — 12 м/км. Живиться річка переважно від дощів. Згідно зі спостереженнями на гідрологічному посту в м. Івано-Франківську, середня витрата води становить $11,45 \text{ м}^3/\text{с}$. Мінералізація води — близько 300 мг/дм^3 . Глибина річки — 1–1,5 м. [18]

Основні притоки:

- ліві — Саджавка (найбільша), Посічанка;
- праві — Лукавець, Манявка, Плоска, Радчанка, Стебник.

На рис. 3.1 можна спостерігати місця можливого розташування міні гідроелектростанції на р. Бистриця-Солотвинська в межах м. Івано-Франківська.

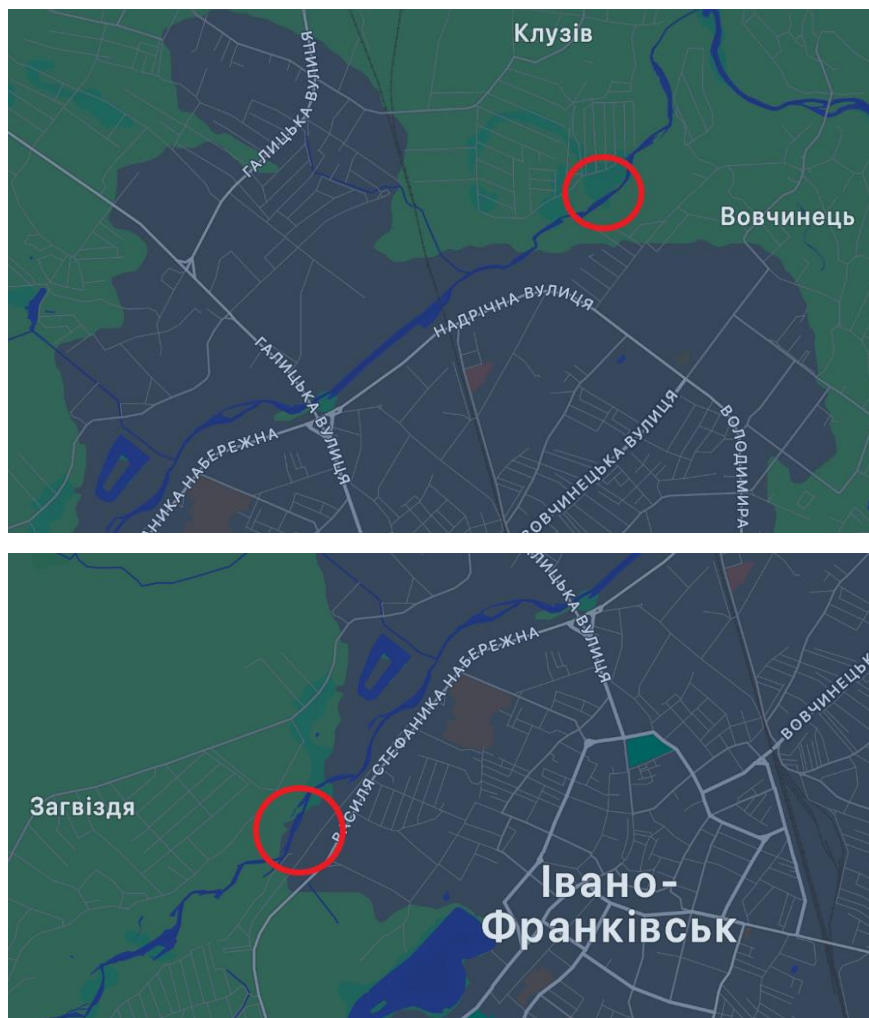


Рисунок 3.1 – Місце можливого розташування міні-ГЕС [19]

3.2 Вибір гідротурбіни

Для вибору типу гідротурбіни використовуються дані річки Бистриця-Солотвинська. Показники наступні:

- Середньорічна витрата води (Q) = 11,45 м³/с;
- Напір води (H) = 12 м.

Під дані параметри річки найкраще підходить поперечно-проточна турбіна, адже вона найефективніше працює при середньорічній витраті води від 5 до 50 м³/с та напору води від декількох метрів до 20-30 м.

Проаналізувавши гідроелектростанції, які встановлено на річках, параметри яких приблизно відповідають параметрам р. Бистриці-Солотвинської, можна стверджувати, що приблизна потужність проекрованої гідроелектростанції знаходитиметься в межах 400 кВт·год чистої електроенергії.

3.3 Оцінка екологічного впливу

Гідрологічні зміни – будівництво міні гідроелектростанції неминуче змінює гідрологічний режим річки. Під час спорудження гідроелектростанції або інших водозабірних споруд змінюється швидкість течії, рівень води та об'єм води, що проходить через турбіни. Ці зміни можуть призвести до ряду екологічних наслідків:

- Зміна рівня води – може спричинити затоплення прилеглих територій, зміну берегової лінії та вплив на прибережну рослинність.
- Зниження швидкості течії нижче за греблю – може призвести до осідання осадов, що впливає на водну екосистему.
- Гідроелектростанції можуть змінювати природні сезонні коливання рівня води – це може вплинути на рослинність і тваринний світ, пристосований до цих змін.

Вплив на біорізноманіття – це один із найбільш значних екологічних аспектів спорудження міні гідроелектростанцій

- Будівництво греблі може стати бар'єром для міграції риб, що є критичним для деяких видів, особливо тих, які мігрують для розмноження;
- Зміни в гідрологічному режимі можуть вплинути на водорості та інші водні рослини, а також на безхребетних, які є важливими компонентами екосистеми;
- Затоплення та зміна рівня води – це може вплинути на прибережну рослинність і тварин, що використовують ці зони для проживання або харчування.

Якість води – зміна гідрологічного режиму та будівництво гідроспоруд можуть вплинути на якість води в річці:

- Повільна течія вище за греблю може призвести до підвищення температури води, що негативно впливає на певні види риб та інших водних організмів;
- Зниження швидкості течії може зменшити аерацію води, що впливає на рівень розчиненого кисню, необхідного для водних організмів;
- Будівництво та експлуатація ГЕС можуть призвести до тимчасового або постійного забруднення води, наприклад, через витік паливно-мастильних матеріалів, будівельного сміття та інших речовин.

Вплив на земельні ресурси – будівництво міні ГЕС вимагає певних земельних ресурсів, що може вплинути на місцевий ландшафт та землекористування:

- Підняття рівня води може призвести до затоплення сільськогосподарських угідь, лісових масивів та інших територій, що мають екологічну та економічну цінність;
- Зміни в течії річки можуть призвести до підвищеної ерозії берегів, що впливає на стабільність ландшафту та якість води;
- Будівництво гідроспоруд змінює природний ландшафт, що може вплинути на місцеву флору та фауну, а також на естетичну цінність регіону;

Для зменшення негативних екологічних впливів спорудження міні гідроелектростанції на річці необхідно вжити низку заходів:

- Встановлення рибопропускних споруд допоможе забезпечити міграцію риб та зменшити негативний вплив на їх популяції;
- Постійний екологічний моніторинг якості води, стану екосистем та гідрологічного режиму дозволить оперативно виявляти та усувати негативні впливи;
- Перед початком будівництва необхідно провести комплексні екологічні дослідження, щоб визначити потенційні ризики та розробити стратегії їх мінімізації;
- Використання сучасних екологічно чистих технологій, які знижують забруднення води та мінімізують втручання в природні процеси, сприятиме збереженню екосистем.

3.4 Оцінка соціального впливу

Економічні вигоди – одним із найбільш очевидних позитивних аспектів будівництва міні ГЕС є створення нових робочих місць. Під час будівництва станції залучаються численні робітники, інженери та спеціалісти, що сприяє зростанню зайнятості в регіоні. Крім того, експлуатація гідроелектростанції також потребує персоналу для обслуговування та управління станцією, що забезпечує стабільну зайнятість для місцевого населення.

Розвиток місцевої економіки – спорудження міні гідроелектростанції сприяє розвитку місцевої економіки через залучення інвестицій та підвищення ділової активності. Постачальники будівельних матеріалів, транспортні компанії, готелі та ресторани отримуватимуть додаткові замовлення, що стимулюватиме економічний ріст. Крім того, виробництво електроенергії може забезпечити стабільніші ціни на енергію для місцевого населення а також для місцевих підприємств, що сприятиме їхньому розвитку.

Енергетична незалежність – будівництво міні гідроелектростанції сприятиме підвищенню енергетичної незалежності регіону. Виробництво електроенергії на місцевому рівні зменшує залежність від зовнішніх постачальників та підвищує стабільність енергопостачання. Це особливо важливо для промислових підприємств та критично важливих об'єктів, таких як лікарні та освітні установи.

Вплив на місцеві громади – будівництво гідроелектростанцій може вимагати переміщення населення з територій, що підлягають затопленню. Це може сприяти соціальному напруженню та незадоволенню серед мешканців. Необхідно забезпечити справедливую компенсацію за втрату майна та допомогу в переселенні, щоб мінімізувати негативні наслідки для постраждалих громад.

Зміна способу життя – проектування та будівництво гідроелектростанції можуть змінити спосіб життя місцевих жителів. Традиційні види діяльності, такі як рибальство або сільське господарство, можуть бути порушені через зміну гідрологічного режиму та затоплення земель. Важливо забезпечити підтримку та навчання для місцевих жителів, щоб вони могли адаптуватися до нових умов та знайти альтернативні джерела доходу.

Соціальна інфраструктура – будівництво ГЕС може сприяти розвитку соціальної інфраструктури в регіоні. Наприклад, будівництво нових доріг, мостів та інших об'єктів інфраструктури може покращити якість життя місцевого населення. Також можливе фінансування соціальних проектів, таких як школи, лікарні та культурні заклади, за рахунок коштів від реалізації енергетичних проектів.

Туризм та рекреація – розвиток інфраструктури для міні гідроелектростанції може сприяти розвитку туризму в регіоні. Створення нових рекреаційних зон, туристичних маршрутів та місць відпочинку може привабити туристів та сприяти зростанню туристичної галузі. Водні об'єкти, створені в результаті будівництва ГЕС, можуть стати привабливими місцями для відпочинку та водних видів спорту.

Вплив на естетичну цінність ландшафту – водночас будівництво гідроелектростанцій може змінити зовнішній вигляд ландшафту, що може

негативно вплинути на привабливість регіону для туристів. Важливо враховувати естетичний вплив та розробляти проекти таким чином, щоб мінімізувати негативні зміни та зберегти природну красу місцевості.

Для зменшення негативних соціальних впливів спорудження міні ГЕС необхідно вжити низку заходів:

- Консультації з місцевими громадами – залучення місцевих громад до процесу планування та прийняття рішень є важливим аспектом для мінімізації соціальних конфліктів. Відкриті консультації та обговорення проектів з місцевими жителями дозволяють врахувати їхні потреби та побажання, а також забезпечити підтримку з боку населення;
- Справедлива компенсація – забезпечення справедливої компенсації за втрату майна, земель та засобів до існування є критичним для зменшення негативного впливу на місцеві громади. Це включає як фінансові виплати, так і допомогу в переселенні та адаптації до нових умов життя;
- Навчання та підтримка – організація навчальних програм та підтримка місцевого населення у пошуку нових джерел доходу є важливими для зменшення соціального напруження. Це може включати професійне навчання, підтримку у створенні малого бізнесу та розвиток альтернативних видів діяльності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Проектування та будівництво міні гідроелектростанції на річці Бистриця-Солотвинська в Івано-Франківській області є важливим кроком до забезпечення регіону додатковими джерелами енергії. Ретельний аналіз місця розташування та основних критеріїв, таких як площа затоплюваних земель, розміри електростанції, використання потужності та задоволення попиту, дозволить визначити оптимальні умови для спорудження ГЕС. Річка Бистриця-Солотвинська, з її відповідним гідрологічним режимом, може виявитись ідеальним місцем для реалізації цього проекту.

Вибір поперечно-проточних турбін, які найкраще відповідають характеристикам річки, забезпечить ефективну та стабільну роботу станції, забезпечуючи виробництво чистої електроенергії потужністю до 400 кВт·год. Проект передбачає не лише технічні аспекти, але й враховує екологічні та соціальні впливи, що є важливим фактором для сталого розвитку регіону.

Екологічна оцінка вказує на потенційні зміни в гідрологічному режимі річки, що можуть вплинути на місцеві екосистеми, якість води та біорізноманіття. Проте, з урахуванням сучасних технологій та заходів з мінімізації негативних впливів, таких як встановлення рибопропускних споруд, екологічний моніторинг та використання екологічно чистих технологій, можна досягти балансу між виробництвом електроенергії та збереженням природного середовища.

Соціальний аспект проекту також має значний вплив на місцеву громаду. Будівництво міні ГЕС сприятиме створенню нових робочих місць, розвитку місцевої економіки, підвищенню енергетичної незалежності та покращенню соціальної інфраструктури. Водночас, можливі соціальні виклики, такі як необхідність переселення населення та зміна традиційних способів життя, потребують справедливої компенсації та підтримки з боку місцевої влади та інвесторів. Важливо забезпечити активну участь місцевих громад у процесі

планування та прийняття рішень, щоб мінімізувати соціальні конфлікти та забезпечити підтримку проекту.

Загалом, спорудження міні гідроелектростанції на річці Бистриця-Солотвинська є перспективним проектом, що має потенціал для забезпечення регіону додатковими джерелами електроенергії, стимулювання економічного розвитку та покращення якості життя місцевого населення. Важливо дотримуватися комплексного підходу до реалізації проекту, враховуючи технічні, екологічні та соціальні аспекти, щоб забезпечити стале та гармонійне співіснування людини та природи.

ВИСНОВКИ

Після виконання бакалаврської роботи можна точно сказати, що гідроенергетика є однією з найбільш перспективних галузей енергетики, що сприяє сталому розвитку економіки та забезпечує екологічно чисту енергію. Протягом роботи було досліджено сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики в Україні, а також проведено глибокий аналіз будови і принципу роботи гідроелектростанцій.

Розвиток гідроенергетики є надзвичайно важливим для України з огляду на значний потенціал гідроресурсів країни. Сучасний стан гідроенергетики показує, що, незважаючи на деякі проблеми, такі як зношеність обладнання та екологічні виклики, існують значні перспективи для розвитку галузі. Це підтверджується як національними, так і міжнародними тенденціями у сфері відновлюваної енергетики.

Аналіз сучасного стану гідроенергетики в Україні виявив наявність значних ресурсів для будівництва нових гідроелектростанцій та модернізації існуючих. Водночас, розвиток гідроенергетики може значно зменшити залежність країни від імпорту енергоносіїв, покращити екологічний стан регіонів та сприяти економічному зростанню.

Розуміння будови та принципу роботи гідроелектростанції є ключовим для ефективного проектування та експлуатації гідроенергетичних об'єктів. Основні компоненти гідроелектростанції включають водосховища, гідротурбіни, генератори та систему керування. Правильний вибір і розміщення цих компонентів є вирішальним для забезпечення високої ефективності та надійності роботи станцій.

У роботі проведено детальні дослідження залежності потужності гідроелектростанцій від різних параметрів, таких як швидкість потоку води та різниця рівнів води. Експериментальні дослідження підтвердили, що ефективність гідротурбін значною мірою залежить від цих факторів. Були проведені вимірювання для різних типів турбін, включаючи турбіну Пелтона,

поперечно-проточну турбіну та водяне колесо. В результаті оцінки водного потенціалу р. Бистриці-Солотвинської було встановлено, що при використанні поперечно-проточної турбіни можна буде отримувати приблизно 400 кВт·год чистої електроенергії.

У роботі також оцінено екологічний та соціальний вплив розміщення міні гідроелектростанції, що є важливим для забезпечення сталого розвитку регіону.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що розвиток малої гідроенергетики в Україні має великий потенціал та може значно сприяти енергетичній незалежності країни. Важливо продовжувати інвестувати у дослідження та розвиток нових технологій, модернізацію існуючого обладнання та забезпечення екологічної безпеки проектів. Стратегічне планування та залучення інвестицій у галузь гідроенергетики можуть стати ключовими факторами успішного розвитку енергетичного сектору України.

Детальне вивчення та впровадження досліджених методів і технологій сприятимуть підвищенню ефективності гідроелектростанцій, забезпеченню стабільного постачання електроенергії та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Розвиток гідроенергетики в Україні є важливим кроком до сталого майбутнього та економічного процвітання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карта гідроелектростанцій України. URL:
<https://eimg.pravda.com/images/doc/6/8/6887c4b-ges-maps.jpg>.
2. Дністровська ГАЕС. URL:
https://zaxid.net/resources/photos/news/1200x675_DIR/202405/1585187.jpg?202405132550.
3. Дністровське водосховище. URL:
https://uhe.gov.ua/sites/default/files/styles/560x560_max/public/2019-12/3992-2242max%E2%80%93%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D1%96%D1%8F.jpg?itok=T9zaf3VF.
4. Ташлицька ГАЕС. URL: <https://izbirkom-media-bucket.s3.amazonaws.com/cache/4e/7c/4e7c207e74b13a254bfea293295a07c4.jpg>.
5. Сучасний стан та перспективи розвитку гідроенергетики України. URL:
<https://ukurier.gov.ua/uk/articles/gidroenergetika-ta-yiyi-rol-u-perebudovi-/>.
6. Водосховище. URL: https://vodaif.gov.ua/wp-content/uploads/2021/08/214562278_2987502044803660_5748766198570053896_n.jpg.
7. Гребля. URL:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/07/Pavodok%2C_Zhigulevskaya_GES.JPG/1200px-Pavodok%2C_Zhigulevskaya_GES.JPG.
8. Водозабірна споруда. URL:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Ohzuchi_dam.jpg/220px-Ohzuchi_dam.jpg.
9. Гідротурбіна. URL: https://alternative-energy.com.ua/wp-content/uploads/2020/09/hydro_turbine_pelton_01_big-1.jpg.
10. Генератор ГЕС. URL:
https://lh6.googleusercontent.com/proxy/uQ7EtEvU9WocYJiAQhYcIgqC2EZGOI5DZMJms9UzKkbTkq8R3o_o3l712pXPbCzoXb9KEAEul9IE-xBo5ck0ld5lMC1da_2gWGtSiyixVGtAfPDjoF8JbAnw0kGzurwjMF51Ax79.

- 11.Трансформатор ГЕС. URL:
https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/serednodniprovska-ges-otrimala-noviy-suchasniy-transformator.
- 12.Гідроелектростанційна споруда ГЕС. URL:
https://images.unian.net/photos/2022_10/thumb_files/800_0_1666351649-4863.jpg?r=164057.
- 13.Будова гідроелектростанції. URL: https://corelamps.com/wp-content/uploads/2024/05/1280px-Hydroelectric_dam-ru.svg_-2-1024x694.png.
- 14.Будова гідроакумуючої електростанції. URL:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/56/Raccoon_Mountain_Pumped-Storage_Plant-uk.png/1200px-Raccoon_Mountain_Pumped-Storage_Plant-uk.png.
- 15.leXsolar-Hydropower Ready-to-go. Teacher's manual. Retrieved from:
<https://lexsolar.com/products/id-1219.html>.
16. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики / Базеєв Є.Т. та ін. Київ, 2011. 400 с.
- 17.Середня швидкість потоку. URL: https://wiki.tntu.edu.ua/Середня_швидкість_потоку.
- 18.Бистриця-Солотвинська. URL: https://vue.gov.ua/Бистриця_Солотвинська
- 19.Супутникові знімки м. Івано-Франківська. URL:
<https://www.google.com/maps/>.
- 20.Гідроенергетика. Держенергоефективності України. Офіційний сайт. URL:
<https://saee.gov.ua/uk/ae/hydroenergy>.
- 21.Самойленко Є. Г. Основи проектування гідроенергетичних вузлів: підручник. Запоріжжя, ЗДІА, 2011. 388 с.
- 22.Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Том II. Київ. 2018. 145 с.
- 23.Самченко О. Мала гідроенергетика України. Т. I. Аналітичний огляд. 2018.
- 24.Ващишак І.Р. Оцінювання енергетичної ефективності коловоротної мініГЕС. Прикладні науково-технічні дослідження: IV міжнар. наук.-практ. конф., Івано-Франківськ, 1-3 квітня 2020 р.: зб. матер. – с. 87-88.

- 25.Горбачова Л. О. Сучасний внутрішньорічний розподіл водного стоку річок України. Український географічний журнал. 2015. № 3. С. 16-23.
- 26.Ващишак І.Р. Проектування гравітаційно-коловоротних ГЕС для малих річок Прикарпаття. Науковий вісник НЛТУ. 2021. № 31(2). С.93-97.
- 27.Гідроенергетика та її роль у перебудові економіки України. URL: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/gidroenergetika-ta-ii-rol-u-perebudovi-ekonomiki-ukraini.
- 28.Гідроенергетика. Держенергоефективності України. Офіційний сайт. URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/hydroenergy>.
- 29.Середня швидкість потоку. URL: [https://wiki.tntu.edu.ua/Середня швидкість потоку](https://wiki.tntu.edu.ua/Середня_швидкість_потоку).
- 30.Атлас річок України. URL: <https://river.land.kiev.ua/>.

Додаток А

Результати вимірювання потужності різних типів турбін

Таблиця А1 – Потужність турбіни Пелтона при верхній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
8	0,04	0,044	0,044	0,096	0,102	0,103	0,038	0,004	0,0042
7	0,033	0,034	0,04	0,073	0,074	0,09	0,002	0,003	0,0036
6	0,02	0,016	0,018	0,03	0,04	0,05	0,001	0,001	0,001

Таблиця А2 – Потужність турбіни Пелтона при нижній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
6	0,06	0,061	0,065	0,271	0,273	0,277	0,016	0,017	0,018
5	0,07	0,08	0,09	0,17	0,173	0,175	0,012	0,014	0,016
4	0,05	0,04	0,04	0,09	0,092	0,087	0,005	0,004	0,003
3	0,026	0,028	0,029	0,064	0,065	0,066	0,002	0,002	0,002
2	0,58	0,06	0,061	0,017	0,018	0,019	0,0001	0,0001	0,0001

Таблиця А3 – Потужність поперечно-проточної турбіни
при верхній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
8	0,1	0,09	0,08	0,19	0,2	0,21	0,019	0,018	0,017
7	0,067	0,069	0,068	0,14	0,15	0,15	0,01	0,01	0,01
6	0,046	0,048	0,05	0,1	0,11	0,12	0,005	0,005	0,006
5	0,032	0,033	0,031	0,068	0,07	0,069	0,002	0,002	0,002
4	0,03	0,035	0,04	0,07	0,085	0,1	0,002	0,003	0,004
3	0,02	0,02	0,03	0,047	0,045	0,049	0,001	0,001	0,001

Таблиця А4 – Потужність поперечно-проточної турбіни
при нижній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
6	0,08	0,09	0,1	0,21	0,2	0,19	0,017	0,018	0,019
5	0,05	0,05	0,048	0,1	0,12	0,11	0,005	0,006	0,006
4	0,04	0,035	0,031	0,11	0,08	0,07	0,004	0,003	0,002
3	0,03	0,02	0,02	0,067	0,055	0,052	0,002	0,001	0,001

Таблиця А5 – Потужність водяного колеса при верхній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
8	0,09	0,09	0,1	0,24	0,22	0,21	0,02	0,02	0,02
7	0,08	0,09	0,9	0,02	0,2	0,22	0,016	0,018	0,02
6	0,07	0,07	0,06	0,15	0,16	0,18	0,011	0,011	0,011
5	0,04	0,04	0,04	0,093	0,095	0,096	0,004	0,004	0,004
4	0,029	0,03	0,031	0,082	0,08	0,077	0,002	0,002	0,002
3	0,021	0,02	0,019	0,058	0,06	0,062	0,001	0,001	0,001
2	0,011	0,01	0,01	0,04	0,04	0,05	0,0004	0,0004	0,0005

Таблиця А6 – Потужність водяного колеса при нижній подачі води

Витрата, л/хв	Напруга, В			Струм, А			Потужність, Вт		
6	0,06	0,05	0,04	0,18	0,24	0,33	0,011	0,012	0,013
5	0,084	0,085	0,086	0,18	0,2	0,22	0,015	0,017	0,019
4	0,063	0,065	0,071	0,16	0,15	0,14	0,01	0,01	0,01
3	0,06	0,05	0,05	0,1	0,11	0,1	0,006	0,006	0,005
2	0,004	0,005	0,006	0,02	0,02	0,02	0,0001	0,0001	0,0001