

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електропобутова техніка

## Розробка лабораторної установки

### побутової мініГЕС


Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу група ЕТ-21

  
Підпис


Мороз В.В.  
Ініціали, прізвище

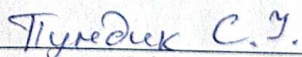
Керівник

  
Підпис, дата


старший викладач  
Лісевич С.П.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

  
\_\_\_\_\_ .2025 р.  
2 . 06

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

**Мороз Віталій Вікторович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка лабораторної установки побутової мініГЕС**

Керівник роботи **Лісевич С.П., старший викладач**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **прототип турбін для мініГЕС, технологічні та технічні характеристики турбін, методики вимірювань та обрахунків параметрів роботи мініГЕС.**

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

1 Аналіз сучасного стану технологій та технічних рішень мініГЕС

2 Розробка конструкції лабораторної установки побутової мініГЕС

3 Моделювання, виготовлення та проведення вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС

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

**Аркуш 1.** Види турбін та стендів для дослідження елементів мініГЕС. Документ оглядовий. (A1). **Аркуш 2** Технологічна схема роботи мініГЕС. Документ ілюстраційний. (A1). **Аркуш 3.** Лабораторна установка побутової мініГЕС. Схема структурна. (A2). **Аркуш 4.** Лабораторна установка побутової мініГЕС. Схема гідравлічна (A2). **Аркуш 5.** Лабораторна установка побутової мініГЕС. Схема електрична (A2). **Аркуш 6** Турбіна Френсіса для установки побутової МініГЕС. Вид загальний. (A1). **Аркуш 7.** Лабораторна установка побутової мініГЕС. Габаритне креслення (A1).

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи   | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|--|-------------------------------|----------|
| 1 Аналіз сучасного стану технологій та технічних рішень мініГЕС                                  | 05.05.25 р.                   |          |
| 2 Розробка конструкції лабораторної установки побутової мініГЕС                                  | 20.05.25 р.                   |          |
| 3 Моделювання, виготовлення та проведення вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС | 10.06.25 р.                   |          |

Студент

Підпис



Мороз В.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис



Лісевич С.П.  
Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Мороз Віталій Вікторович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка лабораторної установки побутової мініГЕС
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента \_\_\_\_\_
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень \_\_\_ арк., сторінок записки \_\_\_

5. В даній кваліфікаційній роботі поставлено завдання з розробка лабораторного установ-ки для дослідження параметрів роботи мініГЕС з метою вивчення гідравлічних, механічних та електричних характеристик системи, а також відпрацювання методики вимірювання ефективності перетворення енергії води у електричну.

В першому розділі зроблено аналіз перспектив використання мініГЕС в промисловості та побуті. Розглянуто типи турбін (Пелтона, Френсіса, Каплана, осьові, шнекові), які потрібно вибирати залежно від умов: напору, витрати води та необхідної потужності. Приведено основні параметри ефективності мініГЕС і дано рекомендацію про їх поєднання для забезпечення стабільної роботи мініГЕС.

В другому розділі розроблена структурна схема, гідравлічна схему, конструкція якої дозволяє змінювати витрату та напір води, моделюючи різні гідрологічні умови. Розроблено електричну схему, яка дає змогу аналізувати характеристики перетворення гідравлічної енергії в електричну. Зроблено моделювання елементів лабораторної установки, зокрема турбіну. Це дозволило оптимізувати просторову компоновку і забезпечити відповідність конструкції вимогам надійності та ергономіки. Зроблено модель міні-ГЕС, яка дає змогу змінювати параметри гідравлічного потоку та досліджувати роботу різних типів турбін та генераторів.

В третьому розділі розроблено методику для проведення вимірювань. Дані вимірювань, розрахунків та приведених графіків залежності гідравлічних та енергетичних параметрів дозволяють оцінити вплив гідравлічних та електричних параметрів на ефективність роботи міні-ГЕС.

Підпис студента \_\_\_\_\_  
« 2 » 06 20 25 р.

### РІШЕННЯ ЕК

Протокол 6 від « 26 » 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 4,5/8

Рекомендації ЕК впровадження у навчальний процес



Особливі відмітки - \_\_\_\_\_

Технічний секретар \_\_\_\_\_

« 26 » 06 20 25 р.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ .....   | 7  |
| 1 Аналіз сучасного стану технологій та технічних рішень мініГЕС.....                                  | 8  |
| 1.1. Перспективи використання мініГЕС в промисловості та побуті .....                                 | 8  |
| 1.2. Типи турбін для мініГЕС .....  | 9  |
| 1.3. Параметри, що визначають ефективність мініГЕС .....  | 18 |
| 1.4. Огляд лабораторних стендів для дослідження мініГЕС.....  | 22 |
| Висновки до розділу 1.....  | 23 |
| 2 Розробка конструкції лабораторної установки побутової мініГЕС.....                                  | 25 |
| 2.1 Формулювання технічного завдання.....   | 25 |
| 2.2 Розробка структурної схеми установки .....  | 26 |
| 2.3 Розробка гідравлічної схеми установки .....   | 27 |
| 2.4 Вибір і розрахунок моделей турбін для установки .....   | 29 |
| 2.5 Розробка електричної схеми установки .....  | 31 |
| 2.6 Розробка система збору даних установки .....  | 33 |
| Висновки до розділу 2.....  | 35 |
| 3 Моделювання, виготовлення та проведення вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС..... | 37 |
| 3.1 Моделювання конструкції компонентів та установки в CAD-системі SolidWorks.....                    | 37 |

|   |      |         |   |       |
|---|------|---------|---|-------|
| БРМА 25.00.00.000 ПЗ                              |      |         |   |       |
| Зм.   | Арк. | №докум. | Підпис  | Дата  |
| Виконав   |      | Мороз   |  |       |
| Перевір.  |      | Лісевич |   |       |
| Н.контр.  |      |         |  |       |
| Затвер.   |      | Неймак  |   |       |
| Розробка лабораторної установки побутової мініГЕС |      |         | Літера  | Аркуш |
|   |      |         | у   | 5     |
| ХНУ, ЕТ-21  |      |         |   |       |

|  |    |
|--|----|
| 3.2 Вибір компонентів та матеріалів для виготовлення основних елементів установки.....                                       | 40 |
| 3.3 Виготовлення на налаштування установки.....  | 43 |
| 3.4 Методика вимірювань та обробка експериментальних результатів вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС..... | 43 |
| Висновки до розділу 3.....   | 56 |
| Висновки .....   | 58 |
| Перелік джерел посилання .....   | 60 |
| Додатки .....  | 62 |

## Вступ

У сучасних умовах зростаючого попиту на автономні та екологічно чисті джерела енергії малі гідроелектростанції (міні-ГЕС) відіграють дедалі важливішу роль. Завдяки простоті конструкції, невеликим капіталовкладенням, можливості експлуатації в умовах низького напору та помірної витрати води, міні-ГЕС широко застосовуються в побутовому та локальному промисловому енергозабезпеченні. Їх актуальність особливо зростає в контексті розвитку відновлюваної енергетики та забезпечення енергетичної незалежності регіонів.

Підготовка спеціалістів у сфері електроенергетики, електротехніки та електромеханіки вимагає наочного і практичного засвоєння принципів роботи мініГЕС, особливостей конструкцій турбін, взаємодії гідравлічної та електромеханічної частин, а також аналізу енергетичних параметрів установки. У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні лабораторної установки, яка б дозволила досліджувати ключові характеристики міні-гідроенергетичних систем в умовах навчальної лабораторії.

Мета даної роботи полягає у розробці, моделюванні, виготовленні та випробуванні лабораторної установки мініГЕС, яка відтворює принцип дії побутової гідроелектростанції. Установка має забезпечити зміну режимів роботи, вимірювання основних параметрів (напору, витрати, обертів, напруги, струму, ККД) та можливість дослідження різних типів гідротурбін, генераторів та навантажень на систему.

Практична цінність розробки полягає у створенні універсального стенду для освітніх та дослідницьких цілей, що сприятиме підвищенню якості підготовки інженерів та розвитку прикладних досліджень у сфері відновлюваної енергетики.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 7    |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

# 1 Аналіз сучасного стану технологій та технічних рішень мініГЕС

## 1.1. Перспективи використання міні-ГЕС в промисловості та побуті

Із кожним роком зростає інтерес до альтернативних джерел енергії, зокрема тих, що є екологічно безпечними та поновлюваними. До таких джерел належить і гідроенергетика, яка поєднує обидві ці якості. Саме завдяки цьому її вважають однією з найперспективніших галузей сучасної відновлюваної енергетики. Сфери застосування гідроенергетичних установок не обмежуються лише промисловим рівнем. Уже тривалий час гідроенергію ефективно використовують і в побуті. Зокрема, мала гідроенергетика охоплює використання міні-гідрогенераторів у сільському господарстві, добувній промисловості, на водному транспорті та в приватних домоволодіннях, розташованих поблизу річок або струмків.

Існує кілька основних типів побутових малих ГЕС: пропелерного типу – компактні установки з вузькими лопатями, що працюють під водою; ротор Дар'є – конструкції з вертикальними лопатями, які обертаються завдяки різниці тисків; водяні колеса – пристрої з лопатями, розміщеними перпендикулярно до потоку води; гідравлічні гірлянди – системи, у яких троси з роторами натягнуті між берегами водотоку.

Усі ці види міні-ГЕС забезпечують генерацію електроенергії в обсягах, достатніх для задоволення базових побутових потреб.

Перспективи розвитку гідроенергетики. Сучасна гідроенергетика має низку вагомих переваг. Серед ключових - екологічна безпечність: при її експлуатації не забруднюються ні атмосфера, ні ґрунтові ресурси, а вода як джерело енергії є відновлюваною. Можливість регулювання швидкості потоку дозволяє здійснювати ефективне керування роботою гідроелектростанції. Крім того, водосховища, створені для потреб ГЕС, здатні накопичувати запаси чистої води, придатної для побутового або технічного використання.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 8    |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Сумарний річний гідроенергетичний потенціал малих річок України становить близько 12 млрд кВт·год, що майже у чотири рази перевищує потенціал великих річок. Рациональне використання цього ресурсу для виробництва електроенергії за допомогою гідроелектростанцій дозволить отримати значні обсяги екологічно чистої енергії та суттєво зменшити споживання традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Переваги малої гідроенергетики (міні ГЕС потужністю до 5МВт):

- гідротехнічні споруди дозволяють регулювати рівень води для запобігання паводків;
- мінімальний вплив на навколишнє природне середовище: міні ГЕС екологічно безпечні та не створюють значних змін у ландшафті;
- простота та надійність виробництва електроенергії, тривалий термін експлуатації;
- вимагає нечисленого персоналу (може також бути керована дистанційно);
- енергозабезпечення віддалених споживачів.

## 1.2. Типи турбін та генераторів для міні-ГЕС

Сучасні гідроелектростанції (ГЕС) зазвичай представляють собою масштабні інженерні споруди з встановленою потужністю на рівні гігават. Проте, незважаючи на складність інфраструктури, основний принцип їх роботи залишається відносно простим і практично однаковим для всіх типів станцій (рис. 1.1). Потік води, що створює гідравлічний напір, спрямовується на лопаті гідротурбіни, приводячи її в обертальний рух. Турбіна з'єднана з електрогенератором, який, обертаючись разом із ротором, перетворює механічну енергію обертання в електричну. Отримана електроенергія далі передається на трансформаторну підстанцію, звідки через лінії електропередач (ЛЕП) розподіляється до споживачів.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 9    |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |



води, гідротурбіна, генератор та система управління і контролю параметрів генерації.

Ключовим елементом гідроагрегату, що безпосередньо здійснює перетворення гідравлічної енергії у механічну енергію обертання, є гідротурбіна. Існують два основні типи турбін: активні турбіни – мають робоче колесо, що розташовується в повітрі; обертання виникає внаслідок дії струменя води на лопаті колеса; реактивні турбіни – їхнє робоче колесо повністю занурене у воду і обертається головним чином за рахунок різниці тисків перед і після турбіни [3].

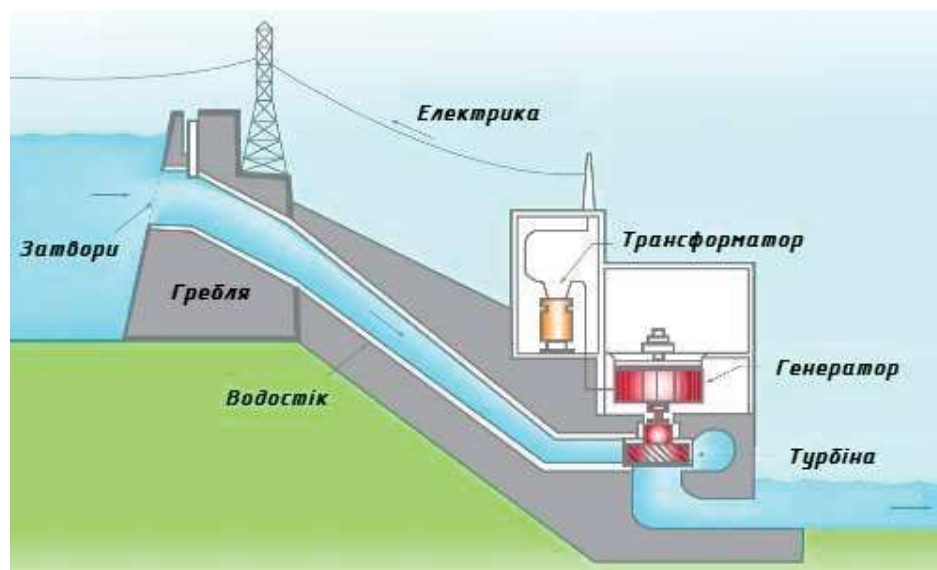


Рисунок 1.2 – Загальна схема гідроелектростанції

Гідротурбіна виступає ключовим гідромеханічним пристроєм, який перетворює енергію потоку води в обертальний механічний рух. Оскільки кінцева мета гідроенергетичних установок — виробництво електроенергії, турбіна працює як привід для гідрогенератора. Як правило, ротор турбіни і ротор генератора змонтовані на одному валу, з єдиною опорною системою, що утворює єдиний агрегат — гідроагрегат[3].

Класифікація гідротурбін за принципом дії.

1. Реактивні турбіни. У реактивних турбінах використовується як тиск, так і швидкість потоку. Робочий орган — лопатеве колесо — повністю занурений у

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |



активними (імпульсними) або реактивними.

Залежно від функціональних потреб та параметрів, що визначають ефективність роботи гідстанцій використовують такі типи турбін: Пелтона, Френсіса, Каплана, осьові, шнекові та інші.

Таблиця 1.1 – Типи турбін для ГЕС та мініГЕС

| Тип турбіни               | Принцип дії                             | Застосування                 | Потужність     | Переваги                                     |
|---------------------------|---|------------------------------|----------------|--|
| Пелтона                   | Лопатки обертаються під тиском струменя | Високий напір (50–1000 м)    | 5 кВт–100 МВт  | Висока ефективність при великому перепаді    |
| Френсіса                  | Радіально-осьовий потік води            | Середній напір (10–300 м)    | 10 кВт–100 МВт | Широкий діапазон робочих умов                |
| Каплана                   | Осевий потік, регульовані лопаті        | Низький напір (2–70 м)       | 5 кВт–50 МВт   | Добре підходить для повноводних річок        |
| Банкі-Турбіна (Crossflow) | Потік проходить через циліндр           | Малий або середній напір     | 1–100 кВт      | Недорога, проста у встановленні              |
| Архімедів гвинт           | Обертання гвинта                        | Дуже низький напір (до 10 м) | до 100 кВт     | Підходить для рибних господарств, екологічна |

Турбіна Пелтона використовується переважно за умов високого напору і

малого об'єму потоку, що робить її особливо ефективною для гірських районів. Вона має просту конструкцію, тому добре підходить для лабораторних експериментів. Це ковшова гідротурбіна — один із найпоширеніших типів активних турбін, які перетворюють кінетичну енергію води в механічну. У 1889 році американський інженер Лестер А. Пелтон запатентував цю конструкцію (рис. 1.4).

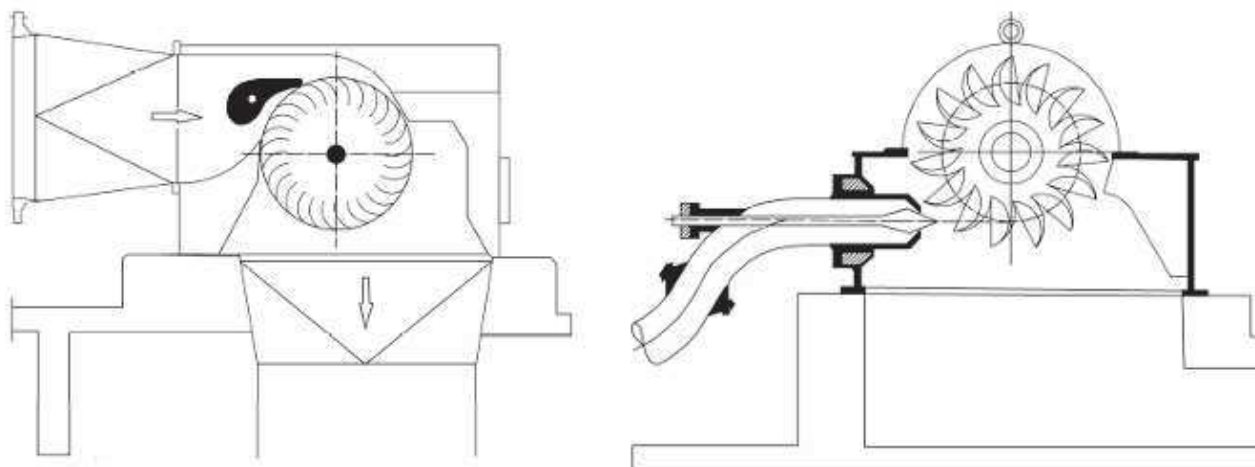
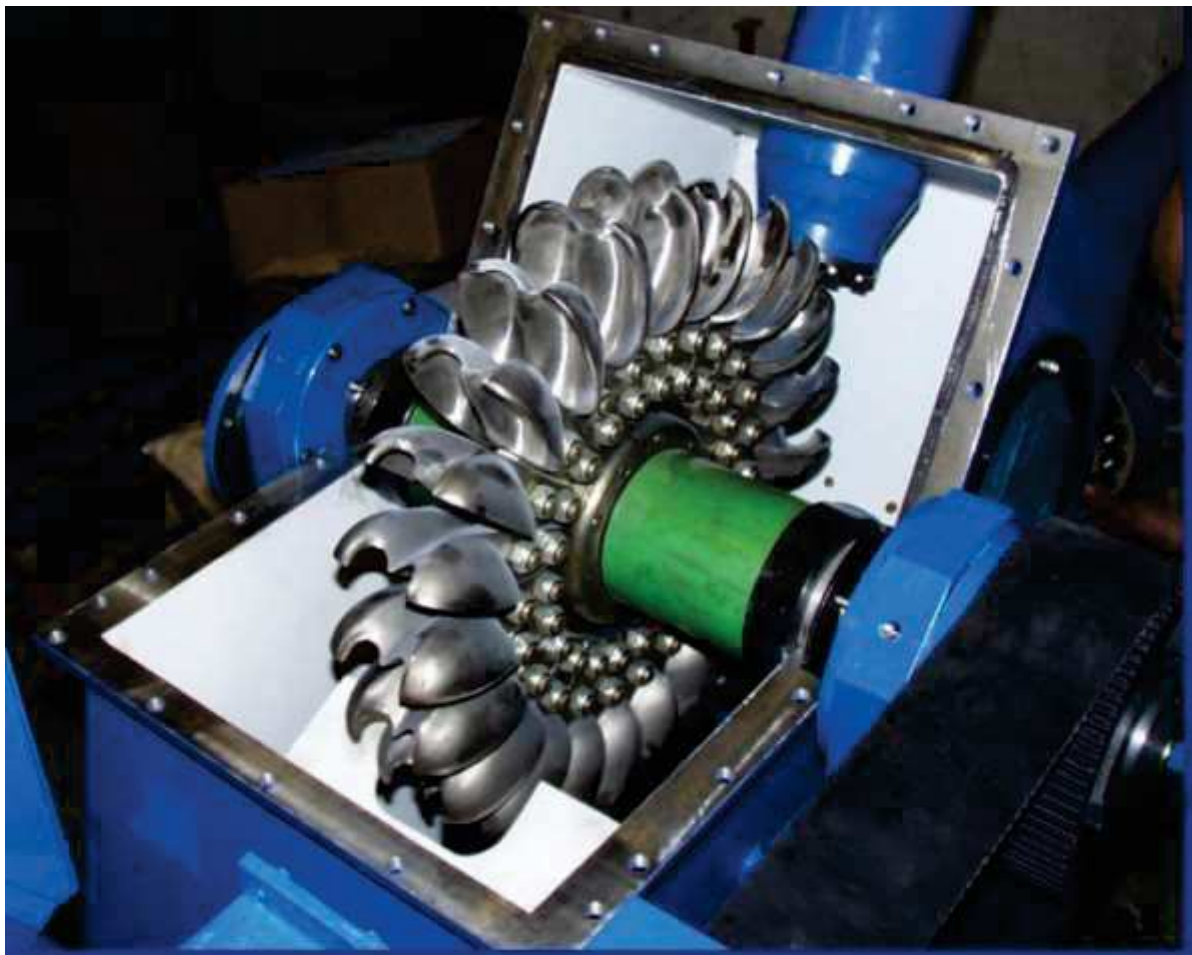


Рисунок 1.4 - Турбіна Пелтона

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
14

Основні елементи проточної частини турбіни включають сопло, робоче колесо та відвідний канал. Вода під тиском подається через сопло і спрямовується тангенціально на ковші робочого колеса, забезпечуючи його обертання.

Турбіна Пелтона належить до активного типу гідротурбін, у яких перетворення енергії води відбувається поза робочим колесом. Вода подається під високим тиском через сопло, формуючи вузький струмінь, який спрямовується на ковші робочого колеса. Під дією кінетичної енергії цього струменя ковші отримують імпульс, що обертає колесо.

На відміну від реактивних турбін, робоче колесо турбіни Пелтона не повністю занурене у воду, а енергія струменя використовується до його зіткнення з колесом. При цьому швидкість і тиск води залишаються практично незмінними в середині самої турбіни.

Завдяки спеціальній формі ковшів турбіна ефективно перетворює енергію струменя на обертальний рух з мінімальними втратами на турбулентність або гідравлічні опори. Такий підхід дозволяє досягати високої ефективності навіть при невеликому потоці та великому напорі води. Турбіна Френсіса. Робоче колесо реактивної турбіни повністю занурене у воду. Лопаті колеса мають спеціальну форму, яка забезпечує виникнення підйомної сили (аналогічної до тієї, що діє на крило літака) внаслідок перепаду тисків. Саме ця сила і спричиняє обертання колеса (рис.1.5).

Реактивні турбіни, зокрема турбіна Френсіса здатні обертатися з вищою швидкістю, ніж активні турбіни за однакових умов потоку та напору. Це є суттєвою перевагою, оскільки дозволяє підключати реактивну турбіну безпосередньо до генератора змінного струму, не використовуючи додаткові пристрої для підвищення обертів. Деякі виробники випускають інтегровані агрегати типу турбіна-генератор, що значно знижує вартість обладнання та спрощує його обслуговування.

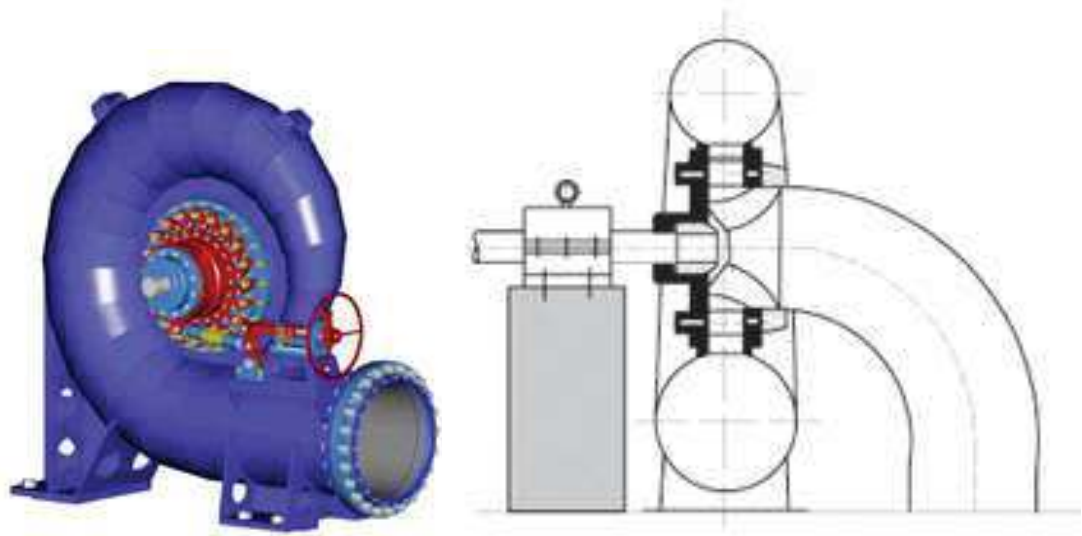


Рисунок 1.5 – Турбіна Френсіса

Турбіна Каплана. Працює при низькому напорі та великому об'ємі води. Має регульовані лопаті – складніша конструкція. Підходить для широких річок.



Рисунок 1.6 - Турбіна Каплана

Турбіна Каплана — це реактивна турбіна осьового типу з поворотними лопатями, призначена для роботи при низьких напорах і високих витратах води. Її було розроблено у 1913 році австрійським інженером Віктором Капланом,

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

який поєднав особливості конструкції пропелерної турбіни з механізмом регулювання лопатей, що дозволило досягти високої ефективності в широкому діапазоні гідравлічних умов (рис.1.6).

Конструкція турбіни включає направляючий апарат з регульованими лопатями та робоче колесо з поворотними лопатями (ребрами). Завдяки цій особливості турбіна автоматично адаптується до зміни витрати води, підтримуючи стабільний ККД навіть за непостійних умов. Робочий діапазон напорів, у якому турбіна Каплана демонструє найвищу ефективність, становить від 10 до 70 метрів. У процесі роботи вода подається трубопроводом у спіральний кожух турбіни, проходить через напрямні лопаті, які спрямовують потік на лопаті робочого колеса. Лопаті змінюють свій кут залежно від швидкості та об'єму потоку. Обертуючись під дією потоку, колесо передає механічну енергію генератору, який виробляє електричний струм. Вода після проходження через турбіну відводиться через дифузор (вихідну трубу), де її тиск і швидкість зменшуються.

Завдяки своїй простоті, надійності та високій енергоефективності, турбіна Каплана є одним із найефективніших рішень для гідроелектростанцій, що працюють на рівнинних річках з великими витратами води та порівняно невеликим перепадом висот.

Для лабораторної установки оптимальним вибором є турбіна Френсіса, оскільки вона поєднує конструктивну простоту, доступність для виготовлення та високу ефективність у середньому діапазоні напорів (від 20 до 100 м). Така турбіна дозволяє наочно демонструвати як принцип дії реактивної турбіни, так і основи енергетичного перетворення у міні-ГЕС.

Типи генераторів, які використовуються для ГЕС та мініГЕС:

- синхронні генератори - використовуються для підключення до мережі.
- асинхронні генератори - добре підходять для ізольованих систем або гібридних з сонячними та вітровими установками.
- постійного струму - для автономного живлення малих об'єктів.



Рисунок 1.7 - Двигун постійного струму

Для лабораторної установки з дослідження міні-ГЕС доцільно використовувати генератори постійного струму, оскільки вони мають просту конструкцію, не потребують складного регулювання та дозволяють легко проводити вимірювання напруги, струму і потужності в навчальних цілях.

У разі необхідності демонстрації взаємодії з мережею або дослідження систем стабілізації частоти та напруги - доцільним буде використання асинхронного генератора, який також добре працює у складі гібридних систем з іншими джерелами енергії (сонячними, вітровими).

Синхронні генератори, хоча й широко використовуються у промисловості, менш зручні для лабораторного використання через складність запуску та синхронізації з мережею.

### 1.3. Огляд лабораторних стендів для дослідження мініГЕС

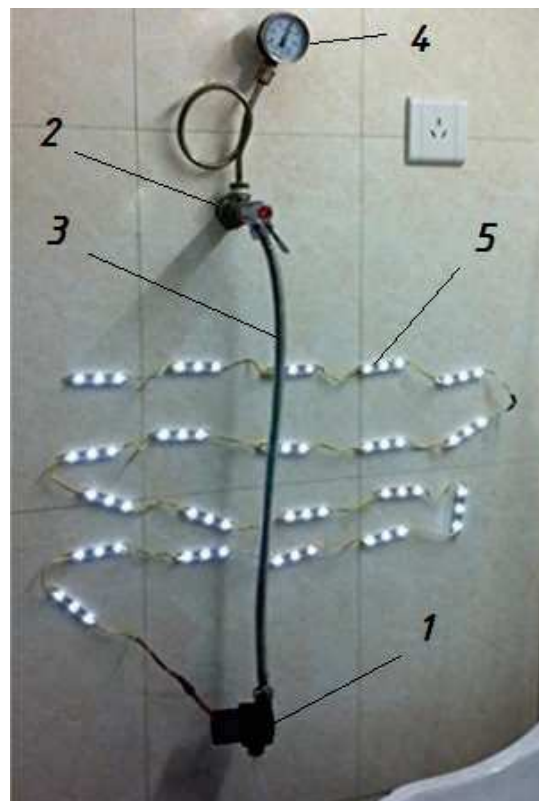
Основні компоненти, що входять до складу мініГЕС, а відповідно і до складу розроблюваної нами лабораторної установки:

- турбіна - механічний пристрій, що перетворює кінетичну енергію води в обертальний рух;
- генератор - перетворює обертання турбіни в електричну енергію;

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

- напірний трубопровід - транспортує воду з верхнього рівня до турбіни;
- забірна споруда (насосний пристрій) - уловлює воду з резервуару та поставляє її до верхнього рівня;
- система регулювання, контролю та захисту - забезпечує контроль напруги, струму, захист від перевантажень тощо.

Для проведення лабораторних досліджень використовується спеціально розроблений стенд, що складається з мінігідрогенератора (1), комплекту з'єднувального обладнання, вимірювальних приладів та електричного навантаження (рис. 1.8) [3].



1 – міні гідрогенератор; 2 – водопровід з краном; 3 – патрубок; 4 – манометр;  
5 - навантаження

Рисунок 1.8 – Загальний вигляд експериментальної установки

Принцип роботи лабораторної установки полягає у наступному: мінігідро-генератор (1) під'єднується до водопровідного крана (2) за допомогою патрубку (3). Для контролю вхідного тиску води перед краном встановлено манометр (4).

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
19

Після відкриття крана вода під тиском надходить через патрубок у гідросистему установки, де приводить в дію робоче колесо турбіни, розміщене всередині міні-ГЕС.

Турбіна встановлена на роторі генератора і обертається під дією водяного потоку, перетворюючи гідравлічну енергію у механічну. Генератор, у свою чергу, конвертує цю механічну енергію в електричну.

У процесі експериментів послідовно використовуються два мінігідрогенератори постійного струму, які по черзі підключаються до джерела водопостачання з метою порівняння їхніх робочих характеристик [3].

На рисунку 1.9 приведено лабораторний стенд, який розміщено на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем.

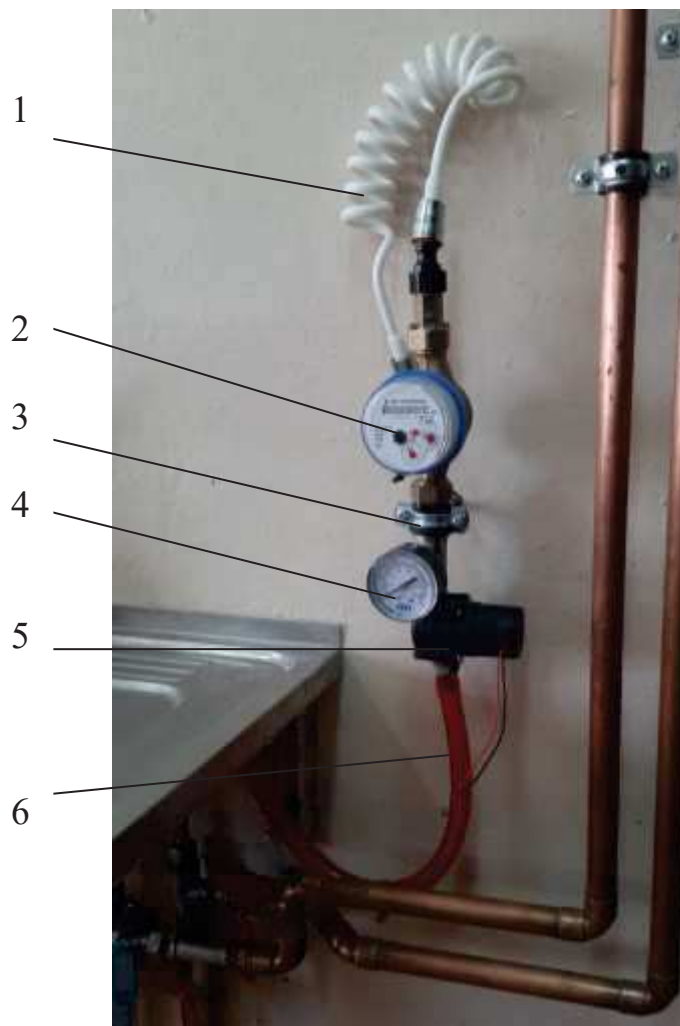


Рисунок 1.9 - Загальний вид стенда для дослідження компонентів мініГЕС

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
20

До складу стенду входять: 1 – шланг підключення до системи, 2 – витратомір, 3 – хомут, 4 – манометр, 5 – генератор, 6 – шланг зливу.

Дана система дозволяє підключатися до централізованого водопроводу, вентилем регулювати витрати рідини і заміряти витратоміром ці витрати. Для заміру тиску у системі слугує манометр. Далі у гідравлічну мережі під'єднаний генератор разом із турбіною. І далі системою шлангів дана установка з'єднана з централізованою каналізацією. Для контролю струму та напруги є виводи для підключення мультиметрів.

Ця установка проста у використанні, але має недоліки. Вона може використовуватися тільки для випробовування одного виду мінігідрогенератора. Тобто при такому монтажі установки, щоб приєднати інший гідрогенератор чи іншу турбіну потрібно розгерметизувати систему.

На рисунку 1.10 приведено загальний вигляд міні гідрогенератора FDJ0011, який використовується у даній лабораторній установці.



а



б

а – загальний вигляд міні гідрогенератора; б – загальний вигляд турбіни

Рисунок 1.10 – Загальний вигляд міні гідрогенератора FDJ0011

Технічні характеристики міні гідрогенератора FDJ0011: робочий тиск 0 ~ 1,75 МПа; випробувальний тиск 1,2 МПа; діапазон температур 0 ~ 120 °С; максимальна витрата: 30 л/хв; максимальна вихідна напруга: 4,3 +/- 0,3В

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
21



нем води у верхньому і нижньому резервуарах (вимірюється в метрах або у Паскалях). Це головний параметр, що визначає потенційну енергію води. Вищий напір дає змогу отримати більшу потужність при тій самій витраті.

Швидкість обертання турбіни  $V$  – кількість обертів вала турбіни за одиницю часу (об/хв). Цей параметр впливає на відповідність турбіни до електричного генератора, а також на стабільність вироблення енергії. Для ефективної роботи генератора потрібно дотримуватись номінальної швидкості обертання.

Електрична потужність генератора  $P$  – це кількість електроенергії, яка виробляється генератором у результаті обертання ротора (вимірюється у Ватах або кіловатах). Потужність залежить від механічної енергії, що передається з турбіни, і втрат у системі.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) установки – характеризує ефективність перетворення енергії потоку води в електричну. Розраховується як відношення вихідної електричної потужності до загальної гідравлічної потужності потоку. Високий ККД (70–90%) свідчить про ефективну роботу системи з мінімальними втратами.

Дані вимірювань дозволяють оцінити вплив гідравлічних та електричних параметрів на ефективність енергоперетворення в міні-ГЕС.

Детальний числовий розрахунок параметрів приведено у розділі 3.

#### Висновок до розділу 1

У цьому розділі зроблено аналіз перспектив використання мініГЕС в промисловості та побуті. У результаті аналізу було встановлено, що мініГЕС є перспективним джерелом енергії для промислового та побутового застосування завдяки автономності, екологічності та невеликим експлуатаційним витратам.

Розглянуто типи турбін (Пелтона, Френсіса, Каплана, осьові, шнекові), які потрібно вибирати залежно від умов: напору, витрати води та необхідної потужності. Приведено основні параметри ефективності мініГЕС і дано рекомендацію про їх поєднання для забезпечення стабільної роботи мініГЕС.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 23   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Аналіз лабораторних стендів показав, що вони ефективні для навчальних і дослідницьких цілей та дозволяють вивчати вплив гідравлічних параметрів на роботу мініГЕС, але мають недоліки.

Тому завданням роботи було розробити універсальну установку, яка дозволяла б проводити вимірювання усіх видів генераторів, турбін та гідродвигунів.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 24   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## 2 Розробка конструкції лабораторної установки побутової мініГЕС

### 2.1 Формулювання технічного завдання

Метою проектування є розробка універсальної лабораторної установки, яка дозволяє імітувати роботу побутової міні-гідроелектростанції (мініГЕС) та проводити експериментальні дослідження її основних параметрів. Установка повинна забезпечувати зміну гідравлічних умов (витрата води, напір), а також дозволяти дослідження роботи різних типів турбін та генераторів.

Основні вимоги до лабораторної установки:

- функціональні вимоги: забезпечити імітацію умов роботи побутової міні-ГЕС; мати можливість змінювати гідравлічні параметри (витрата, напір); забезпечити зміну типів турбін (Пелтона, Френсіса, Каплана, осьової, шнекової); дозволити підключення різних типів генераторів для перетворення механічної енергії в електричну; забезпечити безперервний збір даних з основних вузлів.

- конструктивні вимоги: наявність резервуара, насоса, трубопроводів та регулюючої арматури; можливість швидкої заміни турбіни; надійне закріплення турбінного та генераторного блоків; компактність конструкції, придатність для розміщення на лабораторному столі; безпечність під час роботи.

- вимоги до вимірювання та моніторингу: установка повинна бути обладнана: витратоміром для контролю витрати води; датчиком тиску (напору); мультиметричними засобами для вимірювання струму, напруги, потужності; наявність засобів збору, реєстрації та обробки експериментальних даних.

- вимоги до безпеки та експлуатації: захист від витоку води; захист генератора та споживача; аварійне відключення насоса та навантаження; захисні кожухи на обертових елементах.

Можливість варіювати параметри для аналізу впливу на ККД.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 25   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## 2.2 Розробка структурної схеми установки

Міні гідроелектростанція є комплексом елементів та устаткування, які дозволяють перетворювати енергію води в електричну енергію.

До складу мініГЕС входять: гідротурбіна з ротором, гідрогенератор (електрогенератор), електричний адаптер та засіб кріплення гідротурбіни.

Структурна схема елементів, їх взаємозв'язок та вплив зовнішніх параметрів на перетворення одного виду енергії у інший показано на рисунку 2.1 та графічній частині [БРМА 25.00.00.000 С1].

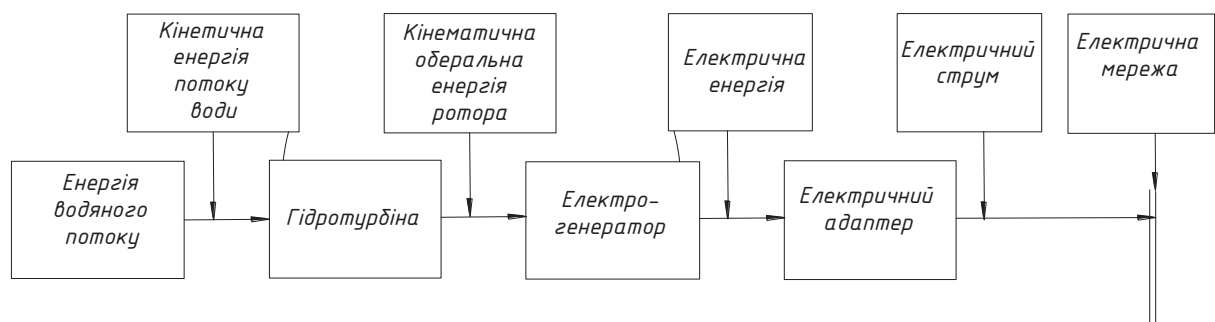


Рисунок 2.1 - Структурна схема елементів та їх взаємозв'язок

Гідротурбіна разом із гідрогенератором утворюють єдиний функціональний блок - гідроагрегат. Основне завдання гідротурбіни полягає в перетворенні кінетичної енергії водяного потоку на обертальну механічну енергію ротора. Гідрогенератор, у свою чергу, за допомогою електромагнітної індукції перетворює цю механічну енергію в електричну. Спеціальний електричний адаптер (інвертор або стабілізатор) коригує вихідні параметри напруги та струму до рівнів, придатних для підключення споживачів або подальшої передачі енергії до електромережі. Аби створити умови ефективного використання енергії водяного потоку гідроагрегат оптимально розміщують у водяному потоці за допомогою певного засобу кріплення.

Розроблена структурна схема установки передбачає логічне поєднання всіх основних підсистем: гідравлічної, електричної, енергетичної, вимірюваль-

ної та системи керування. Це дозволяє провести повноцінне моделювання роботи побутової мініГЕС в лабораторних умовах.

### 2.3 Розробка гідравлічної схеми установки

Функціональне призначення гідравлічної схеми установки для дослідження міні-ГЕС полягає в забезпеченні умов для імітації процесів гідроенергетичного перетворення в лабораторних умовах, з можливістю вимірювання та аналізу ключових параметрів.

Гідравлічна схема представлена на рисунку 2.2 та у графічній частині [БРМА 25.00.00.000 Г1].

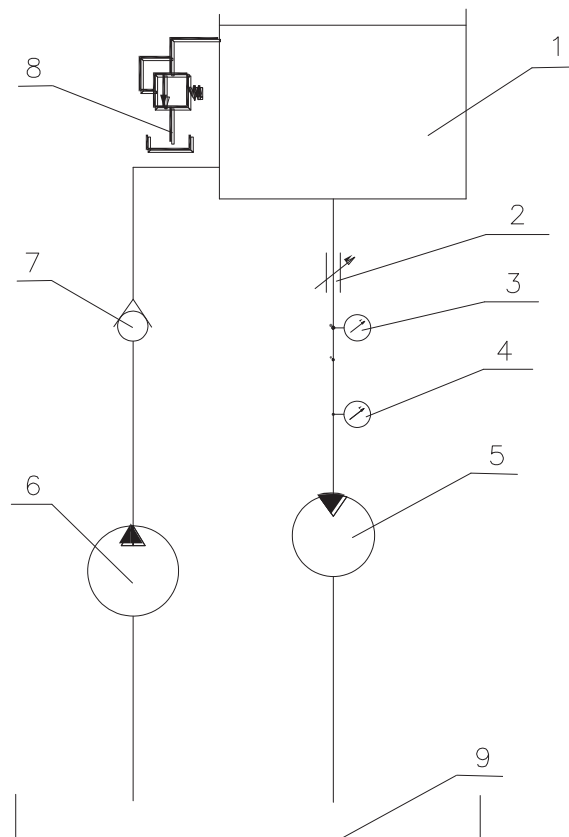


Рисунок 2.2 – Гідравлічна схема лабораторної установки: 1 - резервуар з водою; 2 – регульований дросель; 3 – витратомір; 4 – манометр; 5 – гідронасос (гідротурбіна); 6 – насос циркуляційний; 7 – зворотній клапан; 8 – запобіжний клапан; 9 - піддон для води

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
27

Зокрема, гідравлічна схема виконує такі функції:

- формування водяного потоку — забезпечує подачу води під тиском до турбіни, імітуючи реальний гідравлічний напір, характерний для міні-ГЕС.
- підведення енергії до гідротурбіни — направляє потік води через патрубки та сопла до робочого колеса турбіни, створюючи обертальний момент.
- регулювання потоку та тиску — за допомогою дросельних або регулюючих клапанів дозволяє змінювати витрату води та напір для дослідження режимних характеристик установки.
- контроль та вимірювання параметрів — включає манометри, витратоміри, тахометри, які дозволяють оцінювати ефективність роботи системи, визначати потужність, швидкість обертання та ККД.
- безпечне відведення води після проходження через турбіну — передбачає трубопроводи або резервуари для зниження тиску і скидання води, що забезпечує безперервну циркуляцію рідини.

Призначення та опис кожного елемента гідравлічної схеми лабораторної установки (рисунок 2.2):

Резервуар з водою (1) – виконує функцію джерела робочої рідини (води), забезпечує безперервну подачу води в систему та приймає її після проходження через всі елементи схеми.

Регульований дросель (2) – служить для зміни витрати та тиску потоку води. За його допомогою можна моделювати різні режими роботи гідросистеми, змінюючи гідравлічний опір.

Витратомір (3) – вимірює об'єм води, що проходить через систему за одиницю часу. Дає змогу точно визначити витрату рідини для розрахунку потужності та ККД.

Манометр (4) – призначений для вимірювання тиску води в певній точці системи. Допомагає контролювати напір, що подається на гідротурбіну.

Гідронасос / Гідротурбіна (5) – виконує роль перетворювача енергії. При подачі потоку води працює як гідротурбіна, що обертає вал генератора для ви-

роблення електроенергії.

Циркуляційний насос (6) – забезпечує примусову циркуляцію води в замкненій системі, подаючи її з піддону або резервуара назад у робочий контур.

Зворотний клапан (7) – не допускає зворотного потоку води в системі, захищаючи обладнання від гідравлічних ударів та несправностей у разі раптової зупинки насоса.

Запобіжний клапан (8) – автоматично скидає надлишковий тиск у системі, запобігаючи аварійним ситуаціям і пошкодженню компонентів.

Піддон для води (9) – приймає воду після проходження через систему, збирає її для подальшої повторної циркуляції, запобігає розливу.

Така конструкція дозволяє змінювати витрату та напір води, моделюючи різні гідрологічні умови.

## 2.4 Вибір і розрахунок моделей турбін для установки

Для забезпечення ефективної роботи міні-ГЕС у заданих гідрологічних умовах (обмежений напір, змінна витрата води, обмежена площа встановлення) було проведено порівняльний аналіз декількох типів гідротурбін. Основною метою є обґрунтування вибору оптимальної конструкції для лабораторного стенда з урахуванням простоти виготовлення, ефективності та стабільної роботи в умовах невеликих водозаборів.

До розгляду були включені наступні типи турбін:

- турбіна Пелтона (ударного типу);
- турбіна Френсіса (радіально-осьова, реактивна);
- турбіна Каплана (осьова, регульована);
- осьова проста турбіна (без регулювання лопатей);

Основні гідравлічні параметри для розрахунку з врахуванням того, що ми будемо використовувати їх у лабораторних умовах:

- витрата води  $Q = 0.005 \dots 0.03 \text{ м}^3/\text{с}$

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 29   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |



Проведено обґрунтований вибір та попередній розрахунок типових турбін - Пелтона, Френсіса, Каплана, осьової та шнекової — з урахуванням діапазону витрат, напору та очікуваної потужності. Це дає змогу порівнювати їх ефективність в однакових умовах.

## 2.5 Розробка електричної схеми установки

У лабораторній установці для дослідження перетворення гідравлічної енергії в електричну енергію особливу увагу було приділено вибору типу генератора. Вибір залежить від:

- типу досліджуваної турбіни (швидкохідна чи тихохідна);
- бажаного вихідного сигналу (постійний чи змінний струм);
- наявного навантаження;
- простоти підключення та вимірювання.

У рамках експериментальної установки було розглянуто два варіанти:

- генератор постійного струму (типу динамо або двигун-генератор, наприклад, 12В, 30Вт);
- генератор змінного струму (типу велосипедного або модифікованого автомобільного генератора).

Генератор постійного струму є зручним для вимірювання, дозволяє легко обраховувати потужність за формулою:

$$P = U \cdot I, \quad (2.1)$$

де  $U$  - напруга,  $I$  - струм,  $P$  - електрична потужність, Вт.

У випадку використання генератора змінного струму, для оцінки потужності враховують середньоквадратичні значення напруги й струму, а також фазовий зсув, якщо навантаження активне-індуктивне:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2.2)$$

Вибір навантаження. Як навантаження можуть використовуватись:

- лампи розжарювання або резистивні елементи (активне навантаження);
- електронні блоки навантаження зі змінним опором (регульоване навантаження);
- зарядні схеми або акумулятори (для постійного струму).

Для експериментів також рекомендовано використовувати регульовані резистивні навантаження, що дозволяє змінювати навантаження на генератор і досліджувати залежності потужності, напруги та струму.

Типова електрична схема лабораторної установки зображає підключення турбіни до генератора, а генератора — до вимірювальних пристроїв і навантаження. Схема показана на рисунку 2.3 та у графічній частині [БРМА 25.00.00.000 ЕЗ].

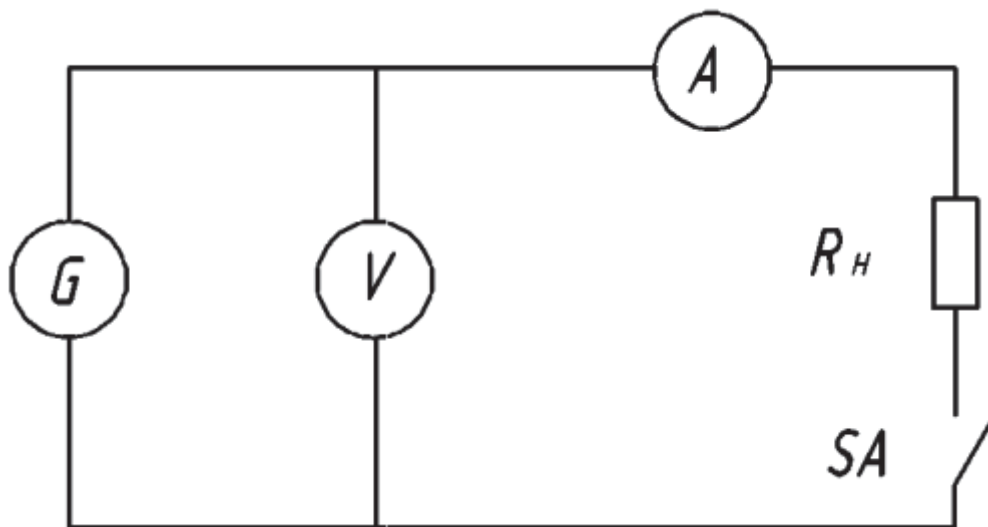


Рисунок 2.3 - Типова електрична схема лабораторної установки

Основні елементи схеми:

1. Гідротурбіна — забезпечує обертання валу генератора (на схемі не показана).
2. Генератор (G) — перетворює механічну енергію у електричну.
3. Амперметр (A) — вимірює струм у ланцюзі.

3. Вольтметр (V) — вимірює напругу на навантаженні.

4. Регульоване резистивне навантаження (Rн) — забезпечує зміну опору для експериментів.

5. Комутаційні елементи (тумблери, з'єднання SA) — для безпечної експлуатації.

Функціональні можливості схеми. Розроблена електрична схема дозволяє:

- досліджувати роботу генератора в різних режимах навантаження;
- знімати вольт-амперні характеристики генератора;
- визначати електричну потужність і ККД всієї установки;
- порівнювати ефективність різних типів турбін при однаковому навантаженні;
- аналізувати стабільність роботи системи при змінній витраті води.

Приклад формули для розрахунку ККД електрогенератора:

$$\eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P_{\text{ГДР}}} = \frac{U \cdot I}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \quad (2.3)$$

де  $\rho$  - густина води ( $\approx 1000 \text{ кг/м}^3$ );

$g$  - прискорення вільного падіння ( $9.81 \text{ м/с}^2$ );

$Q$  - витрата води ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$H$  - гідравлічний напір (м).

## 2.6 Розробка система збору даних установки

Для ефективного проведення експериментальних вимірювань на лабораторній установці міні-ГЕС розроблено систему збору та обробки експериментальних даних. Основна мета - забезпечити точний моніторинг гідравлічних та

електричних параметрів, необхідних для розрахунку ефективності перетворення енергії.

Система збору даних охоплює наступні параметри:

- гідравлічні: витрата води ( $Q$ ); гідравлічний напір ( $H$ ); частота обертання турбіни ( $n$ ) (в даній установці не встановлена).
- електричні: напруга на клеммах генератора ( $U$ ); сила струму у ланцюзі навантаження ( $I$ )

Система збору даних на даній установці побудована на модульному принципі та може включає такі модулі:

- датчики фізичних величин (встановлено на даній установці)
- аналого-цифровий перетворювач (ADC) (при потребі).
- мікроконтролер для збору та обробки сигналів (при потребі).
- інтерфейс передачі даних до комп'ютера (USB, Wi-Fi, Bluetooth) (при потребі).
- програмне забезпечення для візуалізації та збереження даних (при потребі).

Таблиця 2.2 - Використані датчики для лабораторної установки

| Параметр          | Тип датчика    | Позначення | Принцип роботи / модель                          |
|-------------------|----------------|------------|--|
| Витрата води      | Витратомір     | Q-сенсор   | Холловий сенсор типу YF-S201 або аналог          |
| Напір             | Датчик тиску   | H-сенсор   | Діафрагмовий тензодатчик, наприклад, 0–1 бар     |
| Частота обертання | Датчик обертів | RPM-сенсор | ІЧ-оптопара або магнітний енкодер                |
| Напруга           | Вольтметр      | U-сенсор   | Напруго-знижуючий резистивний дільник            |
| Струм             | Амперметр      | I-сенсор   | Шунт із аналоговим зчитуванням або датчик ACS712 |

## Опис принципу дії датчиків установки

Витратомір встановлюється на вході/виході гідролінії. Він формує імпульси пропорційно кількості води, що протікає через нього.

Датчик тиску монтується вході/виході гідросистеми для визначення гідравлічного напору. Тиск трансформується в напругу.

Датчик обертання закріплюється на валу турбіни або на вихідному валу генератора. Визначає кількість обертів за одиницю часу.

Датчик напруги вимірює потенціал між клемми генератора.

Датчик струму підключений послідовно в коло навантаження і дає інформацію про силу струму.

Зібрані дані зчитуються мікроконтролером (Arduino), перетворюються в цифрову форму та передаються до комп'ютера. Це дозволяє проводити: візуалізацію в реальному часі; обчислювати потужність ( $P = U \cdot I$ ); розраховувати ККД ( $\eta = P / (\rho \cdot g \cdot Q \cdot H)$ ); автоматично зберігати у таблиці або базі даних для подальшого аналізу.

У лабораторній установці також передбачено комплекс заходів техніки безпеки: захист від ураження електричним струмом, запобігання розгерметизації гідросистеми, фіксація обертових елементів, заземлення та наявність аварійного вимикача.

## Висновки до розділу 2

На основі сформульованого технічного завдання визначено основні функціональні вимоги до лабораторної установки: можливість дослідження різних типів турбін, варіативність режимів роботи, зручність вимірювання основних параметрів та безпечність експлуатації.

Розроблена структурна схема установки передбачає поєднання всіх основних підсистем. Створено гідравлічну схему, конструкція якої дозволяє змінювати витрату та напір води, моделюючи різні гідрологічні умови. Вибрано та попередньо розраховано різні типи турбін. Це дає змогу порівнювати їх ефектив-

ність в однакових умовах. Розроблено електричну схему, яка дає змогу аналізувати характеристики перетворення гідравлічної енергії в електричну. Запроектовано систему збору даних, що забезпечує контроль основних вимірювальних параметрів. Розроблено комплекс заходів техніки безпеки при роботі з даною установкою.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 36   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## 3 Моделювання, виготовлення та проведення вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС

### 3.1 Моделювання конструкції компонентів та установки в CAD-системі SolidWorks

На етапі проектування лабораторної установки для дослідження параметрів міні-ГЕС важливою частиною є побудова її віртуальної моделі у середовищі тривимірного комп'ютерного моделювання. Для цих цілей обрано CAD-систему SolidWorks, яка забезпечує повний цикл: від створення окремих деталей до збирання конструкцій та проведення віртуального аналізу навантажень і технологічності.

Мета 3D-моделювання: візуалізувати всі елементи майбутнього стенда ще до початку його фізичного виготовлення; перевірити геометричну сумісність деталей; виявити потенційні проблеми на етапі збирання; провести базовий аналіз міцності, аерогідродинаміки або теплового режиму; підготувати креслення для виготовлення окремих вузлів.

Основні етапи моделювання:

1. Створення бібліотеки компонентів
2. Збирання установки в середовищі SolidWorks.
3. Розрахунок геометричних параметрів установки (детальний розрахунок приведено у п.п.3.2)
5. Генерація креслень

У середовищі SolidWorks побудовано окремі 3D-моделі ключових елементів: робоче колесо гідротурбіни Френсіса (рис. 3.1); корпус турбіни (рис. 3.2); водопровідна труба або канал подачі води; генератор (модель умовна або імпортована з бібліотеки стандартних компонентів); кронштейни, муфти, вали, з'єднувальні деталі.



Рисунок 3.1 - Робоче колесо гідротурбіни Френсіса

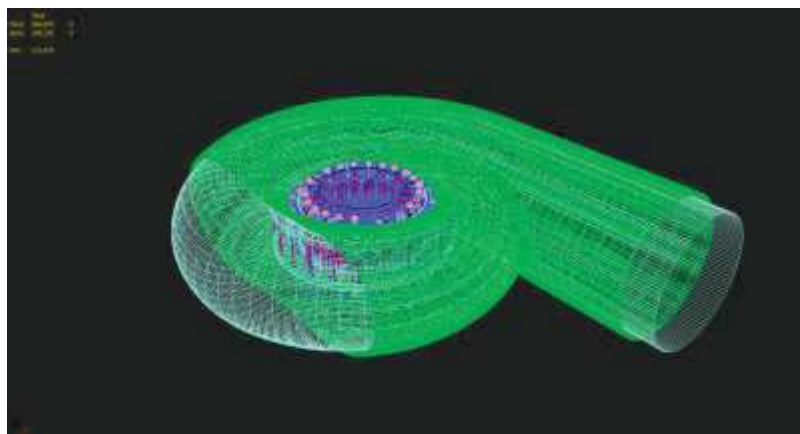


Рисунок 3.2 - Корпус турбіни

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
38



Рисунок 3.3 – Загальна модель лабораторної установки

На основі змодельованих конструкцій було зроблено графічні креслення турбіни Френсіса та загальне компонування лабораторної установки, що показані у графічній частині кваліфікаційної роботи. [БРМА 25.00.000 ВЗ], [БРМА 25.00.000 ГК].

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

39

### 3.2 Вибір компонентів та матеріалів для виготовлення основних елементів установки

Після завершення побудови було визначено: загальні габарити установки; приблизну вагу з урахуванням матеріалів; площу основи стенда; об'єм води в трубопроводі; момент інерції робочого колеса (при потребі механічного аналізу).

Складові частини, геометричні та масово-інерційні характеристики лабораторного установки:

- резервуар з водою (бак) – імітує водосховище або річку;
- насос – працює для створення циркуляції води та напору (рис.3.4). Технічні характеристики насосів приведено в [14];



Рисунок 3.4 – Насос циркуляційний

- трубопровід (висотою ~1...2 м, Ø 32 мм) - призначений для подачі води на турбіну;
- турбіна (типу Каплана або Френсіса, робоче колесо Ø ~150–160 мм) - призначена для перетворення енергію потоку води в механічну (див. рис.3.1. та 3.2);

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
40

- генератор (DC 12 В або велосипедний) показаний на рисунку 3.5 - перетворює обертання вала турбіни в електричну енергію [15];



Рисунок 3.5 - Генератор

- навантаження (лампи, резистори) призначені для візуалізації споживання потужності;

- опорна конструкція, кріпильні елементи, хомоти та корпус установки призначений для кріплення усіх компонентів установки;

- вимірювальні елементи (витратомір, манометр, датчики) призначені для візуалізації всіх параметрів роботи установки (рис. 3.6, 3.7) [16].



Рисунок 3.6 – Витратомір (лічильник рідини)

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

41



Рисунок 3.7 - Манометр

Приблизні габарити лабораторної установки:

|                      |   |
|----------------------|---|
| Довжина установки    | 2000 мм                                       |
| Ширина установки     | 600 мм  |
| Висота установки     | 1200 мм                                       |
| Площа основи         | 0.6 м <sup>2</sup>                            |
| Загальний об'єм води | ≈ 15–20 л (залежить від розміру бака та труб) |

Маса елементів (орієнтовно):

Каркас (металопрофіль, 20×20 мм) - 8–10 кг

Резервуар з водою (ПВХ, 20 л) 2–3 кг (порожній), + 20 кг (вода)

Турбіна (робоче колесо + корпус) 1.5–2 кг

Генератор (DC мотор або велосипедний) 1–1.5 кг

Трубопровід (ПВХ, Ø32 мм, 1.5 м) ≈ 1 кг

Датчики, електроніка 0.3–0.5 кг

Радіатори, кріплення, підшипники 1–1.5 кг

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|---------|--------|------|

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

42

### 3.3 Виготовлення на налаштування установки

Після завершення етапів проєктування та 3D-моделювання в середовищі SolidWorks було розпочато виготовлення компонентів лабораторної установки для дослідження параметрів міні-ГЕС.

Каркас конструкції виготовлено з металевого профілю 20×20 мм зварного типу. Це забезпечило достатню жорсткість та стійкість при роботі з обертовими елементами.

Робоче колесо турбіни виготовлено методом 3D-друку (PLA/ABS) або механічної обробки з алюмінію. Геометрія відповідає моделі, змодельованій у CAD. Корпус турбіни та трубопровідна частина виготовлені з ПВХ-труб (Ø32 мм) із герметичними з'єднаннями на фітингах.

Генератор постійного струму встановлено на валу турбіни за допомогою муфти.

Резервуар для води виготовлений із харчового пластику об'ємом 20 л або переобладнано стандартну ємність.

Монтаж і збирання. З'єднання деталей виконувалося з урахуванням герметичності — застосовано ущільнювачі, силіконові прокладки, фланці. Для зручності обслуговування окремі вузли (турбіна, генератор, вимірювальні прилади) змонтовано на знімних майданчиках.

Встановлено витратомір, манометр, вольтметр та амперметр.

### 3.4 Методика вимірювань та обробка експериментальних результатів вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС

#### 3.4.1 Методика вимірювань на лабораторній установці побутової мініГЕС

Розроблена лабораторна установка мініГЕС дозволяє реалізовувати широкий спектр експериментів, пов'язаних з перетворенням гідравлічної енергії в

електричну. Вона надає можливість змінювати основні параметри потоку, конфігурацію турбін, тип генератора та навантаження, що дозволяє імітувати різні режими автономного електропостачання.

Рекомендовані напрямки вимірювань на лабораторній установці:

1. Побудова та тестування простого прототипу турбіни типу Пелтона, як базової моделі.
2. Порівняння ККД турбін різних типів: Пелтона, Френсіса, Каплана, осьової.
3. Вивчення впливу зміни напору та витрати на параметри генерації електроенергії.
4. Моделювання практичних сценаріїв використання установки для автономного живлення: живлення лампи, заряджання акумулятора тощо.

Для виконання повноцінного аналізу роботи установки слід проводити вимірювання наступних фізичних величин:

1. Витрата води ( $Q$ ) проводити за допомогою імпульсного витратоміра або об'ємом за час (відерне вимірювання).
2. Напір ( $H$ )- вимірюється датчиком тиску або визначається по висоті стовпа води.
3. Частота обертання турбіни ( $n$ ) - фіксується тахометром або оптичним/магнітним датчиком обертів (за потреби).
4. Сила струму ( $I$ )- вимірюється за допомогою амперметра
5. Напруга ( $U$ ) - знімається вольтметром або аналоговим датчиком напруги.
6. Електрична потужність ( $P$ ) - обчислюється як добуток струму і напруги:  
 $P = U \times I$ .
7. Гідравлічна потужність ( $P_r$ ) - розраховується за формулою:  $P_r = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$ .
8. Коефіцієнт корисної дії ( $\eta$ )  $\eta = P / P_r$  — визначає ефективність перетворення енергії.

7. Типи вимірювань, які можуть проводитись на лабораторній установці:

1. Визначення ККД турбіни проводиться шляхом зміни витрати та напору, обчисливши співвідношення між гідравлічною та електричною потужністю.
2. Вплив напору на генерацію електроенергії – проводиться шляхом плавної зміни рівня резервуару або тиску насоса.
3. Дослідження потужності генерації відбувається шляхом зміни діаметру труби та отримавши різну витрату.
4. Порівняння типів турбін - встановлювати різні моделі турбін у ті самі умови.
5. Вплив навантаження на генеровану електроенергію відбувається використанням змінних резисторів або лампів з різною потужністю.
6. Автономне навантаження - підключення побутових споживачів: світлодіодна лампа, акумулятор.

Послідовність проведення лабораторних вимірювань [4].

1. Ознайомитися із принципами побудови мініГЕС
2. Під'єднати гідрогенератори (гідротурбіни) до водопроводу.
3. Виконати електричні з'єднання для проведення досліду згідно електричної схеми.
4. Для десяти значень тиску води  $P_m$ , МПа за допомогою мультиметра визначити електричну напругу  $U$  та струм  $I$ , що виникають.
5. За формулою  $P_{el} = U \cdot I$  розрахувати потужність, яка виробляється генератором.
6. Для десяти значень тиску зафіксували отримані значення витрат води  $Q$ , що зафіксовані витратоміром.  
Отримані дані потрібно занести в таблицю вимірювань 3.1.
7. По отриманим даним побудувати графіки залежності потужності, що виробляється гідрогенераторами (гідротурбінами) від витрат води в системі



Баланс енергії в турбіні:

Потужність потоку:

$$P_{ГДР} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.2)$$

де  $\rho$  - густина води, 1000 кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  - витрата води, м<sup>3</sup>/с;  $H$  - корисний напір (з урахуванням втрат), м.

Механічна потужність на валу турбіни:

$$P_{МЕХ} = P_{ГДР} \cdot \eta_{ТУРБИНИ} \quad (3.3)$$

Електрична потужність генератора:

$$P_{ЕЛ} = P_{МЕХ} \cdot \eta_{ГЕНЕРАТОРА} \quad (3.4)$$

Загальний ККД системи:

$$\eta_{ЗАГАЛЬНИЙ} = \eta_{ТУРБИНИ} \cdot \eta_{ГЕНЕРАТОРА} \quad (3.5)$$

## 2. Гідравлічні розрахунки

Визначення витрати:

Для круглої труби діаметром  $D$ , швидкість  $v$ :

$$Q = A \cdot v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \quad (3.6)$$

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         |        |      |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

47

або за допомогою витратоміра (розглянемо нижче у вимірюваннях).

Визначення втрати:

$$h_{ВТРАТ} = h_f + h_{МІСЦ} \quad (3.7)$$

Втрати по довжині труби (за формулою Дарсі-Вейсбаха):

$$h_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.8)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт тертя;  $L$  – довжина труби.

Міцеві витрати (на клапанах, поворотах, вході, виході):

$$h_{МІСЦ} = \sum K_i \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.9)$$

де  $K_i$  - коефіцієнти місцевих втрат.

Корисний напір:

$$H = H_0 - h_{ВТРАТ} \quad (3.10)$$

де  $H_0$  - геометричний напір (різниця рівнів води в резервуарі і на виході).

### 3. Механічні розрахунки

Момент інерції ротора:

Для диску (наприклад, ротор генератора чи турбіна):

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3.11)$$

де  $m$  - маса диска;  $r$  - радіус.

Для циліндра (ротора з валом):

$$J = \frac{1}{2}mr^2 = m_{\text{ВАЛА}} \cdot r_{\text{ВАЛА}}^2 \quad (3.12)$$

Швидкість обертання:

Залежність від турбіни і гідравлічної потужності:

$$\omega = \frac{P_{\text{МЕХ}}}{M} \quad (3.13)$$

де  $M$  - момент сили, що створюється потоком води на лопатках:

$$M = \rho \cdot Q \cdot R \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.14)$$

де  $v_1$  - вхідна,  $v_2$  - вихідна швидкість води відносно лопаток.

Спрощено (емпірично) часто задаємо оберти:

$$n_{\text{ОПТ}} = \frac{60 \cdot u}{\pi D_t} \quad (3.15)$$

де  $D_t$  - діаметр робочого колеса турбіни;  $u$  - окружність швидкість.

#### 4. Електричні розрахунки

Потужність генератора:

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.16)$$

де  $U$  - напруга, В;  $I$  - струм, А;  $\cos \varphi$  - коефіцієнт потужності

Для простого генератора постійного струму (або моделі без реактивної складової):

$$P_{el} = U \cdot I \quad (3.17)$$

ККД перетворення:

$$\eta_{\text{ГЕНЕРАТОРА}} = \frac{P_{el}}{P_{\text{МЕХ}}} \quad (3.18)$$

Повний ККД системи:

$$\eta_{\text{ЗАГАЛЬНИЙ}} = \frac{P_{el}}{P_{\text{ГІДР}}} \quad (3.19)$$

#### 5. Інструментальні вимірювання

Визначення напору за тиском:

$$H = \frac{p}{\rho g} \quad (3.20)$$

Аналізуючи та підсумовуючи всі інформаційні дані пропишемо вихідні дані для теоретичних обрахунків загальних, гідравлічних, механічних та енергетичних параметрів.

| Параметр                       | Значення  |
|--------------------------------|---|
| Висота напору $H_0$            | 0.5...2 м   |
| Діаметр труби $D$              | 32мм  |
| Довжина труби $L$              | 1.5м  |
| Матеріал труби                 | ПВХ   |
| Кількість місцевих втрат $K_i$ | 3 шт по $K=0.7$   |
| Турбіна Френсіса               | $D_t=160$ мм  |
| Турбіна Пелтона                | $D_t=80$ мм   |
| Турбіна Каплана                | $D_t=100$ мм  |
| Маса ротора + генератора $m$   | ~ 1.5 кг (типове для стенду)  |
| Генератори                     | двигун постійного струму, генератор велосипеда, інші (рекомендується ще генератор типу 12В DC з редуктором- дуже зручно для навчальних цілей) |
| Навантаження                   | Резисторна матриця (лампи 12В або регульовані резистори 10-100 Ом)  |
| Витратомір                     | вимірюється   |
| Манометр                       | вимірюється   |
| Тахометр                       | Немає – рекомендовано додати простий оптичний тахометр (або Hall- датчик або Arduino – дуже просто реалізується)                              |
| Мультиметр                     | вимірюється   |

Приклад повного розрахунку параметрів з врахуванням вихідних даних.

Приклад для турбіни Френсіса,  $H = 1.5$  м,  $D = 32$  мм (зроблено універсально, можна міняти напір у діапазоні 0.5...2 м).

1. Визначаємо витрату  $Q$ .

Припустимо, що витратомір показав  $Q = 0.003$  м<sup>3</sup>/с (3л/с) – це типовий потік для такої труби.

2. Визначаємо втрати напору

По довжині труби:

Спочатку визначаємо швидкість потоку:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.1416 \times (0.032)^2}{4} = 8.042 \text{ м}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.003}{8.042 \times 10^{-4}} = 3.73 \text{ м/с.}$$

Втрати по довжині:

Приймаємо  $\lambda = 0.025$  для ПВХ труби з цим режимом потоку (ламінарно-перехідний/ турбулентний).

$$h_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = 0.025 \cdot \frac{1.5}{0.032} \cdot \frac{(3.73)^2}{2 \times 9.81} = 0.025 \cdot 46,8 \cdot 0,7 = 1,67$$

Місцеві втрати:

$$h_{\text{місц}} = \sum K_i \cdot \frac{v^2}{2g} = 3 \times 0.7 \times \frac{(3.73)^2}{2 \times 9.81} = 2.1 \times \frac{13.91}{19.62} = 2.1 \times 0.709 = 1.48$$

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|---------|--------|------|

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

52

### 3. Корисний напір

$$H = H_0 - (h_f + h_{\text{МІСЦ}}) = 1.5 - (0.833 + 1.48) = -0,81$$

Так як отримали корисний напір зі знаком «мінус», то робимо висновок, при  $Q=3\text{л/с}$  і  $H_0=1.5$  м труба 32 мм занадто довга – треба зменшити витрату або збільшити діаметр труби.

$$875 \cdot \frac{13.91}{19.62} \approx 0.025 \cdot 46.875 \cdot 0.709 = 0.833$$

Корекція – візьмемо меншу витрату  $Q=0.0015 \text{ м}^3/\text{с}$  (1.5 л/с):

Швидкість:

$$v = \frac{0.0015}{8.042 \times 10^{-4}} = 1.86$$

Втрати по довжині:

$$h_f = 0.025 \cdot \frac{1.5}{0.032} \cdot \frac{(1.86)^2}{2 \times 9.81} = 0.025 \cdot 46,8 \cdot 0,17 = 0,19$$

Місцеві втрати:

$$h_{\text{МІСЦ}} = 2.1 \times \frac{3.46}{19.62} = 2.1 \times 0.176 = 0.37$$

Корисний напір:

$$H = 1.5 - (0.206 + 0.37) = 1.5 - 0.576 = 0,92$$

### 4. Потужність потоку

$$P_{ГДР} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

$$P_{ГДР} = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.0015 \cdot 0.924 = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.001386 = 13.6 \text{ Вт}$$

5. Потужність на валу турбіни

Припустимо  $\eta_{ТУРБИНИ} = 0.6$  (60% для Френсіса при модельному режимі):

$$P_{МЕХ} = 13.6 \cdot 0.6 = 8.16 \text{ Вт}$$

6. Потужність генератора

Припустимо  $\eta_{ГЕНЕРАТОРА} = 0.8$  (80% для DC генератора):

$$P_{ел} = 8.16 \cdot 0.8 = 6.53 \text{ Вт}$$

7. ККД системи

$$\eta_{ЗАГАЛЬНИЙ} = \frac{P_{ел}}{P_{ГДР}} = \frac{6.53}{13.6} = 0.48 \approx 48$$

Таблиця 3.2 – Результати обрахунків гідравлічної, електричної потужність та ККД системи

| Витрата води, л/с | Гідравлічна потужність, Вт | Електрична потужність, Вт |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0.00              | 0.00                       | 0.00                      |
| 0.10              | 1.96                       | 1.28                      |
| 0.20              | 3.92                       | 2.55                      |
| 0.30              | 5.89                       | 3.83                      |
| 0.40              | 7.85                       | 5.10                      |
| 0.50              | 9.81                       | 6.38                      |

|                         |       |       |
|-------------------------|-------|-------|
| 0.60                    | 11.77 | 7.65  |
| Продовження таблиці 3.2 |       |       |
| 0.70                    | 13.73 | 8.93  |
| 0.80                    | 15.70 | 10.20 |
| 0.90                    | 17.66 | 11.48 |
| 1.00                    | 19.62 | 12.75 |
| 1.10                    | 21.58 | 14.03 |
| 1.20                    | 23.54 | 15.30 |
| 1.30                    | 25.51 | 16.58 |
| 1.40                    | 27.47 | 17.85 |
| 1.50                    | 29.43 | 19.13 |

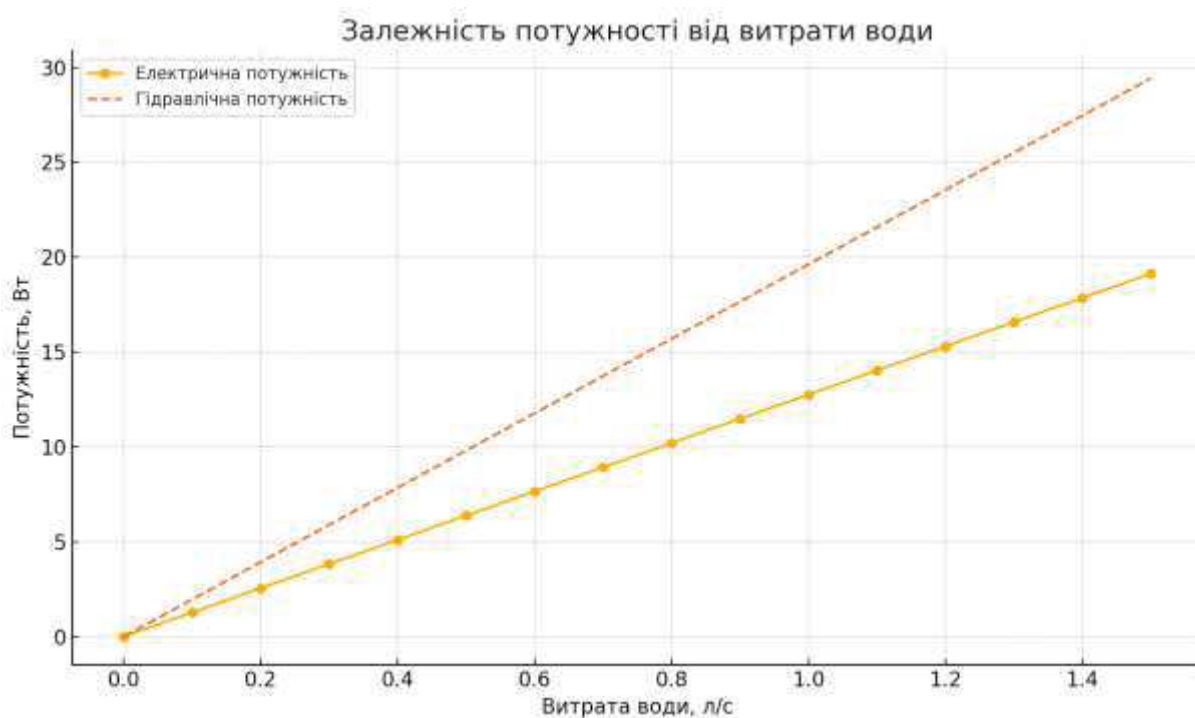


Рисунок 3.8 – Залежність потужності від витрат води

Висновок: При напорі 1.5 м, з витратою 1.5 л/с, труба 32 мм- реально отримуємо  $\approx 20$  Вт електричної потужності з однієї турбіни типу Френсіса:

Порівняння по турбінах:

|     |      |         |        |      |
|-----|------|---------|--------|------|
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|---------|--------|------|



надійності та ергономіки.

Проведено підбір необхідних матеріалів і компонентів для виготовлення вузлів установки, які забезпечують надійність експлуатації в умовах багатократного лабораторного використання.

Зроблено модель міні-ГЕС, яка дає змогу змінювати параметри гідравлічного потоку та досліджувати роботу різних типів турбін та генераторів.

Розроблено методику для проведення вимірювань. Дані вимірювань, розрахунків та приведених графіків залежності гідравлічних та енергетичних параметрів дозволяють оцінити вплив гідравлічних та електричних параметрів на ефективність роботи мініГЕС.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      | 57   |

## Висновки

В даній кваліфікаційній роботі поставлено завдання з розробка лабораторного установаки для дослідження параметрів роботи мініГЕС з метою вивчення гідравлічних, механічних та електричних характеристик системи, а також відпрацювання методики вимірювання ефективності перетворення енергії води у електричну.

Для цього зроблено аналіз перспектив використання мініГЕС в промисловості та побуті. У результаті аналізу було встановлено, що мініГЕС є перспективним джерелом енергії для промислового та побутового застосування завдяки автономності, екологічності та невеликим експлуатаційним витратам.

Розглянуто типи турбін (Пелтона, Френсіса, Каплана, осьові, шнекові), які потрібно вибирати залежно від умов: напору, витрати води та необхідної потужності. Приведено основні параметри ефективності мініГЕС і дано рекомендацію про їх поєднання для забезпечення стабільної роботи мініГЕС.

Аналіз лабораторних стендів показав, що вони ефективні для навчальних і дослідницьких цілей та дозволяють вивчати вплив гідравлічних параметрів на роботу мініГЕС.

На основі сформульованого технічного завдання визначено основні функціональні вимоги до лабораторної установаки: можливість дослідження різних типів турбін, варіативність режимів роботи, зручність вимірювання основних параметрів та безпечність експлуатації.

Розроблена структурна схема установаки передбачає поєднання всіх основних підсистем. Створено гідравлічну схему, конструкція якої дозволяє змінювати витрату та напір води, моделюючи різні гідрологічні умови. Розроблено електричну схему, яка дає змогу аналізувати характеристики перетворення гідравлічної енергії в електричну. Запроектовано систему збору даних, що забезпечує контроль основних вимірювальних параметрів. Розроблено комплекс заходів техніки безпеки при роботі з даною установакою.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 58   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

За допомогою САD-системи SolidWorks виконано тривимірне моделювання елементів лабораторної установки, зокрема турбіну. Це дозволило оптимізувати просторову компоновку і забезпечити відповідність конструкції вимогам надійності та ергономіки.

Проведено підбір необхідних матеріалів і компонентів для виготовлення вузлів установки, які забезпечують надійність експлуатації в умовах багатократного лабораторного використання.

Зроблено модель міні-ГЕС, яка дає змогу змінювати параметри гідравлічного потоку та досліджувати роботу різних типів турбін та генераторів.

Розроблено методику для проведення вимірювань. Дані вимірювань, розрахунків та приведених графіків залежності гідравлічних та енергетичних параметрів дозволяють оцінити вплив гідравлічних та електричних параметрів на ефективність роботи міні-ГЕС.



10. Енергетична оцінка потенціалу малої гідроенергетики України /EnergyUKraine. Мала гідроенергетика України. Технологічні звіти. -2018. - 120с.

11. Родрігес Л., Санчес Т. Designing And Building Mini And Micro Hydro Power Schemes: A Practical Guide. - Rugby: Practical Action Publishing, 2011. - 240 с.

12. Odu O. Feasibility Study of a Micro Hydro Power Plant for Rural Applications // International Journal of Renewable Energy Research. - 2020. - Vol. 10, No. 3. - P. 1095–1103.

13. Малопотужні насоси для води. Код доступу: <https://f.ua/ua/shop/gidronasosy>.

14. Генератори. Код доступу: [https://ru.made-in-china.com/co\\_lectstyle/product\\_12V-250W-DC-Pedal-Power-Stationary-Bike-Generator\\_eginhursg.html](https://ru.made-in-china.com/co_lectstyle/product_12V-250W-DC-Pedal-Power-Stationary-Bike-Generator_eginhursg.html).

15. Контрольно-вимірювальні прилади. Код доступу: <https://hansa-flex.in.ua/ua/g116863941-kontrolno-izmeritelnye-pribory>.

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 61   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

# Додатки

|     |      |         |        |      |                      |      |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |         |        |      | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |         |        |      |                      | 62   |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |                      |      |

