

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

Псюк Олександр Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК \_\_\_\_\_  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювального контролю параметрів  
роботи міні ГЕС на річці Чечва

(назва роботи)

інженерія Відновлювальної Енергетики

(назва освітньої програми)

ІВЕ

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня Псюк О.Р.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник к.т.н., доц. Миндюк В.Д.  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(посада)  
прізвище)

\_\_\_\_\_  
(підпис) (дата) (ініціали та

Івано-Франківська – 2025

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

Освітній

рівень \_\_\_\_\_ Бакалавра \_\_\_\_\_

Спеціальність \_152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_  
року

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

\_\_\_\_\_ Псюк Олександр Романович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розроблення інформаційно-вимірювального системи контролю параметрів роботи міні ГЕС на річці Чечва**

керівник роботи Миндюк В.Д., кандидат технічних наук, доцент \_\_\_\_\_,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "29"квітня 2025 року №268/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Дані діяльності Міні-ГЕС на річці Чечва \_\_\_\_\_

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

ВСТУП. РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС МІНІ ГЕС. РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІНІ-ГЕС. РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МІНІ-ГЕС. ВИ С Н О В К И

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Доцент Миндюк В.Д.	Перевірка на плагіат	Студент Псюк О.Р.
2	Доцент Яворський А.В.	Нормо контроль	Студент Псюк О.Р.

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС МІНІ ГЕС	<b>1.04.2025</b>	виконав
2	1.1 Роль та значення ГЕС у енергопостачанні		виконав
3	1.2 Основні завдання інформаційно-вимірювальної системи контролю робочих параметрів міні-ГЕС		виконав
4	РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІНІ-ГЕС	<b>1.05.2025</b>	виконав
5	2.1 Аналіз компонентів та параметрів гідротехнічного комплексу ГЕС		виконав
6	2.2 Опис віртуальної моделі для моніторингу стану даного стану обладнання міні ГЕС		виконав
7	2.3 Побудова моделі роботи гідротурбіни міні ГЕС		виконав
8	РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МІНІ-ГЕС	<b>1.06.2025</b>	виконав
9	3.1 Типи інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів роботи міні ГЕС		виконав
10	3.2 Система прийняття рішень та регуляції (MES/EMS-рівень)		виконав
11	3.3 Економічне обґрунтування модернізації міні ГЕС		виконав

Студент \_\_\_\_\_ Псюк О.Р.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Миндюк В.Д.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто питання розроблення інформаційно-вимірювальної системи для контролю параметрів роботи міні-гідроелектростанції (міні-ГЕС), розташованої на річці Чечва. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення стабільної, енергоефективної та безпечної роботи малих ГЕС в умовах зростання попиту на відновлювану енергію та кліматичних змін. Однією з ключових проблем є обмежена автоматизація моніторингу технологічних параметрів, що знижує ефективність роботи таких об'єктів.

У першому розділі роботи проаналізовано конструкційні особливості та принципи функціонування міні-ГЕС. Визначено основні параметри, які необхідно контролювати для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації - зокрема, витрату води, тиск, напругу, частоту, температуру обладнання, рівень води у водозбірнику тощо. Другий розділ присвячено побудові концептуальної інформаційно-вимірювальної системи контролю. Здійснено вибір принципових рішень щодо архітектури системи, способів збору, обробки та зберігання даних. Також сформовано математичну модель для моделювання взаємозв'язку параметрів і оцінки впливу змін на ефективність роботи ГЕС. У третьому розділі представлено практичну імплементацію системи: здійснено підбір сенсорів (давач струму, тиску, температури, витрати води, обертів тощо), розглянуто їх технічні характеристики, принцип дії та сумісність з обраною мікропроцесорною платформою. Розроблено базову архітектуру системи збору даних, запропоновано варіанти візуалізації результатів. Проведено попередню оцінку економічної ефективності впровадження системи контролю для міні-ГЕС.

У результаті виконання роботи обґрунтовано доцільність впровадження інформаційно-вимірювальної системи на міні-ГЕС, що дозволяє підвищити надійність, автоматизувати процес експлуатації та покращити енергетичну ефективність.

**Ключові слова:** міні-ГЕС, інформаційно-вимірювальна система, моніторинг параметрів, автоматизація, сенсори, ефективність.

## ABSTRACT

This work addresses the development of an information and measurement system for monitoring the operational parameters of a small hydroelectric power plant (mini-HPP) located on the Chechva River. The relevance of the study stems from the need to ensure stable, energy-efficient, and safe operation of small hydro facilities in the context of growing demand for renewable energy and climate change. One of the key challenges is the limited automation of technological parameter monitoring, which reduces the overall efficiency of such installations.

The first chapter of the study analyzes the structural features and operating principles of mini-HPPs. Key parameters necessary for safe and efficient operation are identified, including water flow rate, pressure, voltage, frequency, equipment temperature, and water level in the reservoir. The second chapter is devoted to the design of the conceptual information and measurement control system. It includes the selection of architectural solutions for data collection, processing, and storage. A mathematical model is also developed to simulate the interrelation of parameters and evaluate their impact on the overall efficiency of the plant. The third chapter presents the practical implementation of the system. It includes the selection of sensors (current, pressure, temperature, water flow, rotational speed, etc.), an overview of their technical specifications and operating principles, and their compatibility with the chosen microcontroller platform. The basic system architecture is outlined, and data visualization solutions are proposed. A preliminary assessment of the economic feasibility of implementing the control system for the mini-HPP is also conducted.

As a result of this research, the feasibility of implementing an information and measurement control system for a mini-HPP is substantiated, with the goal of improving operational reliability, automating processes, and enhancing energy efficiency.

**Keywords:** mini-HPP, information and measurement system, parameter monitoring, automation, sensors, efficiency.

## **Зміст**

<b>Зміст</b>	<b>6</b>
<b>Вступ</b>	<b>7</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС МІНІ ГЕС</b>	<b>9</b>
1.1 Роль та значення ГЕС у енергопостачанні	9
1.2 Типи та характеристика міні ГЕС в Україні	14
1.3 Основні завдання інформаційно-вимірювальної системи контролю робочих параметрів міні ГЕС	17
<b>РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІНІ-ГЕС</b>	<b>25</b>
2.1 Аналіз компонентів та параметрів гідротехнічного комплексу ГЕС	25
2.2 Створення віртуальної моделі для моніторингу стану обладнання міні ГЕС	33
2.3 Аналіз діяльності обладнання міні ГЕС	38
<b>РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МІНІ-ГЕС</b>	<b>48</b>
3.1 Характеристика інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів роботи міні ГЕС	48
3.2 Система прийняття рішень автоматизованих рішень в інформаційно-вимірювальній системі	52
3.3 Ефективність інтеграції інформаційно-вимірювальних приладів(ІВП)	62
<b>Висновки</b>	<b>67</b>
<b>Список використаної літератури</b>	<b>69</b>

## ВСТУП

У сучасних умовах глобального потепління, енергетичної нестабільності та зростання попиту на відновлювані джерела енергії особливої важливості набуває ефективне та безпечне використання малих гідроелектростанцій (міні-ГЕС). Однією з ключових проблем у функціонуванні таких об'єктів є недостатній рівень автоматизованого контролю та моніторингу робочих параметрів, що може призводити до зниження ефективності, аварій та перевитрати ресурсів.

Річка Чечва, як потенційне джерело гідроенергії, є перспективним об'єктом для впровадження сучасної інформаційно-вимірювальної системи контролю. Така система дозволяє в реальному часі здійснювати контроль за ключовими параметрами - витратою води, тиском, напругою, струмом, температурою обладнання - з метою забезпечення стабільної та енергоефективної роботи міні-ГЕС.

Мета роботи. Дослідити та обґрунтувати ефективну інформаційно-вимірювальну систему контролю параметрів роботи міні-гідроелектростанції на річці Чечва для підвищення її ефективності, надійності та автоматизації процесів експлуатації.

Завдання дослідження:

- проаналізувати особливості роботи міні-ГЕС та вимоги до моніторингу її основних параметрів;
- визначити перелік ключових параметрів, що підлягають контролю;
- обґрунтувати вибір технічних засобів вимірювання та збору даних;
- реалізувати програмну частину для збору, обробки та візуалізації даних;
- оцінити ефективність впровадженої системи .

Об'єкт дослідження: інформаційно-вимірювальна система для контролю параметрів на міні-гідроелектростанції.

Предмет дослідження: методи інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів, що впливають на ефективність і безпеку експлуатації міні-ГЕС (наприклад, витрата води, напруга, частота, температура генератора, рівень води тощо).

Методи дослідження: аналіз технічної документації - для вивчення характеристик обладнання міні-ГЕС; методи математичного моделювання - для розрахунку параметрів та їх оптимізації; методи системного аналізу - для визначення структури й функцій ІВК-системи; проектування мікропроцесорних систем - для вибору апаратної частини; програмування та візуалізація - для розробки інтерфейсу користувача та обробки даних.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС МІНІ ГЕС

### 1.1 Роль та значення ГЕС у енергопостачанні

Гідроелектростанція (ГЕС) – це вид електростанції, що використовує енергію води для виробництва електроенергії. Вона є одним із найстаріших і найпоширеніших джерел відновлюваної енергії, оскільки використовує природний кругообіг води в природі. Основний принцип роботи ГЕС полягає в перетворенні потенціальної енергії води в механічну, а потім у електричну. Вода накопичується у водосховищах або природних водоймах, після чого через водоводи спрямовується на турбіни. Потік води обертає лопаті турбіни, яка з'єднана з генератором, що виробляє електроенергію[1]. Однією з головних переваг гідроенергетики є її екологічність, оскільки виробництво електроенергії на ГЕС не супроводжується викидами шкідливих речовин у атмосферу, як це відбувається на теплових електростанціях. Крім того, гідроелектростанції забезпечують стабільне та безперервне електропостачання, що є ключовим чинником для підтримання енергетичної безпеки держави. Завдяки можливості постійного контролю об'ємів виробленої електроенергії, вони дозволяють уникнути перебоїв у подачі струму, що особливо важливо в умовах підвищеного навантаження на енергосистему або надзвичайних ситуацій. Така стабільність критично необхідна для роботи промислових комплексів, транспортної інфраструктури, медичних закладів, шкіл, державних установ і житлових масивів. На відміну від альтернативних джерел енергії, таких як сонячні або вітрові електростанції, робота яких безпосередньо залежить від природних умов — наявності сонячного світла або вітру, — гідроелектростанції можуть працювати цілодобово, протягом усього року. Вони не схильні до різких коливань у виробництві енергії, тому є більш надійним джерелом базового навантаження для енергосистеми. Крім того, гідроелектростанції відіграють важливу роль у регулюванні пікових навантажень — періодів, коли попит на електроенергію суттєво зростає, наприклад, уранці та ввечері. Завдяки

накопиченню води у водосховищах, гідроелектростанції можуть оперативно запускати додаткові турбіни й виробляти більше енергії саме тоді, коли це найбільше потрібно. Це дозволяє уникати аварійних відключень і зберігати стабільність усього енергетичного сектору. Ще однією перевагою є можливість швидкого запуску та зупинки агрегатів, що є технічно складним або навіть неможливим для багатьох інших типів електростанцій. Завдяки цьому гідроелектростанції можуть використовуватись також як резервне джерело енергії, яке швидко компенсує раптові втрати потужності в енергомережі. Таким чином, гідроелектростанції не лише забезпечують сталу генерацію електроенергії, але й сприяють ефективному управлінню всією енергосистемою, підвищуючи її гнучкість, надійність та адаптивність до змін у споживанні.

ГЕС також може використовуватися для регулювання рівня води в річках, зменшення ризику повеней та забезпечення водопостачання для сільського господарства. Проте будівництво гідроелектростанцій має і свої недоліки, зокрема значний вплив на навколишнє середовище. Зведення гребель змінює природний стік річок, що може призводити до затоплення великих територій, змін у місцевій екосистемі та вимушеного переселення населення. Крім того, ГЕС залежать від рівня води у водоймах, що може змінюватися внаслідок кліматичних змін або сезонних коливань. Одним з варіантів розв'язання цих проблем є будівництво малих гідроелектростанцій або дериваційних ГЕС, які мають менший вплив на довкілля та можуть забезпечувати електроенергією віддалені регіони. Важливо зазначити, що гідроелектростанції є лише одним із видів відновлюваної енергетики, до якої також належать сонячні, вітрові, геотермальні та біоенергетичні установки. Головна відмінність ГЕС від інших видів відновлюваної енергетики полягає у високій надійності та можливості регулювання виробництва електроенергії. Сонячні та вітрові електростанції виробляють електроенергію лише за сприятливих погодних умов, тоді як ГЕС може працювати цілодобово, якщо є достатній рівень води. Однак будівництво великих гідроелектростанцій вимагає значних фінансових витрат і часу, що робить їх менш гнучкими у порівнянні з іншими видами ВДЕ (відновлюваних

джерел енергії). Загалом гідроенергетика є однією з найперспективніших галузей у сфері екологічно чистої енергетики, адже вона дозволяє скоротити залежність від викопного палива та зменшити викиди парникових газів. У багатьох країнах світу ГЕС є основним джерелом електроенергії, що сприяє енергетичній незалежності та стабільності. Майбутнє гідроенергетики залежить від подальшого розвитку технологій, зменшення впливу на навколишнє середовище та інтеграції з іншими видами ВДЕ, такими як акумуляторні системи зберігання енергії.

Гідроелектростанції відіграють важливу роль в енергопостачанні завдяки своїм унікальним характеристикам. Вода є прогнозованим і керованим ресурсом, що дозволяє підтримувати стабільність електромереж. Важливим аспектом є також можливість регулювання енергетичних потоків: ГЕС можуть швидко змінювати потужність виробництва електроенергії, що робить їх ідеальними для балансування навантаження в енергосистемі. Під час пікових навантажень вони можуть оперативно збільшувати виробництво, а в періоди низького споживання – зменшувати. Крім того, ГЕС є екологічно чистим джерелом енергії, оскільки їхнє виробництво не супроводжується викидами вуглекислого газу та інших шкідливих речовин[9]. Це допомагає зменшити негативний вплив на довкілля та сприяє боротьбі зі змінами клімату. Економічна ефективність також є важливим фактором: хоча будівництво ГЕС потребує значних початкових капіталовкладень, їх експлуатація є відносно дешевою, оскільки вони використовують безкоштовний природний ресурс – воду. До того ж термін служби ГЕС може перевищувати 50–100 років, що робить їх вигідними у довгостроковій перспективі. Окрім виробництва електроенергії, гідроелектростанції виконують важливу функцію водо регулювання та захисту від повеней. Водосховища, створені при будівництві ГЕС, допомагають контролювати рівень води в річках, запобігаючи повеням і забезпечуючи зрошення для сільського господарства. Таким чином, ГЕС не лише сприяють енергетичній стабільності, а й відіграють важливу роль у регулюванні водних ресурсів і захисті навколишнього середовища.

Гідроелектростанції (ГЕС) мають ряд переваг і недоліків у порівнянні з іншими джерелами енергії, зокрема традиційними (вугілля, газ, атомна енергетика) та відновлюваними (сонячна, вітрова, геотермальна, біоенергетика)[13], що представлено у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Порівняння ГЕС із традиційними джерелами енергії

Параметр	ГЕС	ТЕС (вугілля, газ)	АЕС
Екологічність	Відсутні викиди CO <sub>2</sub> , можливий вплив на річкові екосистеми	Високі викиди парникових газів	Майже відсутні викиди, але є ядерні відходи
Стабільність	Висока, але залежить від рівня води	Висока, може працювати безперервно	Висока, але складне регулювання потужності
Вартість будівництва	Дуже висока	Відносно низька	Найвища серед усіх
Вартість виробництва	Низька після запуску	Висока через вартість палива	Середня
Безпека	Висока, але ризик прориву греблі	Викиди та ризику аварій	Ризик радіоактивного забруднення у разі аварії
Час будівництва	Довгий (5–15 років)	Відносно короткий (2–5 років)	Дуже довгий (10+ років)

Таблиця 1.2- Порівняння ГЕС із іншими відновлюваними джерелами енергії

Параметр	ГЕС	Сонячна енергетика	Вітрова енергетика	Геотермальна енергетика	Біоенергетика
1	2	3	4	5	6
Екологічність	Мінімальні викиди, можливий вплив на річки	Виробництво панелей шкідливе для довкілля	Впливає на міграцію птахів і шумове забруднення	Мінімальний вплив	Можливі викиди CO <sub>2</sub> при спалюванні

1	2	3	4	5	6
Стабільність	Висока, але залежить від рівня води	Низька, залежить від погоди	Низька, залежить від сили вітру	Висока, може працювати постійно	Висока, але залежить від сировини
Вартість будівництва	Висока	Відносно низька	Середня	Висока	Середня
Вартість виробництва	Низька після запуску	Падає, але залежить від зношення панелей	Падає, але залежить від обслуговування	Низька	Середня
Термін служби	50+ років	20–30 років	20–25 років	30+ років	20–50 років
Гнучкість потужності	Висока	Низька	Низька	Середня	Висока

ГЕС є одним із найнадійніших і стабільних джерел енергії серед відновлюваних джерел, оскільки вони можуть виробляти електроенергію незалежно від погодних умов, на відміну від сонячних і вітрових станцій. Водночас, їх будівництво є дорогим, довготривалим і має певний екологічний вплив, пов'язаний із затопленням територій. У порівнянні з традиційними електростанціями, ГЕС вигідніші в довгостроковій перспективі, оскільки не залежать від викопного палива і не створюють значних викидів парникових газів. Вибір між ГЕС та іншими джерелами енергії залежить від природних умов, економічної доцільності та екологічних пріоритетів регіону.

Міні-ГЕС є ефективним джерелом відновлюваної енергії, що використовує енергію малих річок або водних потоків для виробництва електроенергії. Вони мають низку переваг, зокрема екологічність, оскільки їхнє будівництво не потребує створення великих водосховищ і мінімально впливає на природний баланс річок. Крім того, міні-ГЕС відзначаються низькою вартістю експлуатації, оскільки після запуску вони не потребують значних фінансових вкладень, а їхнє основне джерело енергії – вода – є безкоштовним. Важливою перевагою є також

забезпечення енергетичної незалежності локальних громад і віддалених населених пунктів, що дозволяє зменшити залежність від централізованих електромереж. Міні-ГЕС мають порівняно короткий термін будівництва, що становить у середньому від одного до трьох років, на відміну від великих гідроелектростанцій, які можуть будуватися десятиліттями. Завдяки компактності та технологічній гнучкості їх можна розміщувати на малих річках, іригаційних каналах чи навіть водопровідних системах, використовуючи вже наявні гідротехнічні споруди. Додатковою перевагою є можливість автономної роботи, що особливо корисно для підприємств, фермерських господарств чи віддалених регіонів. Однак, незважаючи на переваги, міні-ГЕС мають і певні недоліки. Їхня потужність обмежена, тому вони не можуть забезпечити великі міста або промислові об'єкти достатньою кількістю електроенергії. Робота таких станцій залежить від сезонних коливань рівня води, що може спричиняти зменшення виробництва електроенергії в посушливі періоди. Хоча вони мають менший вплив на довкілля, все ж втручання у природний водний потік може змінювати екосистему річки, впливати на рибні ресурси та водну фауну. Крім того, початкові капіталовкладення в будівництво можуть бути значними, особливо якщо необхідно модернізувати інфраструктуру або провести лінії електропередачі до місця споживання. Незважаючи на ці виклики, міні-ГЕС залишаються важливим компонентом розвитку відновлюваної енергетики, забезпечуючи стабільне, екологічне та доступне джерело електроенергії для багатьох регіонів.

## **1.2 Типи та характеристика міні ГЕС в Україні**

Гідроенергетика відіграє дедалі важливішу роль у становленні систем відновлюваної енергетики, забезпечуючи близько 76% від загального обсягу світового виробництва енергії з поновлюваних джерел. Цей сектор демонструє стабільну тенденцію до зростання, щороку збільшуючи встановлені потужності приблизно на 2–3%. Згідно з прогнозами Всесвітньої енергетичної ради, до 2050

року встановлена потужність гідроелектростанцій може зрости вдвічі й сягнути 2000 ГВт. Із загального обсягу встановлених потужностей ГЕС у світі (1098 ГВт, без урахування гідроакумулюючих станцій), близько 11% становлять малі ГЕС потужністю від 1 до 10 МВт, а понад 3% — мікро- та міні-ГЕС з потужністю менше 1 МВт (за даними 2016 року). Світова практика свідчить, що поряд зі зростанням великих і середніх ГЕС відбувається активний розвиток малої гідроенергетики. Це відкриває значні можливості для України, зокрема у впровадженні мікро- та міні-ГЕС потужністю до 1 МВт як одного з перспективних напрямів розвитку енергетичного сектору.

За оцінками ІВЕ НАНУ, найбільший потенціал розвитку має вітрова енергетика, встановлені потужності якої можуть сягнути 10 ГВт у 2030 році, а річні обсяги виробництва електроенергії – 30 тис ГВт/год. Потенціал сукупного виробництва електроенергії з ВДЕ складає 45,5 тис. ГВт/год. Результати оцінки потенціалу виробництва електроенергії та встановлених потужностей з ВДЕ прогнозом на 2030 рік наведені на рис.1.1, зокрема, прогнозується досягнення виробництва електроенергії малою гідроенергетикою до 0,6 млрд. кВт·год/рік та встановлена потужність малих ГЕС сягне 0,25 ГВт.

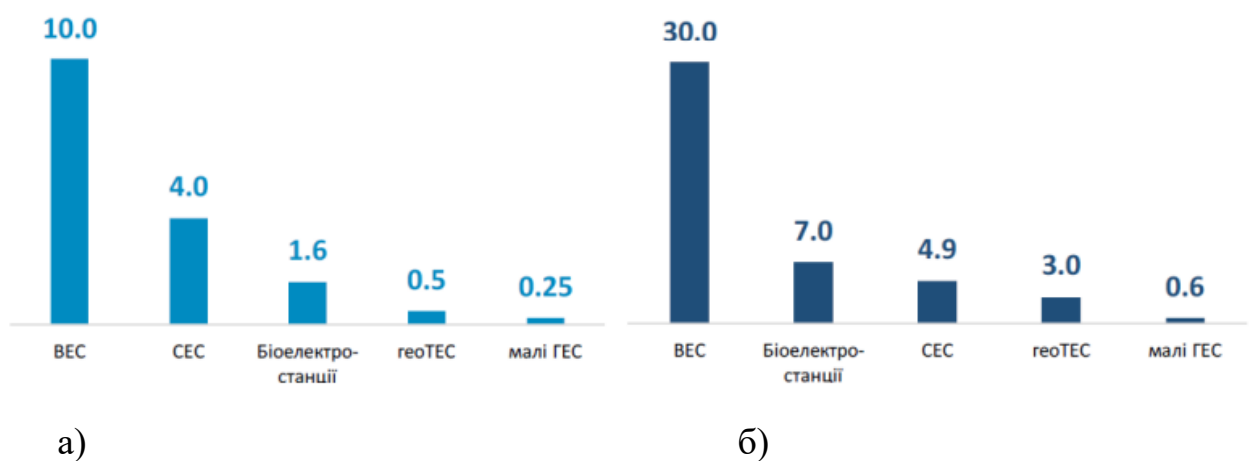


Рисунок 1.1 – Оцінка потенціалу відновлювальних джерел в Україні [1]  
 а) Оцінка потенціалу встановлених потужностей з ВДЕ у 2030 році, всього 16,35 ГВт Рис. 3.10.  
 б) Оцінка потенціалу виробництва електроенергії з ВДЕ у 2030 році, всього 45,5 тис ГВт·год

Це свідчить, що розвиток гідроенергетики на базі міні ГЕС є досить перспективною[7]. Карпатський регіон є досить зручним для будівництва міні ГЕС. Розподіл енергетичного потенціалу (загальний, технічний та економічний доцільний) малих річок загалом по Україні та її областям наведено на рис. 1.2. За результатами проведених досліджень технічний потенціал малих річок оцінено на рівні 1270 млн кВт·год/рік (близько 375 МВт встановленої потужності малих ГЕС). Розподіли потенціалу за гідрологічними зонами та за адміністративно-територіальним устроєм країни наведено нижче на ілюстраціях[12]. Найбільшими значеннями технічного потенціалу характеризуються Закарпатська (35 %), Івано-Франківська (16 %), Львівська (12 %), Чернівецька (6 %), Вінницька (6 %) і Кіровоградська (4 %) області. Найменші значення притаманні Одеській (0,37 %), Волинській (0,27 %) областям, АР Крим (0,25 %) та Херсонській (0,19 %), Чернігівській (0,15 %), Запорізькій (0,06 %) областям.

Станом на середину 2024 року в Україні перебувають в експлуатації 182 малі ГЕС загальною встановленою потужністю 122 МВт із середньорічним обсягом виробництва електроенергії близько 280 млн кВт·год/рік.

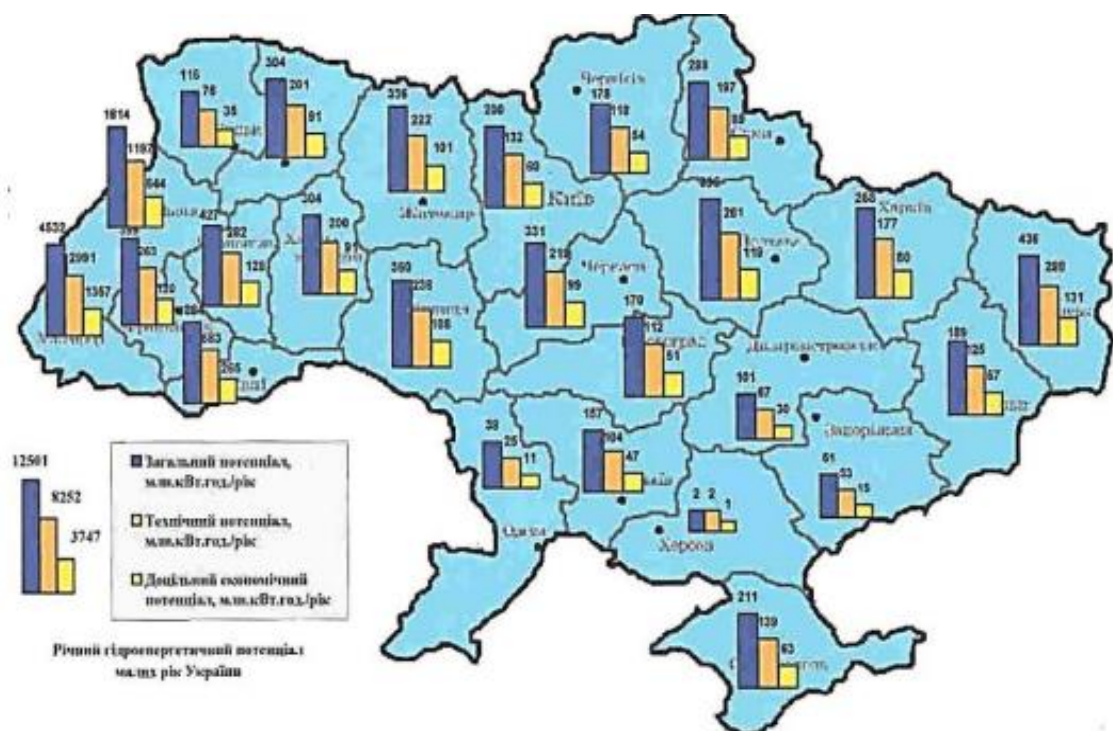


Рисунок 1.2 - Річний гідроенергетичний потенціал малих річок за областями України [2]

На рисунку 1.3 представлено зображення міні ГЕС



Рисунок 1.3 – Міні ГЕС

Таким чином, розвиток міні гідроенергетики створює додатковий потенціал для розвитку відновлювальної енергетики в Україні

### **1.3 Основні завдання інформаційно-вимірювальної системи контролю робочих параметрів міні-ГЕС**

Система контролю параметрів роботи міні-ГЕС є невід'ємною частиною системи управління, яка забезпечує ефективне та безпечне функціонування станції. Така система дозволяє постійно моніторити усі основні показники роботи станції, забезпечуючи її оптимізацію та попередження технічних проблем. Оскільки міні-ГЕС зазвичай працюють у віддалених районах, де доступ до станцій може бути обмежений, ефективний контроль параметрів стає критично важливим. Система контролю дозволяє операторам отримувати в

реальному часі дані про рівень води, витрати води, швидкість потоку, температуру турбін і генераторів, а також важливі електричні параметри, такі як напруга, струм, частота. Це дозволяє стежити за стабільністю роботи станції і своєчасно реагувати на будь-які відхилення від нормальних режимів.

Система має кілька ключових завдань. Перше — це забезпечення стабільності роботи міні-ГЕС, оскільки навіть незначні коливання у рівні води або параметрах потоку можуть призвести до зниження потужності або навіть зупинки генерації. Інформаційно-вимірювальні системи постійно контролюють ці показники, дозволяючи операторам вчасно коригувати роботу турбін або генераторів, оптимізуючи енергетичний процес. Наприклад, за допомогою автоматичних регулювальних механізмів можна змінювати швидкість обертання турбін відповідно до змін витрат води або потреб споживачів електроенергії.

Друге важливе завдання системи — це забезпечення безпеки станції. Міні-ГЕС можуть бути піддані ризикам, таким як перегрів обладнання, перевантаження турбін або вихід з ладу генераторів [3]. Система контролю здатна виявляти такі аномалії на ранніх етапах, що дозволяє уникнути серйозних поломок або аварій. Наприклад, якщо температура на виході з турбіни перевищує допустимі значення, система автоматично відключає відповідну частину обладнання, запобігаючи перегріву. У разі виявлення аномальних вібрацій чи зміни тиску система може сигналізувати про необхідність проведення технічного огляду або припинити роботу турбіни для запобігання серйозним поломкам.

Третім важливим аспектом є забезпечення моніторингу та аналізу роботи міні-ГЕС. Дані з різних датчиків передаються на центральний сервер або віддалену диспетчерську станцію, де оператори можуть аналізувати поточний стан станції та робити прогнози щодо її роботи в майбутньому. Це дозволяє проводити детальне планування щодо технічного обслуговування, оптимізації процесів виробництва електроенергії, а також дає змогу передбачити майбутні зміни в режимі роботи, зокрема через зміни рівня води чи потоку. Аналіз даних

допомагає також виявляти невикористані можливості для покращення ефективності виробництва та зниження витрат.

Додатково, завдяки інтеграції інформаційно-вимірювальної системи з автоматичними регулювальними механізмами, можна досягти високого рівня автономії міні-ГЕС. Це особливо важливо для віддалених регіонів, де станція може працювати без постійного нагляду. Система сама коригує роботу турбін, регулює витрати води та електричні параметри, щоб зберігати стабільність енергопостачання, навіть коли персонал знаходиться на великій відстані.

Система контролю також дозволяє здійснювати захист від аварійних ситуацій, може автоматично виявляти неполадки, що дозволяє мінімізувати час простою та зменшити ймовірність серйозних поломок. Якщо параметри виходять за межі допустимих значень, система негайно сповіщає персонал, і вживаються відповідні заходи для відновлення нормальної роботи.

Важливим аспектом є здатність системи забезпечити точне вимірювання і облік виробленої електроенергії. Це дозволяє контролювати виробничі витрати та отримувати дані для оцінки ефективності роботи станції. Чіткий облік енергетичних показників також важливий для належного управління та планування подальших етапів експлуатації міні-ГЕС.

Загалом, інформаційно-вимірювальний контроль є основою для стабільної та безпечної роботи міні-ГЕС, що дозволяє значно підвищити ефективність їх функціонування та забезпечити стійке постачання електроенергії в будь-яких умовах.

Для визначення точності та похибки вимірювань використовують такі характеристики:

1. Точність характеризується величиною похибки: Це основні характеристики, що визначають якість вимірювань, які виконуються давачами і приладами. Точність вимірювання визначається як ступінь наближення результату вимірювання до істинного значення, в той час як похибка вимірювання — це різниця між результатом вимірювання і його істинним значенням. Важливо, щоб давачі мали низьку похибку для забезпечення точного

контролю та надійності роботи міні-ГЕС. Похибка вимірювань може бути викликана різними факторами, такими як умови навколишнього середовища, знос обладнання чи електричні перешкоди.

2. Регуляція рівнів в резервуарах: Для ефективної роботи міні-ГЕС необхідно підтримувати постійний рівень води в резервуарах, щоб забезпечити оптимальний потік води до турбін. Для цього використовуються рівнеміри та автоматичні системи регулювання, які контролюють рівень води в реальному часі. Система регулювання має бути здатною коригувати рівень води в залежності від змін у споживанні енергії або коливань природних умов (наприклад, рівень опадів або витрати води). Це дозволяє оптимізувати роботу станції та забезпечити стабільну генерацію енергії, запобігаючи переливам або недостатці води в системі.

Для забезпечення точної та стабільної роботи інформаційно-виміральної системи (ІВС) міні-ГЕС використовуються високоточні датчі рівня води, температури та тиску, що працюють у поєднанні з системами автоматичного калібрування, цифрової фільтрації сигналів та виявлення аномальних відхилень, що дозволяє мінімізувати похибки вимірювань і забезпечити надійне регулювання рівнів у резервуарах згідно з поточними умовами експлуатації.

На рис. 1.4 представлено інтеграцію вимірвальних приладів у інформаційно-вимірвальну систему міні ГЕС.

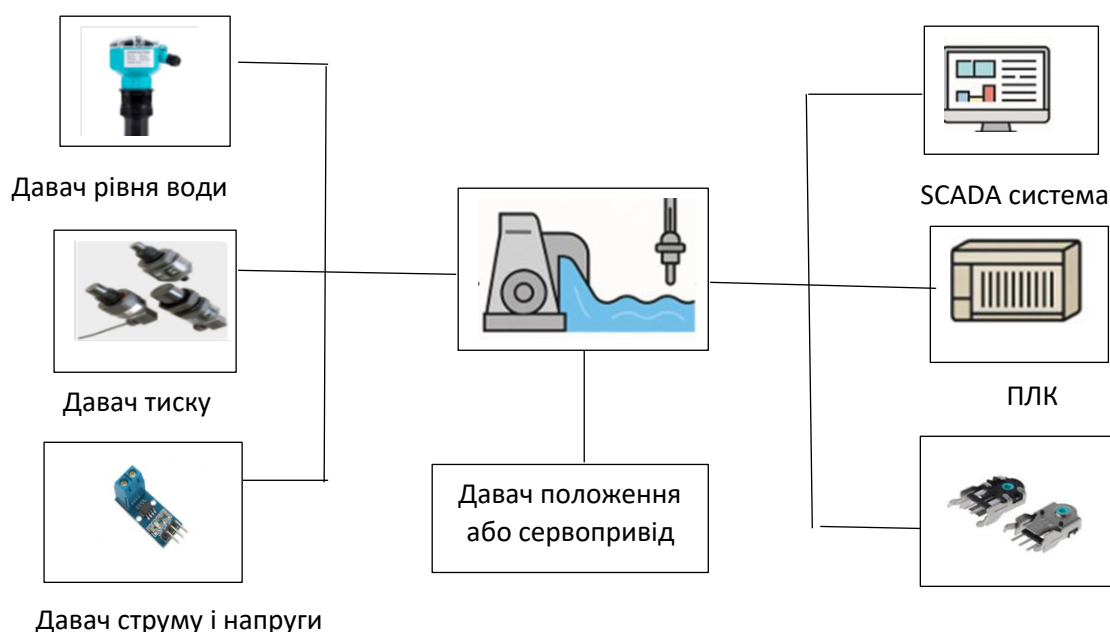


Рисунок 1.4 – Інтеграція вимірювальних приладів у інформаційно-вимірювальну системи міні ГЕС

У табл. 1.3 представлено типові давачі зі схеми інтеграції ІВС міні-ГЕС

Таблиця 1.3 - Типові давачі інформаційно-вимірювальній системі (ІВС) міні-ГЕС

№	Назва давачі	Зображення	Основні характеристики	Місце використання в ІВС міні-ГЕС
1	Ультразвуковий давач рівня		- Діапазон: 0.5–10 м - Вихід: 4–20 мА або RS-485 - Безконтактне вимірювання	Контроль рівня води у водосховищі або напірному резервуарі
2	Давач тиску (трансмітер)		- Діапазон: до 16 МПа - Вихід: 4–20 мА - Ступінь захисту: IP65 або вище	Вимірювання тиску води перед турбіною
3	Давач температури Pt100 (термометр опору)		Діапазон вимірювання зазвичай –50 °С до +300 °С (можливо до +600 °С у спеціальному виконанні)	Вимірювання температури води, масла, підшипників або генератора. Використовується для моніторингу режимів роботи та запобігання перегріву
4	Компактний ультразвуковий сенсор		- Діапазон: до 2 м - Інтерфейс: RS-485/Modbus - Компактний корпус	Альтернативне або локальне вимірювання рівня води у вузьких каналах або резервуарах
5	Давачі струму на ефекті Холла (наприклад, ACS712)		Діапазон струму: Залежить від моделі — ±5А, ±20А, ±30А	Вимірювання змінного та постійного струму (AC/DC)

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) міні-гідроелектростанції призначена для автоматизованого контролю параметрів, що визначають

ефективність, безпеку та стабільність роботи обладнання. Усі основні фізичні процеси, пов'язані з подачею води, роботою турбіни, генератора та допоміжних систем, постійно відслідковуються за допомогою комплексу давачів і сенсорів, підключених до системи керування.

До складу ІВС входять ультразвукові давачі рівня, які безконтактно вимірюють рівень води у водосховищі, водоприймачах і напірних трубопроводах. Це дозволяє точно визначити доступний напір і забезпечити оптимальну подачу води на турбіну. Давачі тиску, як-от тензометричні або електронні перетворювачі тиску, встановлюються на основних магістралях подачі води до турбіни, а також у системах змащення. Вони контролюють гідравлічні навантаження, виявляють зниження тиску або надлишковий тиск, що може бути ознакою засмічення, пошкодження трубопроводу або несправності насоса.

Температурні давачі, зокрема термопари або термометри опору типу Pt100, використовуються для контролю температури підшипників генератора, масла, охолоджуючої води та інших компонентів. Це необхідно для своєчасного виявлення перегріву та уникнення аварій. Компактні сенсори, зокрема малі ультразвукові або ємнісні, застосовуються для контролю рівнів у дренажних ємностях, резервуарах з мастилом або в системах очищення.

Усі сигнали з давачів надходять до програмованого логічного контролера (ПЛК), де дані обробляються, фільтруються і аналізуються згідно з заданими алгоритмами. У випадку виходу параметра за межі допустимого діапазону, система формує попередження або аварійний сигнал. Дані також виводяться на операторську панель (HMI) або SCADA-систему, де відображаються в режимі реального часу у вигляді числових значень, графіків або діаграм. Усі вимірювання архівуються, що дозволяє проводити аналіз ефективності роботи станції за періоди часу.

Крім локального відображення, ІВС також може бути підключена до зовнішніх систем через мережу або мобільний зв'язок, що дозволяє інженерам

моніторити стан обладнання дистанційно, отримувати повідомлення про аварії або планувати технічне обслуговування.

Таким чином, ІВС міні-ГЕС є невід'ємною частиною сучасної автоматизованої гідроелектростанції, яка забезпечує точний контроль параметрів, безпечну роботу обладнання, підвищення енергоефективності та зменшення ризику аварій.

### **Висновки до першого розділу**

У першому розділі обґрунтовано значення міні гідроелектростанцій у енергопостачанні країни. Міні ГЕС відіграють важливу роль в енергопостачанні завдяки своїм унікальним характеристикам. Вода є прогнозованим і керованим ресурсом, що дозволяє підтримувати стабільність електромереж. Важливим аспектом є також можливість регулювання енергетичних потоків: ГЕС можуть швидко змінювати потужність виробництва електроенергії, що робить їх ідеальними для балансування навантаження в енергосистемі.

Розглянуто потенціал міні ГЕС в Україні. Звернено увагу на те, що західні області України, у зв'язку із гірською поверхнею мають високий потенціал енергогенерації на основі міні ГЕС.

Представлено інформаційно-вимірювальну систему для моніторингу і контролю за параметрами роботи міні ГЕС. Охарактеризовано основні давачі, які можуть бути інтегровані у дану систему.

На основі аналізу об'єкту дослідження та використання теоретичних знань щодо функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів обладнання міні ГЕС передбачено такі завдання подальших досліджень:

На основі аналізу сучасного стану автоматизованих систем моніторингу та керування в міні-ГЕС, а також з урахуванням актуальних вимог до ефективності, надійності та екологічності енергооб'єктів, у подальших розділах роботи передбачається вирішити такі дослідницькі завдання:

1. Обґрунтувати принципові технічні рішення щодо побудови інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для контролю параметрів роботи міні-ГЕС з урахуванням специфіки технологічного процесу та вимог до автоматизації.

2. Розробити структурну схему ІВС, яка охоплює повний цикл – від збору даних сенсорами до їхньої обробки, візуалізації та прийняття керуючих рішень, з акцентом на модульність та масштабованість системи.

3. Побудувати математичну модель роботи основного обладнання міні-ГЕС, зокрема гідротурбіни, з метою дослідження впливу різних параметрів на ефективність функціонування станції.

4. Реалізувати концепцію автоматизованого прийняття рішень у реальному часі, з використанням вхідних даних з датчиків і аналітичних алгоритмів прогнозування навантаження, тиску, температури тощо.

5. Розробити інтерфейс користувача та модулі звітності, що забезпечать зручну візуалізацію та підтримку експлуатаційного обслуговування системи.

6. Запропонувати заходи з удосконалення ІВС, зокрема впровадження витратоміра, моніторинг температури підшипників, контроль вібрацій і точне регулювання лопатей турбіни для зниження аварійності та підвищення ККД.

7. Оцінити потенціал інтеграції ІВС у сучасні енергетичні інфраструктури.

## РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІНІ-ГЕС

### 2.1 Аналіз компонентів та параметрів гідротехнічного комплексу ГЕС

Сучасна автоматизована міні ГЕС вимагає наявності великої кількості технічних рішень, які можливі за рахунок наявності сучасного обладнання, зокрема інформаційно-вимірального.

На рисунку 2.1 зображено діаграму взаємодії різного роду компонентів системи, передачі даних, їх обробки та агрегатів гідроелектростанції.

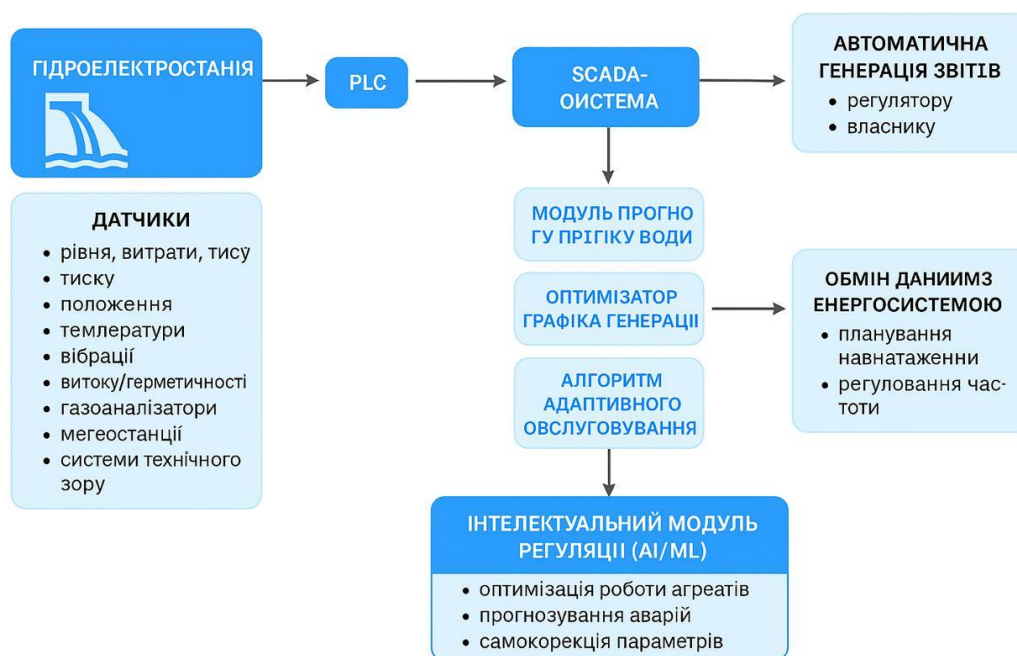


Рисунок 2.1 - Схематичне зображення інформаційного забезпечення міні ГЕС

В гідротехнічний комплекс водосховища входять наступні споруди:

- чаша водосховища;
- земляна гребля;
- водоскид із водосховища;
- основний водозабір;
- резервний водозабір;

Водоскид із водосховища складається із ряду гідротехнічних споруд:

- підводний канал;
- верхня водозливна гребля, в лівобережному стояку якої влаштовано основний водозабір;
- середня водозливна гребля;
- нижня водозливна гребля;
- відвідний канал.

Основні показники водосховища для міні ГЕС представлено у табл. 2.1.

Таблиця – 2.1 Основні показники водосховища для міні ГЕС

Показник	Скорочення	Значення
Відмітка максимального підпертого рівня	МПР	366.70м
Відмітка нормального підпертого рівня	НПР	365.00м
Відмітка рівня мертвого об'єму	РМО	360.60м
Об'єм водосховища по проекту	ОВ	
- при максимально підпертому рівні		18,6 млн.м <sup>3</sup>
- при нормально підпертому рівні		12,08 млн.м <sup>3</sup>
Мертвий об'єм водосховища при рівні мертвого об'єму	МОВ	4,5 млн.м <sup>3</sup>
Корисний об'єм регулювання	КОР	7,58 млн.м <sup>3</sup>
Площа водяного дзеркала при НПР	ПВД	228,1 га
Площа водяного дзеркала при РМО	ПВД	120,0 га
Корисна водовіддача із водосховища в році 95% забезпеченості	КВізД	1,1 м <sup>3</sup> /сек

Техніко-економічні показники діяльності міні ГЕС представлено у таблиці 2.2.

На рис. 2.2-2.3 представлено давачі, які використовуються на міні ГЕС.



Рисунок 2.2 – Давачі вимірювання рівня води у водосховищі



Рисунок 2.3 - Давачі тиску

Таблиця 2.2 - Техніко-економічні показники діяльності міні ГЕС

Показник	Одиниця виміру
Розрахункова проектна потужність	650 кВт
Середнє використання потужності в рік	60%
Виробництво електроенергії	3 370 000 кВт/год в рік

Охарактеризуємо основні вимоги до експлуатаційних показників компонентів ІВС для контролю параметрів роботи ГЕС. Для розроблення інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів роботи міні-ГЕС необхідно використовувати комплекс давачів, які забезпечать моніторинг ключових параметрів, таких як рівень води, швидкість потоку, тиск, температура та загальний стан обладнання. Для вимірювання рівня води у водоймах, каналах або резервуарах доцільно застосовувати ультразвукові давачі, які працюють на основі відбиття звукових хвиль та забезпечують безконтактне вимірювання. Альтернативою є радарні (мікрохвильові) давачі, які завдяки використанню радіохвиль гарантують високу точність навіть у складних умовах. Гідростатичні (п'єзо резистивні) давачі також є поширеним вибором, оскільки вимірюють тиск стовпа рідини і перетворюють його на значення рівня. Ємнісні давачі базуються на зміні електричної ємності та застосовуються в умовах, де потрібна висока надійність.

Для вимірювання швидкості води в трубах та водоймах використовуються електромагнітні витратоміри, які працюють за законом Фарадея та забезпечують точні вимірювання для провідних рідин. Не менш поширені ультразвукові витратоміри, що базуються на доплерівському ефекті або вимірюванні часу проходження сигналу, особливо ефективні у великих трубах та відкритих водоймах. Механічні (турбінні) витратоміри вимірюють швидкість потоку через обертання крильчатки, а профільні (доплерівські) витратоміри дозволяють аналізувати швидкість у декількох точках потоку, що важливо для розуміння динаміки рідини.

Крім того, у системі контролю міні-ГЕС варто використовувати додаткові давачі. Давачі тиску допоможуть контролювати навантаження на трубопровідну систему, а температурні давачі — відстежувати стан води та обладнання, запобігаючи перегріву. Вібраційні давачі дозволяють моніторити стан турбін та генераторів, своєчасно виявляючи відхилення у їх роботі. Давачі вологості можуть захистити електрообладнання від корозії та коротких замикань.

Комбінація цих давачів у єдину інформаційно-вимірювальну систему забезпечує комплексний контроль параметрів роботи міні-ГЕС, дозволяючи оптимізувати її роботу, підвищити надійність та ефективність.

Для регуляції обертів турбіни необхідно враховувати механічні шуми які утворюються на валах при передачі оборотних моментів, обертанні та підшипників та паразитні гармоніки.

Для регуляції обертів турбіни міні-ГЕС необхідно враховувати не лише основні параметри, такі як швидкість обертання, крутний момент і навантаження, але й додаткові фактори, які можуть впливати на стабільність та ефективність роботи системи. Одним із ключових факторів є механічні шуми, що виникають на валу під час передачі крутного моменту, а також під час обертання підшипників. Ці шуми є результатом мікро вібрацій, дисбалансу, зносу підшипників та нерівномірності передавання зусилля.

Паразитні гармоніки, що з'являються через нерівномірність обертання і пружні деформації валу, можуть викликати коливання частоти та амплітуди сигналу з давачів. Це негативно впливає на точність системи регулювання та може спричинити додаткове навантаження на механічні та електричні компоненти. Для відстеження цих ефектів використовуються вібраційні давачі та аналізатори спектру, які дозволяють виявляти відхилення у частотному діапазоні та виділяти паразитні гармоніки.

Врахування цих факторів у системі регуляції обертів дозволяє забезпечити стабільну роботу турбіни шляхом налаштування алгоритмів керування, таких як PID-регулятори або адаптивні системи керування. Ці системи можуть автоматично коригувати крутний момент і частоту обертання для мінімізації

впливу паразитних гармонік і механічних шумів, що значно підвищує надійність і довговічність роботи міні-ГЕС.

Рівень зношуваності обладнання також впливає на точність вимірювань і його потрібно враховувати та калібрувати.

Рівень зношуваності обладнання є важливим фактором, який безпосередньо впливає на точність вимірювань та ефективність роботи міні-ГЕС. У процесі тривалої експлуатації давачі, підшипники, вали та інші механічні елементи піддаються зносу, що призводить до поступової втрати точності показників і виникнення похибок у системі керування. Механічні деформації, мікро тріщини, люфти та зменшення чутливості давачів з часом можуть викликати неправильну інтерпретацію параметрів, таких як швидкість обертання, тиск, рівень води або крутний момент.

Для зниження впливу зношуваності на точність вимірювань необхідно впроваджувати регулярну калібровку обладнання. Це передбачає періодичне звіряння показників давачів із еталонними значеннями та налаштування коригувальних коефіцієнтів. Крім того, використання прогнозуючої діагностики та системи моніторингу стану (CBM — Condition-Based Monitoring) дозволяє відстежувати ключові показники, такі як вібрації, температура та люфти у підшипниках. Аналіз цих параметрів у режимі реального часу допомагає виявляти тенденції до зношування на ранніх стадіях.

Інтеграція алгоритмів прогнозування відмов на основі машинного навчання або статистичного аналізу дає змогу автоматично враховувати зношуваність обладнання та коригувати параметри регулювання. Це дозволяє уникнути несподіваних збоїв, підвищити точність вимірювань і продовжити термін служби обладнання. Таким чином, систематична калібровка та врахування зношуваності є ключовими елементами забезпечення надійності та ефективності міні-ГЕС.

Обладнання для міні ГЕС, а саме давачі та канали передачі повинні бути гідроізованими щоб при критичних ситуаціях не пропадав контроль та надходження інформації а також витримували погодні умови та навантаження. Усі елементи інформаційно-вимірювальної системи міні-ГЕС, зокрема давачі та

канали передачі даних, повинні бути надійно гідро ізольовані для забезпечення безперебійного контролю та збору інформації навіть у критичних ситуаціях. В умовах роботи на гідроелектростанції обладнання часто піддається впливу високої вологості, бризок, підтоплень та екстремальних погодних умов — низьких і високих температур, обмерзання та сильного вітру. Без належного захисту ці фактори можуть спричинити збій у роботі давачів, втрату сигналу у каналах передачі та некоректні показники, що унеможливить ефективне керування турбіною та іншими системами.

Гідроізоляція давачів, кабелів і комутаційних елементів має бути виконана відповідно до стандарту IP68 або щонайменше IP67, що гарантує повний захист від проникнення пилу та тривалого занурення у воду. Крім того, для забезпечення надійності передачі даних у складних умовах доцільно використовувати подвійні або резервні канали зв'язку, наприклад, волоконно-оптичні кабелі чи бездротові мережі з протоколами, стійкими до перешкод. Це дозволить уникнути втрати сигналу у разі пошкодження одного з каналів.

Обладнання повинно витримувати високі механічні навантаження та вібрації, що виникають під час роботи турбіни. Для цього корпуси давачів виготовляються з міцних корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, алюмінієві сплави або полімери з підвищеною стійкістю). Також важливо враховувати температурні коливання — застосування термостійких матеріалів та систем підігріву для запобігання обмерзанню сприятиме стабільній роботі у зимових умовах.

Таким чином, комплексний підхід до гідроізоляції, резервування каналів передачі даних та захисту від погодних факторів є критично важливим для забезпечення безперервної та точної роботи інформаційно-виміральної системи міні-ГЕС у будь-яких умовах.

В системі повинні бути передбачені критичні режими роботи а також розпізнавання небезпечних ситуацій та пропрацьовано протоколи по діях в таких ситуаціях. Для деяких випадків може бути передбачена модель діджитал двійника.

В інформаційно-вимірювальній системі міні-ГЕС повинні бути передбачені критичні режими роботи, розпізнавання небезпечних ситуацій та чітко прописані протоколи дій у таких умовах. Це дозволяє не лише своєчасно виявляти відхилення від нормальних параметрів роботи, але й запобігати аварійним ситуаціям, знижуючи ризики для обладнання та персоналу.

Критичні режими можуть включати перевищення допустимого рівня води, падіння тиску в трубопроводах, різкі зміни швидкості потоку, підвищення температури підшипників, втрату сигналу з датчиків або збій в системах електроживлення. Система повинна автоматично розпізнавати такі ситуації, використовуючи сигнали з датчиків, аналізуючи їх у реальному часі та виявляючи аномальні відхилення. Для цього можуть застосовуватися алгоритми машинного навчання, аналізу трендів та граничних значень.

Пропрацьовані протоколи дій для персоналу та автоматизованих систем повинні включати:

- Аварійне відключення обладнання у разі загрози пошкодження.
- Перехід у безпечний режим роботи з мінімальним навантаженням.
- Автоматичний перерозподіл потоків та підключення резервних систем.
- Оповіщення персоналу через сигналізацію, SMS або системи диспетчеризації.

Для підвищення надійності системи може бути передбачена модель «цифрового двійника» (digital twin), яка дозволяє віртуально відтворити роботу міні-ГЕС у режимі реального часу. Цифровий двійник отримує дані з датчиків, моделює поведінку системи та прогнозує можливі відмови або небезпечні ситуації до їх фактичного настання. Це дає змогу проводити тестування протоколів дій без ризику для реального обладнання та оптимізувати роботу всієї станції.

Таким чином, наявність системи розпізнавання критичних ситуацій, чітко прописаних протоколів дій та використання цифрового двійника забезпечує безпеку, надійність та ефективність роботи міні-ГЕС.

## 2.2 Створення віртуальної моделі для моніторингу стану обладнання міні ГЕС

Для ефективного моніторингу стану міні-ГЕС доцільно створити віртуальну модель (цифровий двійник), яка буде збирати, аналізувати та зберігати дані про роботу всіх ключових компонентів агрегату. Така модель дозволяє відстежувати параметри в режимі реального часу, виконувати періодичні звіти та проводити перевірки стану обладнання без необхідності фізичного втручання.

Основні функції віртуальної моделі:

- Збір даних — отримання інформації з датчиків про рівень води, швидкість потоку, температуру, вібрації, зношуваність підшипників та інші технічні параметри.

- Аналіз даних — виявлення трендів, відхилень та аномалій у роботі системи, що дозволяє прогнозувати зношування та можливі відмови.

- Формування звітів — автоматичне створення періодичних звітів (наприклад, щомісячних або щоквартальних) для перевірок технічного стану та виконання регламентних робіт.

- Перевірка відповідності — порівняння фактичних даних із нормативними значеннями, що дозволяє вчасно виявляти несправності або необхідність калібрування обладнання.

- Прогнозування — моделювання майбутнього стану агрегату на основі поточних і минулих даних для своєчасного планування технічного обслуговування.

Переваги використання цифрового двійника:

- Зниження витрат на обслуговування завдяки ранньому виявленню проблем.

- Оптимізація роботи через можливість моделювання різних режимів та вибору найефективнішого.

- Підвищення безпеки завдяки моніторингу критичних параметрів у режимі реального часу.
- Довгострокове планування, що дозволяє прогнозувати термін служби обладнання та необхідність заміни окремих компонентів.

Таким чином, створення віртуальної моделі дозволяє підвищити ефективність і надійність роботи міні-ГЕС, забезпечуючи комплексний підхід до моніторингу та технічного обслуговування агрегату.

Повністю автоматичний режим роботи греблі міні-ГЕС передбачає наявність широкого спектра датчиків та вимірювальних приладів, які забезпечують безперервний моніторинг ключових параметрів та оперативне регулювання роботи системи без втручання людини[14]. Такий підхід дозволяє досягти високої точності вимірювань, підвищити надійність обладнання та забезпечити ефективне використання водних ресурсів. Серед основних датчиків і вимірювальних приладів можна виділити датчик рівня води, зокрема ультразвукові для безконтактного вимірювання рівня води у водосховищі та перед греблею, а також гідростатичні для визначення тиску води на дно греблі. Для вимірювання швидкості та потоку води використовуються електромагнітні витратоміри, а також ультразвукові витратоміри для визначення швидкості руху води у відкритих каналах. Температурні датчики дозволяють вимірювати температуру води, масла в турбінах, підшипниках та інших критичних вузлах, а датчики тиску контролюють тиск у трубопроводах та камері турбіни. Вібраційні датчики важливі для моніторингу стану підшипників, валів та інших обертових елементів, що дає змогу вчасно виявляти зношування. Датчики позиціонування контролюють положення заслінок та клапанів для регулювання потоку води, а датчики напруги та струму вимірюють параметри електричної енергії, що генерується. Метеорологічні датчики вимірюють температуру повітря, вологості, атмосферний тиск, швидкість та напрямок вітру, що дозволяє враховувати погодні умови, які впливають на безпеку роботи греблі. Автоматична система збирає дані з усіх датчиків у режимі реального часу, аналізує їх, виявляючи відхилення від заданих параметрів, автоматично регулює роботу системи,

змінюючи положення заслінок, швидкість турбіни, перерозподіляючи потоки. У разі критичних відхилень система сповіщає персонал. Інтеграція з цифровим двійником дозволяє прогнозувати роботу системи та оптимізувати технічне обслуговування. Переваги повної автоматизації включають підвищення точності та швидкості реагування на зміни умов, оптимізацію використання водних ресурсів без втрати потужності, мінімізацію людського фактору та зниження ризику аварій, а також скорочення витрат на експлуатацію та обслуговування.

Система передбачає наявність автоматизації, яка складається з циклу зчитування інформації та відповідної регуляції. Цей цикл включає кілька етапів, кожен з яких має на меті забезпечити стабільну та ефективну роботу міні-ГЕС в автоматичному режимі. На першому етапі система зчитує дані від усіх датчиків, таких як рівень води, швидкість потоку, тиск, температура, вібрації тощо. Інформація надходить в центральну систему обробки, де вона аналізується для виявлення відхилень від норми або аномалій у роботі обладнання. На основі отриманих результатів система автоматично регулює параметри роботи, наприклад, змінює положення заслінок, налаштовує швидкість турбіни чи змінює потік води для оптимізації роботи станції. Цей цикл зчитування та регулювання повторюється постійно в реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на зміни в умовах експлуатації та забезпечувати безперебійне функціонування станції. Автоматизація такого циклу є основою для стабільної роботи міні-ГЕС, зменшуючи залежність від людського фактору та підвищуючи ефективність і надійність системи.

При вимірюванні важливо нормалізувати отриману інформацію відповідно до встановлених стандартів, технічних умов та необхідних параметрів роботи системи. Нормалізація дозволяє привести всі дані до єдиної шкали або стандартного формату, що сприяє їх коректному аналізу, порівнянню та інтерпретації. Це особливо важливо в умовах автоматизованого контролю та моніторингу, де дані з різних датчиків можуть мати різні одиниці вимірювання, діапазони або рівні точності.

Наприклад, рівень води може вимірюватися в метрах, швидкість потоку – в літрах на секунду, а температура – в градусах Цельсія. Щоб ці параметри можна було коректно порівнювати і використовувати для регулювання системи, потрібно їх перевести до єдиного масштабу або формату, де формалізація також враховує такі фактори, як:

1. Калібрування датчиків — щоб компенсувати можливі похибки вимірювань.

2. Масштабування даних — перетворення даних до певного діапазону для зручності обробки.

3. Підготовка даних для алгоритмів обробки — де отримані значення повинні бути представлені в такому вигляді, щоб алгоритми автоматичної регуляції могли їх обробляти.

Нормалізація даних дозволяє уникнути помилок у обробці та прийнятті рішень, а також забезпечує правильність автоматичних коригувальних дій для підтримки стабільної роботи міні-ГЕС.

Після встановлення датчиків повинні бути відкаліброваними для забезпечення точності вимірювань та надійності роботи системи. Калібрування є важливим етапом, який дозволяє забезпечити правильну передачу даних від датчиків до центральної системи моніторингу і контролю. Відкориговані датчики дають точніші показники, що критично важливо для стабільної та безпечної роботи міні-ГЕС. Калібрування датчиків включає визначення еталонних значень для кожного типу датчика в контрольованих умовах, порівняння показників з еталонними вимірюваннями, коригування показників при необхідності, повторне тестування і збереження результатів калібрування. Після калібрування важливо також періодично перевіряти датчики на точність, оскільки з часом можуть виникати відхилення, що пов'язані зі зносом обладнання або зміною умов експлуатації. Це дозволить підтримувати стабільність та надійність роботи автоматизованої системи міні-ГЕС.

Збір інформації реалізується по наступній схемі: замір – фільтрація – нормалізація – шифрація – передача – дешифрація – опрацювання – збір – реакція.

Спочатку відбувається замір параметрів, що вимірюються давачами, наприклад, рівня води, температури чи швидкості потоку. Після цього дані проходять через фільтрацію, щоб усунути шуми або інші непотрібні сигнали, що можуть спотворювати результати. Наступним кроком є нормалізація, коли дані приводяться до стандартного формату або шкали для зручності подальшої обробки. Після нормалізації здійснюється шифрація даних для забезпечення їх безпеки під час передачі по каналах зв'язку. Дані передаються через комунікаційні канали, після чого на приймальній стороні відбувається дешифрація для відновлення оригінальної інформації. Опрацьовані дані аналізуються системою для виявлення будь-яких відхилень або аномалій у роботі обладнання. Потім відбувається збір усієї інформації для подальших звітів або моніторингу. У разі необхідності, система реагує на виявлені зміни, коригуючи параметри роботи, наприклад, швидкість обертання турбіни чи відкриття заслінок, щоб підтримувати оптимальні умови роботи міні-ГЕС.

Використання таких технологій, як Eplan, PLC, Big Data і 3D модель турбіни, а також інтеграція типів сенсорів, як тиск, температура та електричні сенсори, є ключовими елементами для автоматизації та моніторингу роботи міні-ГЕС. Це дозволяє створювати ефективні системи управління, що базуються на аналізі даних в реальному часі та прогнозуванні стану обладнання. Eplan — це програмне забезпечення для автоматизації проектування електричних схем та управлінських систем. Використання Eplan для проектування електричних і автоматизованих систем на міні-ГЕС дає можливість створювати детальні схеми та документи, що стосуються підключення всіх електричних елементів, сенсорів і пристроїв керування. Це дозволяє зменшити ймовірність помилок при проектуванні та забезпечити високий рівень інтеграції між усіма компонентами системи автоматизації. PLC - це основні елементи систем автоматизації, які забезпечують виконання програм для управління технологічними процесами.

PLC контролюють роботу міні-ГЕС, включаючи включення і вимикання турбін, контроль за рівнем води та інші параметри. Дані з різних сенсорів (наприклад, тискових, температурних, електричних) передаються в PLC, який обробляє інформацію та виконує відповідні команди для регулювання роботи обладнання. Big Data дозволяє обробляти та аналізувати великі обсяги даних, що надходять від сенсорів і систем на міні-ГЕС. Це дає змогу виявляти закономірності, тренди та аномалії в роботі системи, які можуть бути не очевидними при традиційних методах аналізу. Використання Big Data для обробки даних дозволяє прогнозувати можливі відмови або поломки, оптимізувати енергетичні процеси і зменшити витрати на обслуговування та ремонти. Створення 3D моделі турбіни дозволяє візуалізувати її структуру та стан в реальному часі. Такі моделі можуть використовуватися для моніторингу внутрішніх параметрів турбіни, таких як температура, вібрації, тиск і знос компонентів. Це допомагає виявляти проблеми на ранніх етапах, а також використовувати модель для симуляцій і тестувань. 3D модель може бути інтегрована з системою моніторингу для відображення інформації про поточний стан турбіни та її частин. Для забезпечення точності та надійності роботи міні-ГЕС використовуються різноманітні сенсори: тискові сенсори, які вимірюють тиск води в різних точках системи, таких як трубопроводи, камери турбін чи насоси; температурні сенсори, що відстежують температуру води, масла в турбінах та інших критичних вузлах; електричні сенсори, які вимірюють параметри електричної енергії, зокрема напругу, струм і потужність, що генерується станцією. Це дозволяє контролювати ефективність генерації та вчасно виявляти будь-які електричні неполадки. Ці типи сенсорів забезпечують різноманітні вимірювання, які дозволяють операторам і автоматизованим системам відстежувати і коригувати роботу міні-ГЕС у реальному часі, що підвищує її ефективність і надійність.

### **2.3 Аналіз діяльності обладнання міні ГЕС**

Для аналізу результатів діяльності обладнання міні ГЕС необхідно врахувати основні показники роботи міні ГЕС. В таблиці 2.3 наведені технічні характеристики турбіни.

Таблиця 2.3 – Представлення річних даних для показників роботи міні ГЕС

Показник	Місяці року											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Загальний виробіток станції, тис. кВт	163	63,7	319,1	547,9	547,9	530,2	492,8	329,9	392,3	182,5	272,4	409,8
Витрати річки, м <sup>3</sup> /с	1,71	0,77	3,46	11,2	11,0	18,6	5,81	3,59	4,54	1,92	3,02	4,6
Витрати турбіни, м <sup>3</sup> /с	1,71	0,77	3,46	6,8	6,8	6,8	5,81	3,59	4,54	1,92	3,02	4,6
Витрати річки, % від макс.	25,1	11,3	50,9	100,0	100,0	100,0	85,4	52,8	66,8	28,2	44,4	67,6
Напір нетто, м	21,27	21,45	20,59	17,99	17,99	17,99	18,93	20,52	19,93	21,22	20,8	19,89
ККД агрегату, м	0,76	0,72	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Потужність, кВт	271,3	117,4	531,1	912,0	912,0	912,0	820,2	549,2	674,7	303,7	468,4	682,2
Виробіток, тис. кВт/год(з коеф. нижче.0,95)	163,0	63,7	319,1	547,9	547,9	530,2	492,8	329,9	329,9	182,5	272,4	409,8

Представляємо графік візуалізації наведених показників (рис. 2.4) .

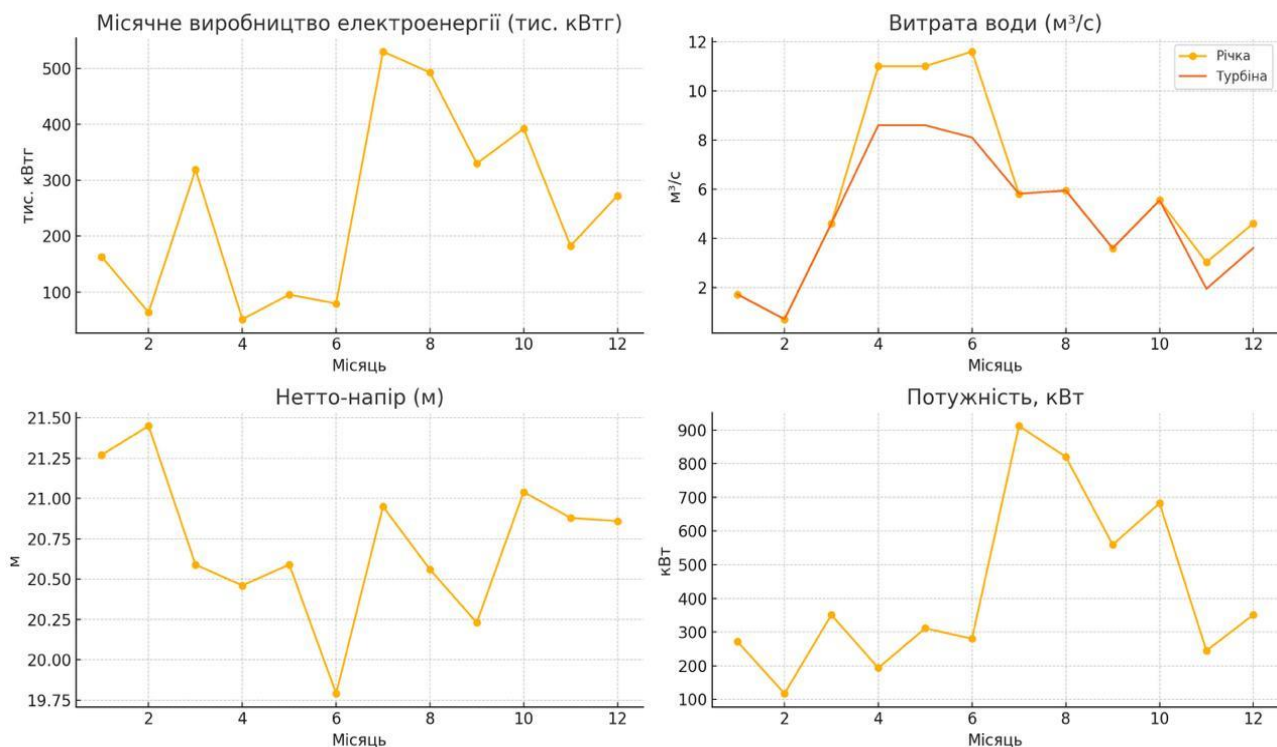


Рисунок 2.4 – Графік річних показників роботи міні ГЕС

На графіку (рис. 2.4) наведено річну динаміку ключових параметрів роботи міні-гідроелектростанції. Зокрема, було проаналізовано зміну обсягу виробленої електроенергії, витрату води та коефіцієнт ефективності генерації впродовж 12 календарних місяців.

Відповідно до візуалізації, спостерігається сезонна варіативність роботи міні-ГЕС, що прямо пов'язана з гідрологічними умовами річки Чечва. Найвищі показники виробництва електроенергії фіксуються у весняно-літній період (квітень–липень), що обумовлено таненням снігу, дощовими сезонами та збільшеним водозабором. У цей період також спостерігається зростання витрати води, що корелює з підвищеним навантаженням на турбіну.

Натомість у зимовий період (грудень–лютий) відзначається зниження вироблення енергії через обмежений гідроресурс та ймовірне обмерзання гідротехнічного обладнання. Це вказує на потребу в оптимізації роботи ГЕС в умовах знижених витрат — наприклад, шляхом регулювання генераторного навантаження або застосування акумуляції енергії.

З точки зору ефективності роботи, коефіцієнт використання встановленої потужності демонструє нерівномірність упродовж року. Це свідчить про потребу

в автоматизованій системі контролю, яка дозволяє оперативно реагувати на зміну параметрів та забезпечує адаптивне керування.

Таким чином, графік підтверджує необхідність впровадження інформаційно-вимірювальної системи, яка дає змогу:

- фіксувати тенденції та аномалії в роботі міні-ГЕС;
- аналізувати вплив природних чинників на енергогенерацію;
- будувати математичні моделі прогнозування;
- приймати обґрунтовані рішення на основі достовірних даних.

У сукупності це дозволяє забезпечити більш ефективну, надійну й економічно доцільну експлуатацію об'єкта протягом усього року.

Як бачимо, для аналізу показників роботи міні ГЕС необхідно опрацьовувати велику кількість даних. При проектуванні системи вимірювання інформації та для побудови моделі прийняття рішень на основі отриманих даних, необхідно враховувати для показників. Для прикладу розглянемо роботу турбіни на міні ГЕС. Для побудови моделі. Що описує роботу турбіни потрібно зібрати дані:

- рівень води в водосховищі;
- кут лопатей в турбіні;
- температура турбіни;
- швидкість вхідного потоку;
- генерована потужність турбіни.

Для збору даної інформації вагоме значення мають датчики і сенсори, які є складовими інформаційно-вимірювальної системи міні ГЕС. При зниженні рівня води до певного критичного у водосховищі, з датчика поступає сигнал, який включає автоматичну регуляцію, що зменшує потік води до турбіни.

У табл. 2.4 представлено основні параметри роботи гідротурбіни.

Таблиця 2.4 - Основні параметри роботи гідротурбіни

Назва	Скорочення	Кількість	Од.вим.
Напір брутто	H	21,30	м
Довжина дериваційного трубопроводу	L	606,00	м
Діаметр трубопроводу	DN	1800/1600	мм

Втрати напору	T	3,20	м
Чистий напір	H	18,10	м
Витрата: максимальна витрата при H	Q	6800	л/с
мінімальна витрата при H	Q	680	л/с
Мінімальна робоча витрата турбіни	Q	408	л/с
Максимальна потужність турбіни		999	кВ
Максимальна потужність генератора		925	кВ

Дані табл.2.4 використовуються для побудови математичної моделі роботи гідротурбіни. До параметрів, які враховуються при побудові моделі є:

$$H \leq H_{min} + \Delta H \quad (2.1)$$

$H(t)$  – рівень води[м];

$Q(t)$  – потік води до турбіни(витрата води)[м<sup>3</sup>/с];

$P(t)$  – потужність турбіни[Вт] або [МВт];

$I(t)$  – приплив води[м<sup>3</sup>/с];-

$S(H)(t)$  – сигнал давача рівня води ( активується при  $H \leq H_{min} + \Delta H$ )[логічне значення: 0 або 1];

$Q_{cmd}(t)$  – керований потік (управління потоком на турбіну) [м<sup>3</sup>/с];

$P_{max}$  – максимальна допустима потужність[Вт] або [МВт].

Розрахунок потужності турбіни  $P(t)$  можна здійснити з допомогою формули:

$$P(t) = \eta \rho g Q(t) H(t) \quad (2.2)$$

де:  $P(t)$  - Потужність гідротурбіни [Вт], яка залежить від потоку і напору (рівня води):

$\eta$  – ККД турбіни;

$\rho$  – густина води [кг/м<sup>3</sup>];

$g$  - прискорення вільного падіння [м/с<sup>2</sup>];

Контролер (п-регулятор) регулює позицію заслінки, та керує лопатками турбіни.

При проектуванні системи контролю необхідно врахувати похибку сенсорів:

Розрахунок похибки по витратах здійснимо за формулою :

$$Q_{\text{вимір}} = Q * (1 \pm \epsilon Q), \epsilon Q = 0.05, \quad (2.3)$$

Розрахунок похибка по опору проводимо за формулою:

$$H_{\text{вимір}} = H * (1 \pm \epsilon H), \epsilon H = 0.02 \quad (2.4)$$

На основі попередньо розглянутих режимів та умов сформуємо систему рівнянь, за допомогою якої зможемо наближено розглянути модель режимів роботи гідротурбіни:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \frac{I(t) - Q_{\text{cmd}}(t)}{A} \\ S(t) &= \begin{cases} 1, & H(t) \leq H_{\text{min}} + \Delta H \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \\ P(t) &= \eta \rho g Q_{\text{cmd}}(t) (1 - S(t)) H(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Після програмування отриманої системи, отримуємо графіки (рис. 2.5), які схематично показують взаємодію різних характеристик при різних умовах.

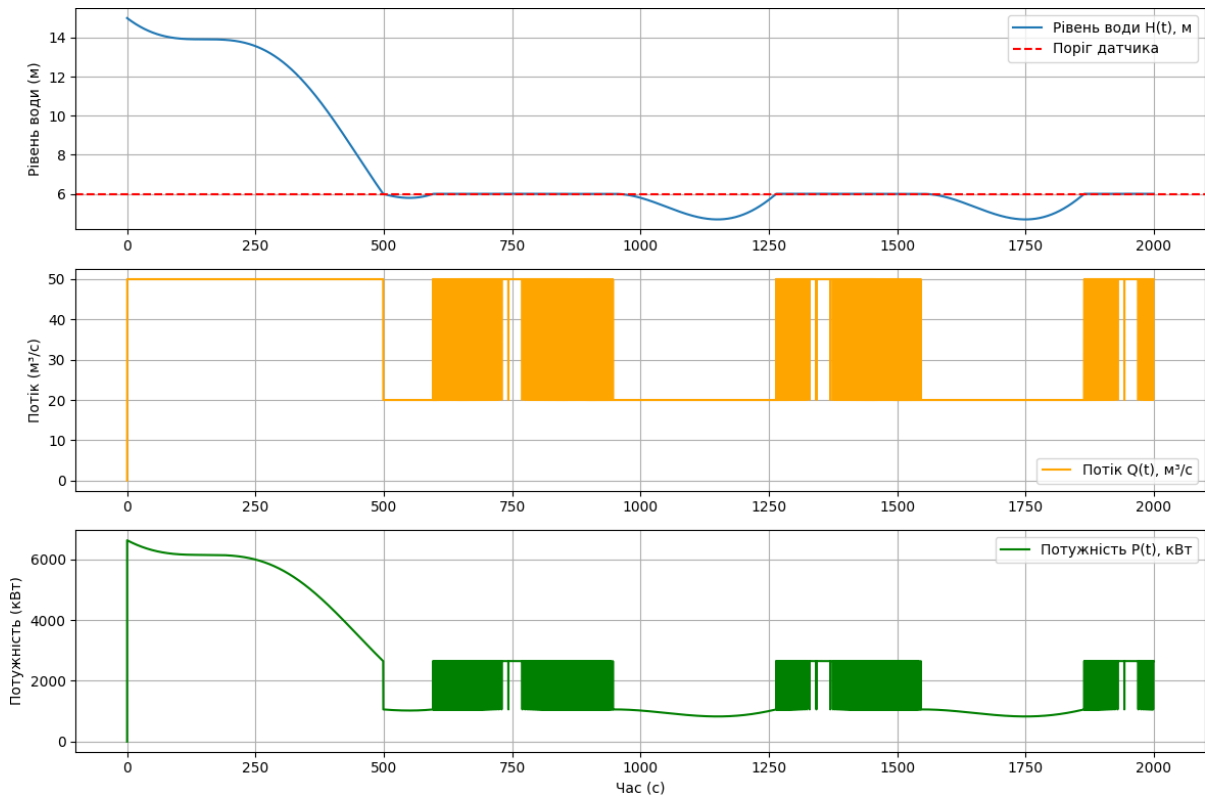


Рисунок 2.5 – Моделювання рівня води  $H(t)$ , припливу  $I(t)$ , потоку до турбіни  $Q(t)$ , спрацьовування давача та потужність  $P(t)$

Для представлення динаміки регуляції потоку (модель контролера) використаємо модель пропорційного регулятора.

Простий пропорціональний регулятор( $P$ ) опишемо з допомогою рівняння:

$$Q(t + 1) = Q(t) + K_p * (P_{target} - P(t)) * \Delta t \quad (2.6)$$

де:  $K_p$  – коефіцієнт чутливості;

$\Delta t$  – крок дискретизації(наприклад, 1 сек);

$P(t)$  -поточна потужність;

З врахуванням обмеження зміни потоку води до турбіни:

$$\Delta Q = \max(-R, \min(R, \Delta Q)),$$

де  $R$  – максимальна швидкість зміни потоків(обмеження,наприклад, $0,3\text{м}^3/\text{с}/\text{сек}$ )

Здійснимо візуалізацію проведених розрахунків з допомогою програмування (рис. 2.6).

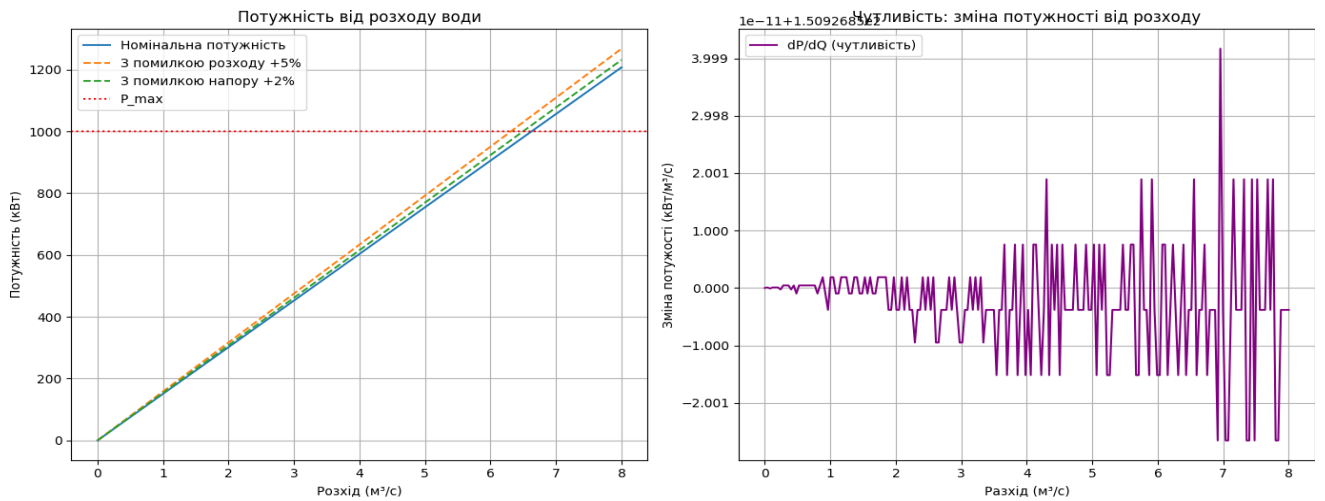


Рисунок 2.6 – Залежність чутливості зміни потужності гідротурбіни від силу потоку

На даному графіку (рис. 2.6) зображена чутливість зміни потужності від розходу. Бачимо, що при збільшенні розходу води, збільшується діапазон зміни потужності, що вимагає додаткових зусиль для стабілізації та регуляції затулки подачі потоку на гідротурбіну.

Таким чином, використання вимірювальних приладів дозволяє досліджувати поведінку та динаміку параметрів роботи обладнання та відповідно до отриманої інформації здійснювати процеси контролю та прийняття рішень.

Здійснимо оцінку роботи міні-ГЕС на основі таблиці 2.5 з похибками.

Таблиця 2.5 – Вихідні умовні дані міні-ГЕС

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Витрата води	Q	0.50	м³/с
Перепад висоти	H	12.0	м
Прискорення вільного падіння	g	9.81	м/с²
ККД гідротурбіни	$\eta_T$	0.85	-
Напруга	U	400	В
Струм	I	30	А
$\cos(\varphi)$	$\cos\varphi$	0.95	-

У таблиці 2.6 представлено типові похибки, які враховують при розрахунках параметрів діяльності міні ГЕС.

Таблиця 2.6. - Параметри для зчитування та обробки інформації з приладів

Параметр	Тип сенсора/вимірювання	Типова похибка (%)	Вплив на результат
Витрата води (Q)	Турбінний/ультразвуковий витратомір	1.5%	Високий
Перепад висоти (H)	Рівнемір / тисковий сенсор	1.0%	Високий
Температура води (T)	Температурний давач	0.5%	Середній
Напруга (U)	Вольтметр	0.2%	Середній
Струм (I)	Амперметр	0.3%	Середній
Коефіцієнт потужності (cosφ)	Фазометр / вимірювач cosφ	0.5%	Середній
Потужність гідравлічна (P <sub>гідр</sub> )	Розрахунок $Q \times H \times g$	2.0%	Високий
Потужність електрична (P <sub>ел</sub> )	Розрахунок $U \times I \times \cos\varphi$	1.5%	Високий
Ефективність генератора (η)	Відношення P <sub>ел</sub> / P <sub>гідр</sub>	2.5%	Критичний
Втрати в трубах	Формула Дарсі-Вейсбаха	5.0%	Середній

Розрахуємо потужність міні ГЕС.

Гідравлічна потужність:

$$P_{\text{гідр}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.5 \cdot 12 = 58\,860 \text{ Вт} \approx 58.9 \text{ кВт}$$

Електрична потужність:

$$P_{\text{ел}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 400 \cdot 30 \cdot 0.95 = 11\,400 \text{ Вт} = 11.4 \text{ кВт}$$

Ефективність системи:

$$\eta = \frac{P_{\text{ел}}}{P_{\text{гідр}}} = \frac{11\,400}{58\,860} \approx 0.194 \text{ (19.4\%)}$$

Здійсимо Оцінку впливу похибок.

Комбінована похибка потужності гідравлічної (відносна):

$$\delta P_{\text{гiдр}} = \sqrt{(1.5\%)^2 + (1.0\%)^2} \approx 1.8\%$$

Комбінована похибка потужності електричної:

$$\delta P_{\text{ел}} = \sqrt{(0.2\%)^2 + (0.3\%)^2 + (0.5\%)^2} \approx 0.62\%$$

Похибка ККД:

$$\delta \eta = \sqrt{(\delta P_{\text{ел}})^2 + (\delta P_{\text{гiдр}})^2} \approx \sqrt{(0.62\%)^2 + (1.8\%)^2} \approx 1.9\%$$

Таким чином, розрахована потужність системи, очікувана теоретично - 58.9 кВт, а фактично - 11.4 кВт, тобто ККД дуже низький (~19%). Комбінована похибка ККД  $\approx \pm 1.9\%$ , тобто фактична ефективність може коливатись від 17.5% до 21.3%[5]. Такі коливання, а також нестача точності через агреговані або ручні вимірювання, не дозволяють точно виявити причини втрат енергії.

Для покращення роботи міні ГЕС прогнозується автоматизувати вимірювання, зменшити похибки, виявляти аномалії, прогнозувати ефективність.

### **Висновок до другого розділу**

У другому розділі було розглянуто принципові технічні рішення щодо побудови інформаційно-вимірювальної системи для контролю параметрів роботи міні-гідроелектростанції. На основі аналізу технологічного процесу та функціональних вимог сформовано структуру системи, яка забезпечує повний цикл - від збору даних з об'єктових давачів до їх обробки, збереження та візуалізації.

Схема (рис. 2.1) відображає взаємозв'язок між основними елементами системи: давачами фізичних параметрів (струму, напруги, тиску, витрати води, температури тощо), мікроконтролерними модулями, модулями зв'язку та програмним забезпеченням. Такий підхід дозволяє реалізувати модульну та масштабовану архітектуру, яка легко адаптується під конкретні умови експлуатації міні-ГЕС.

Також у розділі проаналізовано показники роботи міні ГЕС, побудовано математичну модель для опису основних фізичних процесів, що відбуваються у системі. Зокрема, така модель побудована для роботи гідро турбіни. Це дозволяє досліджувати вплив окремих параметрів на ефективність та стабільність роботи станції. Отримані результати стануть основою для практичної реалізації системи в наступному розділі.

Таким чином, створена концепція інформаційно-вимірювальної системи є технічно обґрунтованою та відповідає вимогам сучасних автоматизованих міні-ГЕС.

## **РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МІНІ-ГЕС**

### **3.1 Характеристика інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів роботи міні ГЕС**

Інформаційно-вимірювальна система міні-ГЕС повинна бути інтегрована в загальну систему електропостачання та мати можливість динамічно реагувати на зміну потреб енергомережі. Це передбачає автоматичне регулювання параметрів роботи турбіни, таких як швидкість обертання, навантаження на генератор та подача води, у відповідь на збільшення або зменшення споживання електроенергії.

Підключення до загальної енергосистеми дозволяє міні-ГЕС працювати як частина розподіленої генерації, сприяючи балансуванню навантаження. У режимі пікових навантажень система повинна забезпечувати максимальну генерацію, а під час низького споживання — знижувати вихідну потужність для збереження ресурсу обладнання та ефективного використання водних ресурсів.

Ключовими елементами такої інтеграції є:

Автоматизовані системи керування (SCADA), які здійснюють моніторинг і регулювання параметрів у режимі реального часу.

Система прогнозування навантаження, що використовує дані про споживання та стан мережі для планування роботи міні-ГЕС.

Двосторонній зв'язок із диспетчерським центром для оперативного отримання команд та надання інформації про поточний стан.

Резервні системи для підтримання стабільної роботи у разі відмови основних ліній зв'язку або датчиків.

Автоматичне регулювання повинно враховувати не лише поточні потреби мережі, а й умови роботи обладнання, такі як зношеність, механічні шуми та паразитні гармоніки. Це дозволяє уникнути перенавантаження та продовжити термін служби компонентів.

Таким чином, підключення системи міні-ГЕС до загальної енергосистеми з можливістю динамічного регулювання є важливою умовою для забезпечення гнучкості, надійності та ефективного використання енергетичних ресурсів.

Організація формату інформації, її збір і подання звітності в зручному форматі є критично важливими етапами для забезпечення ефективного моніторингу та управління роботою міні-ГЕС. Цей процес включає кілька етапів, починаючи від збору даних до їх представлення в зручному для користувачів вигляді.

Першим етапом є збір інформації, де всі давачі та вимірювальні прилади системи автоматично передають дані в центральну систему збору. Для кожного типу даних може бути визначений свій формат, зокрема для рівня води, швидкості потоку, температури, тиску, вібрацій тощо. Це важливо для забезпечення коректного аналізу та порівняння різних параметрів. Дані можуть бути представлені у вигляді числових значень або графічних індикаторів для полегшення моніторингу.

Організація формату інформації передбачає стандартизацію одиниць вимірювання та форматів представлення даних, щоб забезпечити їх сумісність з іншими системами або для інтеграції з іншими модулями управління. Це дозволяє уникнути помилок при обробці і порівнянні даних різних типів і джерел. Наприклад, усі вимірювання температури можуть бути переведені в єдину шкалу (Цельсій), а рівень води – у метри. Параметри, які мають різні одиниці вимірювання, можуть бути переведені в універсальний формат, наприклад, в електричні сигнали чи цифрові коди.

Наступним етапом є структуроване зберігання даних для подальшої обробки. Дані повинні бути організовані в базах даних, з доступом до яких можна отримати як поточні, так і історичні показники. Важливо, щоб ці дані зберігались у форматах, зручних для подальшого аналізу, таких як CSV, JSON або XML.

Подання звітності в зручному форматі має забезпечити легкість доступу та інтерпретації інформації для різних користувачів, включаючи операторів станції,

технічних спеціалістів або керівників. Для цього створюються звіти, які можуть бути представлені у вигляді:

1. Графіків та діаграм - для візуалізації змін параметрів (наприклад, зміна рівня води або швидкості потоку з часом).
2. Таблиць - для детального перегляду значень та порівняння параметрів.
3. Автоматичних повідомлень - для інформування про критичні відхилення або аварійні ситуації в системі.
4. Статистичних звітів - для періодичних оцінок стану обладнання, його ефективності та продуктивності.

Звітність може бути налаштована для періодичних оновлень (щоденно, щотижнево, щомісяця) або у разі виникнення критичних подій. Для цього можуть використовуватися програмні інтерфейси для генерації звітів або автоматичні системи для збору статистики. Таким чином, правильна організація формату інформації, її ефективний збір і подання у вигляді звітності у зручному форматі дозволяє швидко реагувати на зміни в роботі міні-ГЕС, забезпечує прозорість та підтримує оптимізацію процесів управління.

Система звітності, прийняття рішень та регуляції є необхідною в умовах інтеграції. Основною задачею є регуляція потоку води до турбіни та її потужності по відношенню до рівня води в водосховищі, яке визначається за допомогою давачів рівня води на його контурах, і при досягненні певного критичного рівня в водосховищі, надходження потоку зменшується, для досягнення його довго тривалості та однорідності при втраті потужності

Система звітності передбачає такий перелік документів:

- графіки навантаження та генерації (по годинах/добах/місяцях);
- журнали подій і тривог;
- технічний стан обладнання (наприклад, знос підшипників, перегрів);
- ефективність роботи (ККД турбін, втрати в трансформаторах);
- екологічні показники (викиди, температура води, зміни рівня);
- звіти формуються автоматично і можуть надсилатися.

Сучасна гідроелектростанція, оснащена інтелектуальними системами керування та збору даних, забезпечує постійний контроль якості роботи всіх ключових компонентів. Для моніторингу і контролю за процесами використовують графіки навантаження та генерації і системі режиму реального часу, яка фіксує:

- годинне, добове та місячне навантаження на генератори;
- фактичну генерацію електроенергії у порівнянні з плановими графіками;
- відхилення через коливання попиту або зміну гідрологічних умов;
- аналіз пікових навантажень, що дозволяє адаптувати графік подачі води.

Ці графіки допомагають прогнозувати потреби в обсягах генерації, оптимізувати водовипуск та взаємодіяти з енергосистемою.

Додатково ведуться журнали подій і тривоги. Автоматизована система безпеки формує :

- чіткий хронометрований журнал всіх подій (запуск, зупинка, переключення режимів);
- тривожні сигнали: перегрів, перевантаження, відхилення тиску, вібрації тощо;
- автоматичні коментарі AI щодо потенційних причин інцидентів;
- архівацію подій для аудиту, діагностики та навчання моделі прогнозування несправностей.

Для оцінки продуктивності гідроагрегатів система фіксує:

- ККД турбін і генераторів у кожен момент часу;
- втрати енергії на трансформаторах та лініях передачі;
- баланс поданої води та згенерованої енергії;
- питомі витрати на одиницю виробленої електроенергії.

Завдяки цим показникам можна виявити малоефективні режими роботи та оптимізувати використання ресурсу.

Забезпечення екологічної безпеки включає:

- Моніторинг температури скидуваної води;
- Фіксацію змін рівня води у водосховищі та нижньому б'єфі;

- Реєстрацію викидів у разі використання дизельних резервів або мастил;
- Автоматичну звітність у профільні екологічні структури. Всі екологічні дані автоматично передаються до державних реєстрів або архівуються згідно з ISO-14001.

### **3.2. Система прийняття рішень автоматизованих рішень в інформаційно-вимірвальній системі**

В сучасних умовах інформаційно-вимірвальна система міні ГЕС передбачає автоматизацію процесів керування. У цій системі рішення приймаються на основі аналізу вхідних даних, які система отримує з давачів, встановлених на основних агрегатах.

Важливими автоматичними рішеннями є регулювання навантаження турбін залежно від водного притоку та прогнозу споживання, а також планування профілактики на основі аналітики зносу та управління заслінками для оптимізації рівня та тиску. На рис. 3.1 представлено діаграма компонентів інформаційно-вимірвальна система міні ГЕС.

Основними елементами даної системи є:

- модулі передачі даних;
- інтерфейси класів компонентів системи;
- реалізоване логування подій;
- передбачене масштабування моделі.

Підтримка прийняття рішень у даній системі передбачає такий перелік дій:

- прогнозування аварій або відхилень;
- рекомендації щодо перерозподілу навантаження між агрегатами;
- сценарії дій при нештатних ситуаціях.

Схема на рис. 3.1 зображує інформаційну систему міні-ГЕС (малої гідроелектростанції), яка складається з основних модулів, типів даних, обсягів і операцій між ними.

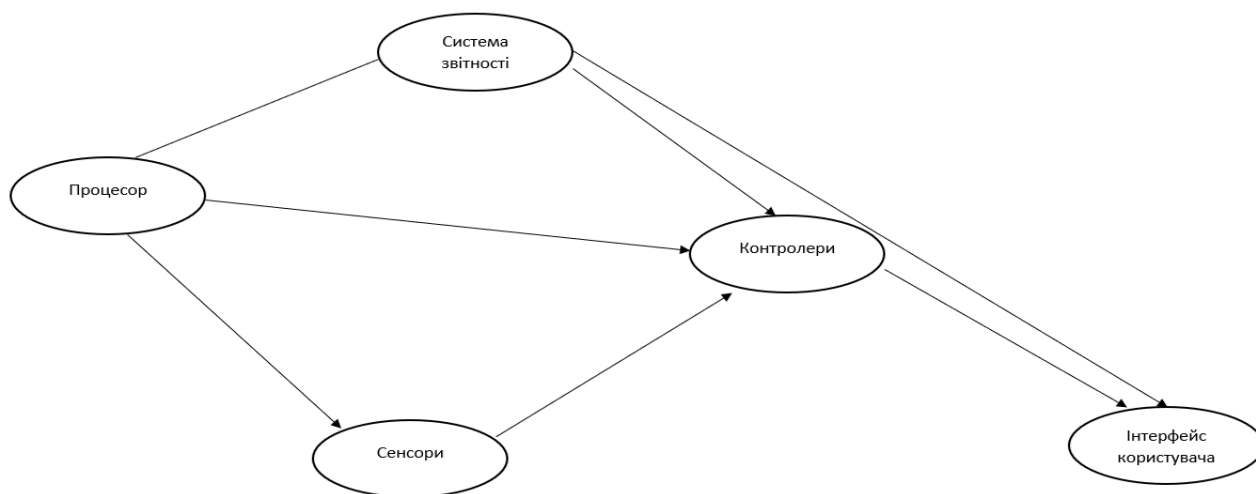


Рисунок 3.1 Інформаційно-вимірювальна система міні ГЕС[10]

Основні компоненти даної системи – це :

1. Sensors (сенсори) – генерують сирі дані (float, 10 msg/s).  
 2. Processor (процесор) – обробляє ці дані, виконує усереднення і сереалізацію:

- віддає filtered data контролеру;
- передає processed data у Report System.

3. Controller (контролер) – центр прийняття рішень:

- отримує дані від сенсорів і процесора;
- формує статус і керуючі команди;
- надсилає звіти до Report System;
- надає статус в інтерфейс користувача.

4. Report System (система звітів) – приймає дані для зберігання чи аналізу (json, symbol, 1 msg/s).

5. User Interface (інтерфейс користувача) – відображає статус системи (boolean, 1 msg/s).

У системі є такі типи та частоти даних:

- float, json, symbol, boolean — різні формати.

- Передача даних варіюється від 1 до 10 повідомлень за секунду.

Таким чином, схема демонструє взаємодію між компонентами інформаційної системи міні-ГЕС, де контролер є центральним елементом, що координує обробку, аналіз та відображення даних у реальному часі[8].

При підключенні міні ГЕС до зовнішньої енергосистеми необхідно враховувати такі показники як :

- підключення до енергетичного ринку для оптимізації прибутку (наприклад, у пікові години);

- взаємодія з мережевими операторами для регулювання частоти/напруги.

Існує також можливість розгляду інтелектуальних модулів (опціонально).

Зокрема:

- ML-моделі прогнозу притоку води (на основі погоди, сезону, історичних даних);

- аналіз аномалій в роботі турбін (за допомогою нейромереж);

- оптимізація роботи агрегатів для підвищення ККД та зменшення зносу.

Таким чином, запропонована інформаційно-вимірювальна система для міні ГЕС володіє широким спектром функцій, які дозволяють збирати великий масив інформації для прийняття автоматизованих рішень, здійснювати моніторинг та контролювати виробничі процеси. На рис. 3.2 представлено візуалізацію потоку даних, які зчитуються з роботи обладнання.

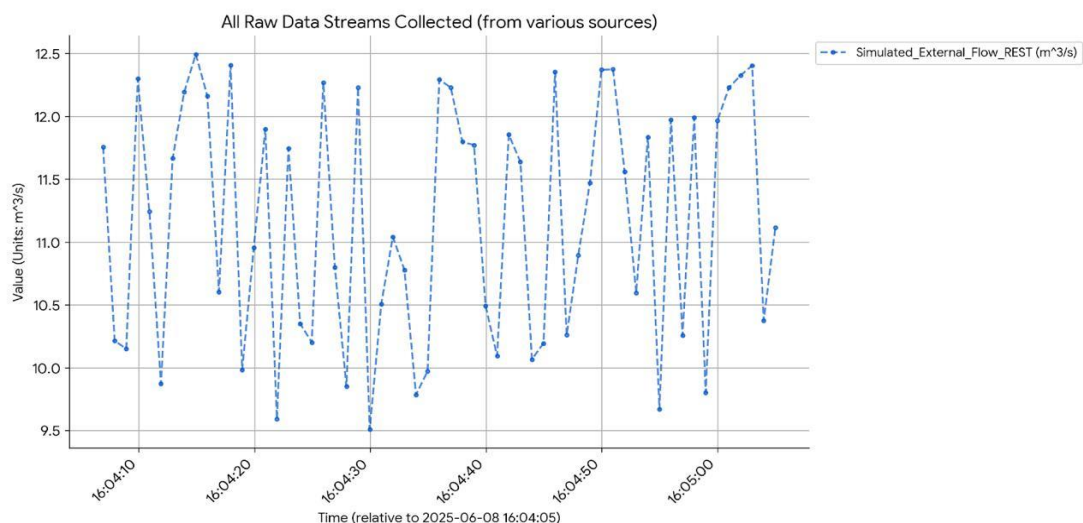


Рисунок 3.2 – Візуалізація інтенсивності потоку телеметричних даних з сенсорів в інформаційно-вимірювальній системі

Дана діаграма демонструє зібрані на датчиках дані, що характеризують роботу елементів системи

Прийняття рішень та регуляції діяльності міні ГЕС спирається на інформаційній системі збору та обробки інформації. Інформаційна система (ІС) повністю автоматичної ГЕС складається з декількох підсистем:

Підсистема збору даних (SCADA-рівень). Ця підсистема відповідає за безперервний моніторинг стану обладнання, параметрів навколишнього середовища та гідрологічної ситуації та складається з:

- сенсорів та датчиків;
- локальних контролерів (PLC);
- промислової шини обміну даними (Modbus, Profibus, EtherCAT тощо)

Підсистемою інформаційної системи є підсистема обробки та зберігання даних, яка складається із:

- серверу збору телеметрії – об'єднує всі дані з контролерів;
- бази даних SCADA – зберігає історичну інформацію для аналізу;
- аналітичних модулів – прогнозування потужності, виявлення відхилень, моделі деградації обладнання.

На рис. 3.3 представлено візуалізація технічних показників роботи обладнання міні ГЕС.

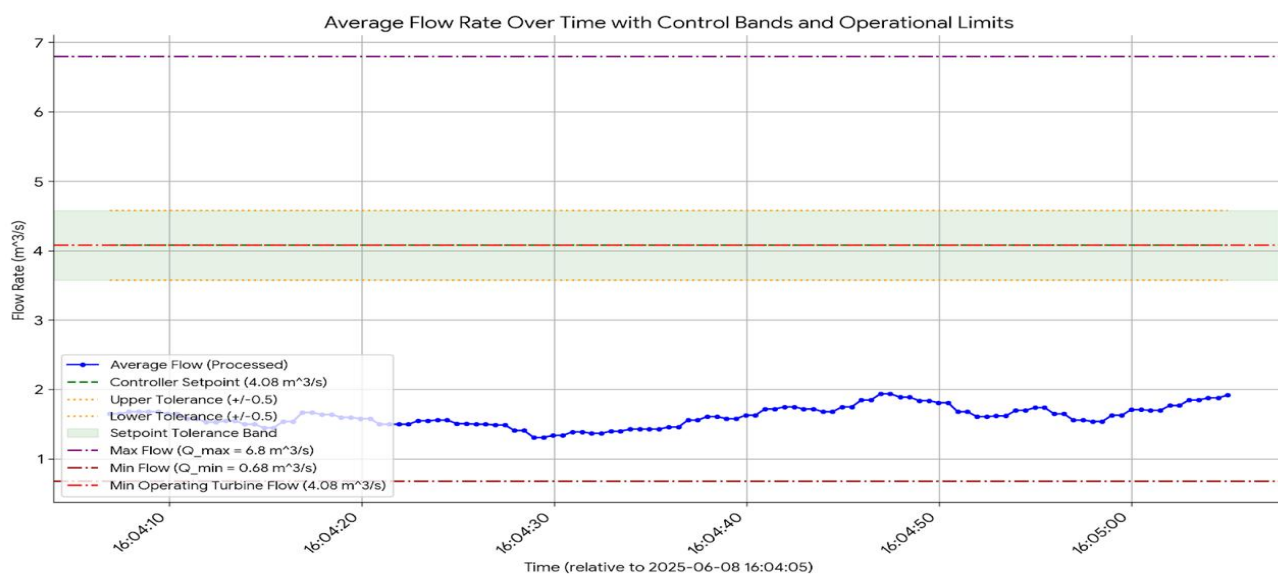


Рисунок 3.3 – Візуалізація технічних показників роботи обладнання міні ГЕС на основі використання контролерів

Окремо виділяємо підсистему взаємодії з операторами, яка складається з:

–НМІ (Human-Machine Interface) – інтерфейси для відображення стану станції.

–Мобільних панелей для дистанційного моніторингу.

–Автоматичних повідомлень/тривог у випадку відхилень або несправностей.

Розглянемо типи давачів для збору інформації, їх розташування та функціонування на міні ГЕС (табл. 3.1-3.3).

Таблиця 3.1 - Гідрологічні давачі

Тип	Призначення	Місце розташування
Ультразвукові рівнеміри	Вимірювання рівня води	На вході (верхній б'єф), на виході (нижній б'єф)
Давачі швидкості потоку (доплерівські)	Визначення швидкості водного потоку	У водоводі, перед турбінами
Тиск (п'єзометричні)	Контроль тиску в напірному трубопроводі	Уздовж водоводу, перед турбінами

Наявність даних типів давачів забезпечує точність моніторингу та контролю станів обладнання на міні ГЕС.

У табл. 3.2представлені механічні та електротехнічні давачі.

Таблиця 3.2. Механічні та електротехнічні давачі

Тип	Призначення	Місце розташування
Давачі положення (енкодери)	Позиція заслінок, турбін, генераторів	Заслінки, направляючі апарати, поворот турбін
Температурні давачі	Контроль нагріву підшипників, обмоток генератора	Турбіна, генератор, трансформатори
Вібраційні сенсори	Моніторинг механічного стану обладнання	Турбіни, генератори, підшипники

Розглянуті типи давачів використовуються для моніторингу фізичних та механічних показників.

У табл. 3.3 представлено екологічні та допоміжні давачі

Таблиця 3.3 - Екологічні та допоміжні давачі на міні ГЕС

Тип	Призначення	Місце розташування
Метеодавачі	Швидкість вітру, опади, температура	На відкритих ділянках станції
Давачі проникнення/камери	Система безпеки	По периметру ГЕС, у машинних залах
Давачі пожежі/газу	Безпека персоналу	Закриті приміщення, щитові, зали управління

Дані п'яти давачів дозволяють інформаційній системі ГЕС моніторити стан зовнішнього середовища (дощ, зміна температури, тиску).

Розглянувши всі можливі давачі, розглянемо метрологічні показники, які необхідні для збору даних. У табл. 3.4 представлено перелік типових метрологічних похибок для інформаційно-вимірjuвальної системи міні-ГЕС, які доцільно враховувати в інформаційно-вимірjuвальній системі.

Представлені характеристики будуть зібрані за допомогою створеної інформаційної системи, та опрацьовані, з подальшим прийняттям рішень. Нижче, на рисунку 3.4 запропонована модель метрологічної системи, яка складається з ланцюга приладів та модулів, які виконують різні завдання, відповідно до поставлених вимог, а саме:

- фізичний об'єкт - це елемент гідроелектростанції, з якого знімаються параметри - наприклад, напір води в трубі, температура генератора, швидкість обертання турбіни;

- сенсор (давач) - вимірjuє фізичний параметр (наприклад, тиск води). Видає аналоговий сигнал, який пропорційний значенню тиску;

- підсилювач сигналу - призначений для посилення слабкого сигналу від сенсора. Деякі сенсори дають мілівольтові сигнали, які важко точно виміряти без підсилення;

- фільтр - видаляє електричні шуми або нестабільності: низькочастотний фільтр прибирає повільні коливання, високочастотний фільтр прибирає швидкі електричні наводки. Основною метою вводу фільтрації - це отримати чистий і стабільний сигнал, щоб уникнути похибок у вимірюваннях;

- АЦП (Аналого-Цифровий Перетворювач, ADC) – перетворює аналоговий сигнал у цифрове значення. Дає можливість обробляти дані мікроконтролером;

- мікроконтролер / Інтерфейс Отримує цифрові дані з АЦП. Обробляє, зберігає, передає або форматує їх через інтерфейси:

I2C – для коротких дистанцій;

SPI – швидкий обмін;

UART – простий послідовний обмін (до ПК або контролера);

- контролер – приймає оброблені дані для рішення про керування (відкрити заслінку, активувати генератор, подати сигнал тривоги), оптимізації та регулювання роботи ГЕС, та накопичення та аналізу (через AI/Big Data для довготривалих оцінок).



### Рисунок 3.4. Модуль інформаційно-вимірювальної системи для збору телеметричних даних

Нами запропоновано технічне рішення покращення роботи ГЕС за допомогою інформаційно-вимірювальних приладів (ІВП) на інтеграції моделі турбіни cross flow (рис. 3.5) та інформаційно-вимірювальних приладів в модель турбіни, яка є складовою обладнання міні ГЕС.

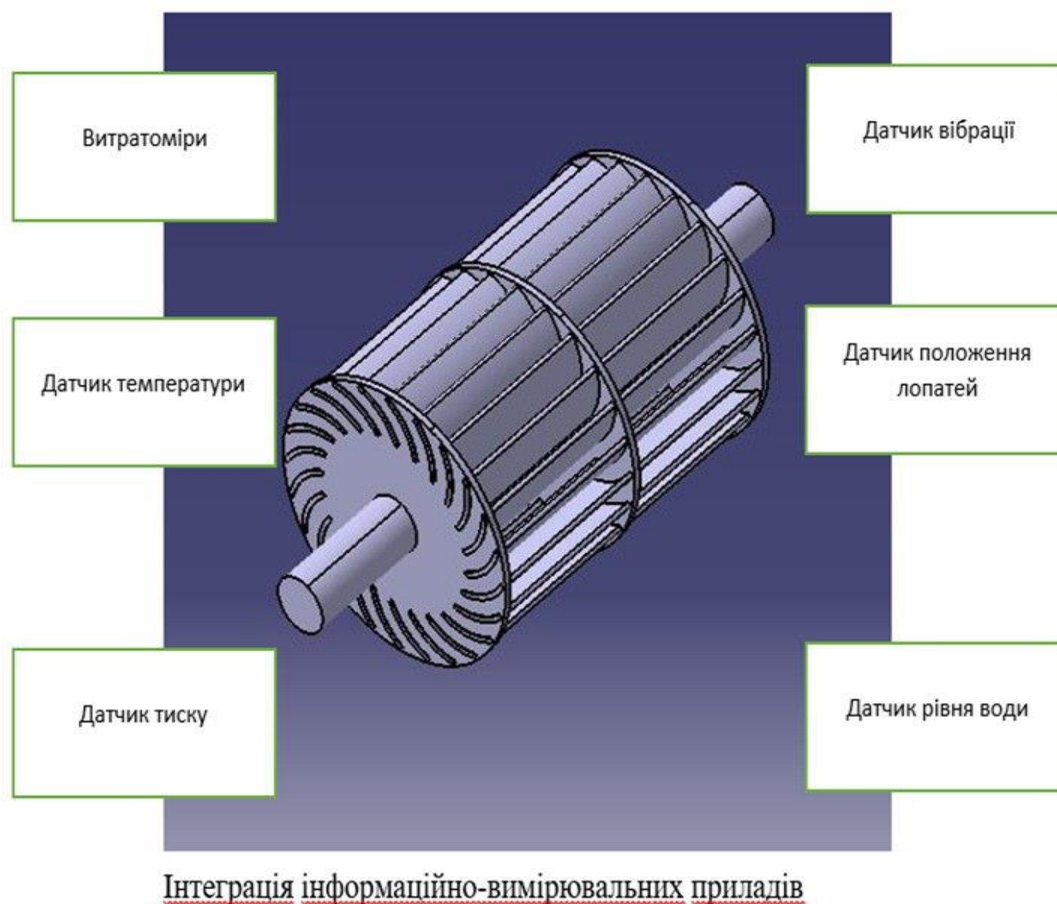


Рисунок 3.5 – Інтеграція моделі турбіни cross flow для міні ГЕС

Примітка: модель побудовано з допомогою програми CAD

На рис. 3.5 показано модель ротора турбіни, до якої інтегруються ключові інформаційно-вимірювальні прилади (рис. 3.6). Їх встановлення забезпечує контроль витрати води, температури підшипників, вібраційних характеристик, положення направляючих лопатей і тиску в гідравлічній системі. Це дає змогу в режимі реального часу виявляти відхилення і запобігати аварійним зупинкам, що особливо критично для безперервної роботи міні-ГЕС.

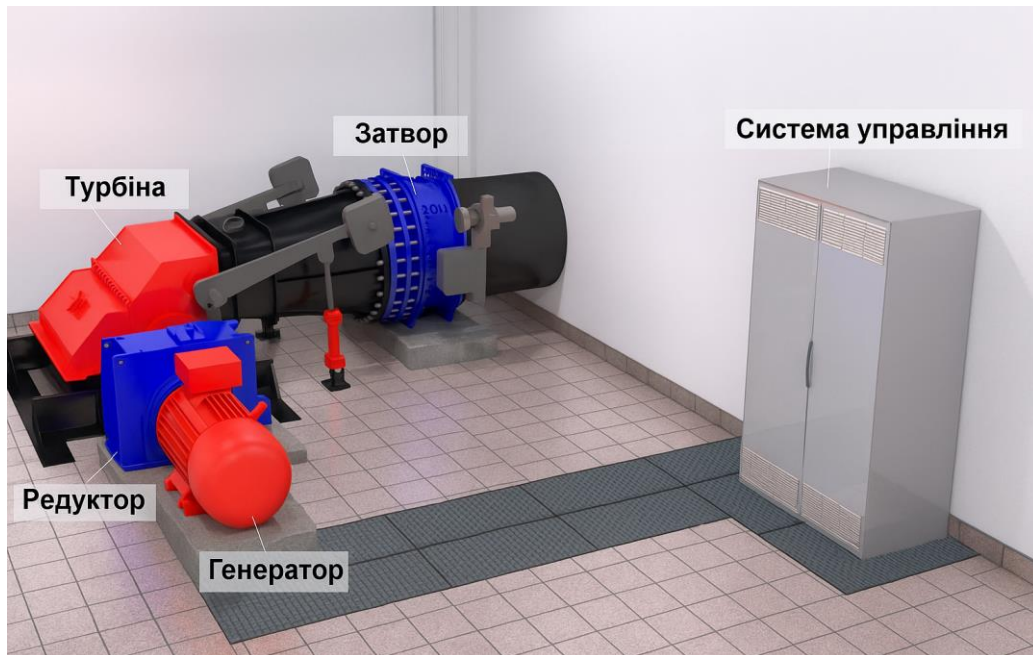


Рисунок 3.6 - Загальний вигляд встановленого в робоче положення обладнання МГЕС

У таблиці 3.4 представлено ключові точки інтеграції ІВП в модель турбіни міні-ГЕС.

Таблиця 3.4 – Ключові точки встановлення датчиків

Компонент	Розташування	Призначення
Витратомір (ультразвуковий/магнітоіндукційний)	На вході у спіральну камеру або трубопровід перед турбіною	Точний контроль витрати води для регулювання потужності
Датчі температури (наприклад, РТ100)	У підшипникових вузлах турбіни	Виявлення перегріву, попередження виходу з ладу
Датчі вібрації (віброметри, акселерометри)	На підшипниках, корпусі ротора	Виявлення дисбалансу, зносу
Датч положення направляючих лопаток	У приводі механізму направлення потоку	Автоматизація регулювання енергетичного режиму
Датч тиску	На вході до турбіни (у водоводі)	Моніторинг гідродинамічних характеристик
Датч рівня води	У водозабірному каналі чи перед греблею	Зв'язок із SCADA для розумного регулювання потужності

Метою інтеграції інформаційно-вимірювальних приладів (ІВП) у модель турбіни є отримання даних у реальному часі для ефективного управління роботою турбіни. Це дозволяє забезпечити точне моніторування технічного стану обладнання, вчасне виявлення відхилень та реалізацію оптимізаційних стратегій для підвищення ефективності виробництва енергії. Першим етапом є оснащення турбіни вбудованими сенсорами, що дозволяють зчитувати ключові параметри процесу. Зокрема, встановлюються датчі тиску на вхідній та вихідній трубі з метою контролю падіння напору, що є критичним показником для ефективної роботи гідросистеми.

Датчі обертів (RPM), закріплені на валу турбіни, дозволяють відстежувати швидкість обертання, що є індикатором навантаження та потужності. Температурні сенсори, розміщені в області підшипників або на корпусі турбіни, дозволяють виявити перегрів елементів конструкції.

Витратоміри забезпечують вимірювання об'єму води, що проходить через турбіну, а отже — дозволяють обчислювати ефективність використання водного ресурсу. Додатково застосовуються датчі вібрацій для діагностики зносу, розбалансування або виникнення механічних несправностей. Також інтегруються датчі генерації потужності, які фіксують реальну продуктивність системи.

На основі зібраних даних формується модуль управління, який реалізується за допомогою мікроконтролера на базі Arduino, PLC або Raspberry Pi. Такий контролер забезпечує зчитування показників із сенсорів і подальше виконання керуючих алгоритмів. Система здатна автоматично регулювати положення лопатей або заслінки, здійснювати захист у разі перегріву, критичних вібрацій або зниження вихідної потужності. Передбачено реалізацію кількох режимів роботи: «максимальна генерація», «робота на експорт», «аварійна зупинка», що дозволяє адаптувати функціонування турбіни до різних умов енергоспоживання та технічного стану.

Для забезпечення моніторингу у реальному часі реалізується система візуалізації та передачі даних. Моніторинг може здійснюватися як локально (за

допомогою вбудованого дисплея), так і через вебінтерфейс або спеціалізовану SCADA-систему. Дані з сенсорів можуть передаватися через Wi-Fi, LoRa або GSM-зв'язок, що дозволяє інтегрувати модель у смарт-мережу (Smart Grid) або передавати інформацію до диспетчерського пункту. Інтерфейс SCADA забезпечує візуалізацію ключових параметрів: обертів, температур, потужності тощо.

Розроблена модель турбіни може застосовуватись у різних напрямках. Зокрема, для моделювання впливу зміни витрати або напору на електрогенерацію; оптимального вибору розміщення сенсорних точок у CAD-моделі; підготовки до виробництва – шляхом 3D-друку окремих деталей або візуалізації конструктивних рішень; для програмного тестування датчиків у різних режимах навантаження та температури. Крім того, модель придатна для використання у навчальних або демонстраційних цілях – для візуального пояснення принципів роботи Smart Hydro та цифрового управління гідроенергетичними системами.

### **3.3 Ефективність інтеграції інформаційно-вимірювальних приладів (ІВП)**

Для оцінки ефективності інтеграції інформаційно-вимірювальних приладів проводиться порівняльна аналітика «до» і «після» впровадження рішення. До інтеграції система функціонувала з фіксованою потужністю та без постійного контролю технічних параметрів, що створювало ризики неефективного використання ресурсу та зростання аварійності. Після впровадження ІВП спостерігається зростання коефіцієнта використання водного ресурсу, підвищення ККД турбіни, зменшення кількості зупинок і поломок, а також можливість точної діагностики технічного стану вузлів.

Ефективність інтеграції інформаційно-вимірювальних приладів (ІВП) у модель турбіни визначається через покращення точності вимірювання, зменшення похибок та зростання ККД.

Впровадження витратоміра дозволить мінімізувати некоректне визначення обсягу виробленої енергії. Здійснимо порівняльні розрахунки:

### 1. Вимірювання витрати води до/після впровадження витратоміра.

До впровадження:

- Витрата визначається візуально або за непрямими ознаками (механічна шкала).
- Середня похибка:  $\pm 12\%$
- Очікувана витрата: 100 л/с
- Можлива реальна витрата: від 88 до 112 л/с
- Після впровадження цифрового витратоміра отримаємо такі результати:
- Точність сенсора:  $\pm 1\%$
- Можлива похибка: від 99 до 101 л/с

Різниця похибки:  $12\% - 1\% =$  зниження на 11%.

Таким чином, покращується точність обліку водного ресурсу та планування генерації.

### 2. Контроль температури підшипників.

До впровадження температура перевіряється вручну раз на зміну (візуально або термометром). Момент перегріву часто виявляється із запізненням. Результатами цього є пошкодження підшипника, отже простої біля 12 годин.

Враховуючи, що середня вартість електроенергії для підприємств (з урахуванням ринку, передачі, розподілу та ПДВ) сягає близько 10,4 грн/кВт·год, варіюючи від 9,2 до 10,9 грн/кВт·год, залежно від регіону [4], втрати через зупинку турбіни представлено на розрахунках:

$$\begin{aligned} \text{Втрати} &= \text{тривалість зупинки (год)} \times \text{встановлена потужність турбіни (кВт)} \\ &\quad \times \text{тариф (грн/кВт·год);} \end{aligned}$$

$$E_{\text{т.п.}} = 12 \text{ год} \times 200 \text{ кВт} \times 10 \text{ грн/кВт·год} = 24\,000 \text{ грн}$$

Після впровадження температурного сенсора виявлення перегріву відбуватиметься автоматично; система реагуватиме на зниження навантаження, охолодження або аварійна зупинка; час реагування триватиме 5 секунд. Внаслідок запобігання зупинці отримана економія рівна 24 000 грн/інцидент.

### 3. Контроль вібрацій та зниження аварійності.

До впровадження інформаційно-вимірjuвальної системи виявлення вібрацій відбувалось вручну або при виникненні поломки; частота аварій – 1 раз/місяць, середній ремонт – 7 000 грн. Після впровадження сенсора вібрацій та застосування алгоритму попередження кількість аварій скоротиться до 1 разу протягом 6 місяців. Розрахуємо економію від зменшення витрат:

Раніше:  $12 \times 7\,000 = 84\,000$  грн/рік.

Тепер:  $2 \times 7\,000 = 14\,000$  грн/рік.

Економія: 70 000 грн/рік.

### 4. Збільшення ККД завдяки точному регулюванню лопатей

До впровадження фіксоване положення заслінки – ККД  $\approx 72\%$ .

Після впровадження змін динамічне регулювання положення залежно від напору - ККД зростає до 81%.

Отже, приріст складе +9% до ефективності турбіни.

За виробництва 100 000 кВт·год/рік = +9000 кВт·год/рік.

Грошовий еквівалент (10 грн/кВт·год) = +90000 грн/рік.

Представимо загальні висновки щодо ефективності впровадження інформаційно-вимірjuвальних приладів в обладнання міні ГЕС (на рік для 1 турбіни) у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати впровадження інформаційно-вимірjuвальних приладів в обладнання міні ГЕС

Параметр	До ІВП	Після ІВП	Покращення / Економія
Точність вимірjuвання витрати	$\pm 12\%$	$\pm 1\%$	-11% похибки
Середня ККД турбіни	72%	81%	+9%
Витрати на ремонт/аварії	24 000 грн	0 грн	-24 000 грн

Економія енергії/збільшення вир.	—	+9000 кВт·год	+90000 грн
----------------------------------	---	---------------	------------

Отже, удосконалення системи ІВП дозволяє не лише підвищити точність моніторингу, а й досягти конкретних економічних і енергетичних вигод – через зменшення втрат, підвищення ефективності та уникнення аварійних ситуацій.

### Висновки до третього розділу

У третьому розділі обґрунтовано. Що інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів міні-ГЕС є ключовим компонентом сучасного енергооб'єкта, що забезпечує повну автоматизацію збору, аналізу, зберігання та візуалізації даних про роботу обладнання. Вона інтегрується в загальну енергосистему, динамічно реагуючи на зміни навантаження, що дозволяє ефективно регулювати генерацію електроенергії відповідно до потреб мережі. Завдяки SCADA-системам, датчикам, засобам зв'язку та модулю звітності забезпечується не лише технічна ефективність, але й екологічна відповідальність функціонування міні-ГЕС. В результаті реалізації такої системи досягається підвищення надійності, продуктивності та довговічності об'єкта.

Зроблено висновок про те, що в сучасних умовах експлуатації міні-ГЕС надзвичайно важливою є автоматизація процесів керування, зокрема – на основі інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), яка забезпечує збір, обробку, аналіз даних і формування керуючих рішень. Прийняття рішень відбувається на основі вхідних даних, що надходять із сенсорів, встановлених на ключових технологічних вузлах. До основних автоматизованих функцій прийняття рішень належать: регулювання навантаження турбін залежно від водного притоку та прогнозу споживання; управління положенням заслінок для оптимізації рівня та тиску; планування профілактичного обслуговування на основі аналізу зносу обладнання. Описано архітектуру інформаційно-вимірювальної системи міні-ГЕС, основними компонентами якої є: сенсори, процесор, контролер, система звітності. інтерфейс користувача). Узагальнено, що розроблена інформаційно-вимірювальна система міні-ГЕС забезпечує:

автоматизоване прийняття рішень у реальному часі; прогнозування, моніторинг і управління роботою обладнання; адаптацію до режимів енергосистеми та підтримку Smart Grid.

Запропоновано удосконалити інформаційно-вимірювальну систему моніторингу параметрів обладнання міні ГЕС за рахунок впровадження таких заходів: впровадження витратоміра, контроль температури підшипників, контроль вібрацій та зниження аварійності, збільшення ККД завдяки точному регулюванню лопатей турбіни. Визначено, що дане рішення забезпечить ефективність системи ІВП.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи на тему «Розроблення системи інформаційно-вимірювального контролю параметрів роботи міні-ГЕС на річці Чечва» було досягнуто поставлену мету – досліджено, розроблено та частково імплементовано інформаційно-вимірювальну систему для контролю параметрів функціонування міні-гідроелектростанції, що дає змогу підвищити ефективність, надійність та безпеку її експлуатації.

У результаті проведеного аналізу в першому розділі з'ясовано, що міні-ГЕС є перспективними об'єктами генерації відновлюваної енергії, особливо в регіонах з гірським рельєфом, як-от долина річки Чечва. Обґрунтовано роль автоматизованих систем контролю у стабільності роботи міні-ГЕС та зниженні експлуатаційних ризиків.

У другому розділі здійснено аналіз основних показників діяльності міні ГЕС. На основі врахування результатів аналізу обґрунтовано доцільність удосконалення інформаційно-вимірювальної системи, визначено основні параметри для моніторингу (витрата води, напруга, струм, температура генератора тощо), обрано відповідні методи збору та обробки даних. Побудовано математичну модель, яка дає змогу досліджувати взаємозв'язки між параметрами роботи, зокрема гідро турбіни та виявляти відхилення від норми.

У третьому розділі представлено практичну реалізацію запропонованої системи: виконано вибір сенсорного обладнання, з урахуванням технічних характеристик і сумісності; описано інтерфейс збору та візуалізації даних; проведено базову оцінку доцільності удосконалення інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів обладнання міні ГЕС. На основі проведених розрахунків можна зробити такі ключові висновки щодо ефективності впровадження інформаційно-вимірювальних приладів (ІВП) в обладнання міні ГЕС:

1. Значне підвищення точності вимірювання витрати води. До встановлення ІВП похибка становила  $\pm 12\%$ , після - лише  $\pm 1\%$ . Зменшення похибки на 11%

дозволяє значно точніше контролювати обсяги перетвореної енергії, уникати втрат та оптимізувати процес генерації.

2. Покращення енергетичної ефективності. Середній коефіцієнт корисної дії (ККД) турбіни зріс з 72% до 81%, що свідчить про поліпшення технічного стану обладнання та точніший контроль параметрів потоку. Це підвищує продуктивність міні ГЕС без додаткових капіталовкладень у заміну обладнання.

3. Суттєве зменшення експлуатаційних витрат. Витрати на аварійне обслуговування та ремонти зменшилися з 24 000 грн до 0 грн, що демонструє не лише зниження ризиків технічних несправностей, але й підвищення надійності системи.

4. Зростання виробництва електроенергії. Завдяки впровадженню ІВП, додатково вироблено 9 000 кВт·год електроенергії, що у грошовому еквіваленті становить орієнтовно 90 000 грн. Це підтверджує економічну доцільність застосування ІВП навіть на малих об'єктах генерації.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що впровадження інтелектуалізованого інформаційно-вимірювального комплексу на міні-ГЕС дає змогу не лише підвищити якість управління енерговиробництвом, а й сприяє інтеграції екологічно чистих технологій у локальні енергетичні системи України.

Ураховуючи стабільний попит на відновлювану енергію, проєкт має не лише фінансову вигоду, а й значний екологічний ефект, сприяючи переходу до сталої енергетики та зниженню викидів парникових газів. Це робить модернізацію міні-ГЕС стратегічно важливим кроком як для інвесторів, так і для регіонального розвитку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Звіт «Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні», <http://www.minregion.gov.ua/wpcontent/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukrai--ni.pdf>
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене/за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. – 56 с. [atlas\\_2024\\_publication.pdf](#)
3. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України том і аналітичний огляд. <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf>
4. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Тарифи на електричну енергію для юридичних осіб, 2023–2024 роки. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=2033>
5. Майстренко О. Ціна 1 кВт електроенергії для підприємств у 2025 році. Енергетика та інфраструктура. 19.03.2025. <https://rubicon.dp.ua/%D1%86%D1%96%D0%BD%D0%B0-1-%D0%BA%D0%B2%D1%82-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%97-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%94%D0%BC/>
6. Генеруючі агрегати і станції : конспект лекцій. Миколаїв: МНАУ, 2024. – 60 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/17443/1/generuyuchi-agregati-stanciyyi-141-konspekt.pdf>
7. Васько П.Ф. Мала гідроенергетика України: аналітичний огляд. Київ, 2014. URL: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2014-06/0620\\_pres2.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2014-06/0620_pres2.pdf)

8. Микитин О.А. Магістерська дисертація. Львів: ЛНУПІ, 2022.  
URL: [https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2459/1/Mykytyn\\_mag.pdf](https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2459/1/Mykytyn_mag.pdf)
9. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Відновлювані джерела енергії: монографія. – Київ, 2024. – 492 с.  
URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/monograph2024.pdf>
10. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Том II. Київ: ПІЕЕ, 2018.  
URL: <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf>
11. Мусінкевич В.В., Тептя В.В. Аналіз розвитку малих ГЕС України та їх участь у покритті графіка навантаження електромережі. Вінниця: Вінниц. нац. техн. ун-т, 2018. – 28 с.  
URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/26848/7153.pdf>
12. Мороз А.В. Технічний потенціал малої гідроенергетики України. Київ: Інститут ВДЕ НАНУ, 2014. – 19 с.  
URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/aref.pdf>
13. UkraineInvest. Джерела енергії в Україні 2023. Київ, 2024.  
URL: [https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2024/08/energy-sector-ua\\_compressed.pdf](https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2024/08/energy-sector-ua_compressed.pdf)
14. Yu.Yu. Varyvoda, A.M. Tymoshyk, V. Tsizh. Управління ефективністю роботи міні-ГЕС. ResearchGate, 2018.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/325519234\\_Upravlinna\\_efektivnistu\\_roboti\\_mini-GES](https://www.researchgate.net/publication/325519234_Upravlinna_efektivnistu_roboti_mini-GES)