

Удосконалення лабораторної установки для досліджень гвинтових турбін шнекового типу в малій гідроенергетиці

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.024>

Олександр Герба

Національний університет водного господарства
та природокористування, Рівне

o.v.herba@nuwm.edu.ua

Анотація — У статті представлено результати модернізації лабораторної установки для дослідження гвинтових турбін шнекового типу, що застосовуються в малій гідроенергетиці. Створено універсальний випробувальний комплекс, який дозволяє моделювати різні режими потоку, виконувати вимірювання гідравлічних і електричних параметрів ручними та автоматизованими способами, а також досліджувати вплив кута подачі потоку на ефективність турбін. Описано конструктивні вдосконалення: розробку направляючої системи потоку, впровадження SCADA-контролю, блока регульованого навантаження генератора та двоканальних систем вимірювання основних параметрів. Результати дослідження засвідчили підвищення стабільності гідравлічного режиму на 20 % та зниження сумарної похибки вимірювань до 3 %. Оновлена установка може використовуватись як науково-навчальна платформа для експериментальних досліджень у сфері малої гідроенергетики.

Ключові слова — мала гідроенергетика, гвинтова турбіна, шнекова турбіна, лабораторна установка, SCADA, 3D-друк, гідродинаміка.

I. ВСТУП

Мала гідроенергетика є перспективним напрямом відновлюваної енергетики, оскільки дозволяє використовувати потенціал малих річок без суттєвого впливу на екосистему. Гвинтові турбіни шнекового типу ефективно працюють при малих напорах (1–5 м) та низьких витратах води, однак їх дослідження вимагає експериментальних стендів, здатних точно відтворювати реальні гідродинамічні умови.

Більшість існуючих лабораторних установок не забезпечують комплексної реєстрації параметрів потоку, що ускладнює аналіз ефективності турбін. Тому актуальним є створення модернізованого лабораторного стенду з автоматизованими системами вимірювання, контролю та регулювання потоку.

Мета дослідження — удосконалення лабораторної установки для дослідження гвинтових турбін шнекового типу шляхом впровадження направляючої системи, подвійних вимірювальних модулів і автоматизованого контролю SCADA.

II. КОНСТРУКЦІЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка (рис. 1) виконана у вигляді дзеркального лотка прямокутного перерізу довжиною 15,6 м, обладнаного напірним баком, системою рециркуляції та блоком автоматизації [1]. Конструкція включає три секції:

- напірна частина з водозливом;
- зона стабілізації потоку з решітками;
- робоча зона з випробувальним модулем.

Подача води здійснюється через насосну систему, а витрата визначається за допомогою трикутного водозливу з п'єзометром та вираховується за формулою Томсона при куті вирізу 90° [2]:

$$Q = 1,4H^{2,5}$$

де: H - висота шару води над порогом трикутного водозливу

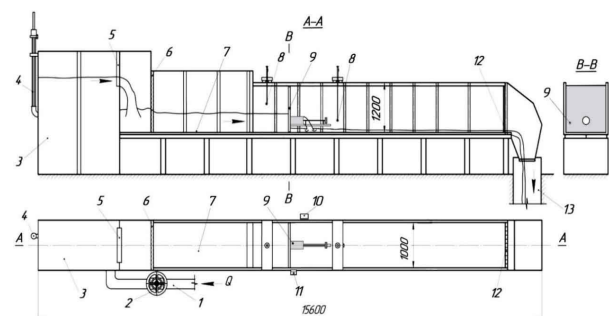


Рис. 1. Функціональна схема лабораторної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотка, 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – лоток лабораторної установки, 8 – датчики рівня води та шпигун масштaби, 9 – випробувальний модуль для досліджень, 10 – щит автоматизації, 11 – блок керування навантаженням, 12 – шпигунний затвор, 13 – резервуар для відведення води [3]

Особливістю конструкції є можливість регулювання рівня води у верхньому б'єфі за допомогою засувки та контрольного зміщення заслінки потоку. Це забезпечує формування ламінарного режиму течії та створює стабільні умови для вимірювання характеристик турбін.

III. ВИПРОБУВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ ТА СИСТЕМА ВИМІРЮВАНЬ

Випробувальний модуль створений як універсальний вузол для дослідження різних типів турбін (спіралеподібних, гвинтових, шнекових). Його конструкція забезпечує легку зміну моделей, співвісне розміщення генератора та ротора, а також мінімальні втрати енергії при передачі крутного моменту.

На рис. 2 схематично показано всі складові випробувального модуля для дослідів турбін у водному потоці, де вода з резервуара подається насосною системою в лоток лабораторної установки 1, де створюється водний потік з певною швидкістю. Заслінка водяного потоку 4 забезпечує контрольоване збільшення рівня води h в верхньому б'єфі, що контролюється датчиками [68] та шпіден-масштабом 2 і відповідними позначками на заслінці. Досліджувана турбіна 6 встановлюється в шахті 5, і вода проходить через її лопаті, змушуючи їх обертатися. Обертовий рух від турбіни за допомогою направляючого валу 12, з'єднаного муфтою 8, передається на генератор 13. Вироблена напруга та оберти генератора через провідник 11 передаються на контролер в щит автоматизації 9 та блок керування навантаженням 15. Датчики також передають сигнал на контролер у щит автоматизації та фіксують важливі параметри роботи турбіни: кількість обертів, напругу без навантаження, напругу під навантаженням, рівні води в верхньому та нижньому б'єфах [4].

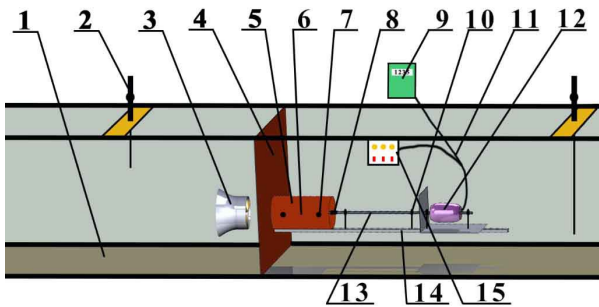


Рис. 2. Схема випробувального модуля для дослідів у водному потоці: 1 – лоток лабораторної установки; 2 – датчик та шпіден-масштаб, для зняття показників рівня води; 3 – направляюча камера потоку перпендикулярно лопатям турбін; 4 – заслінка водяного потоку; 5 – направляюча камера потоку (шахта); 6 – досліджувана турбіна; 7 – кріплення турбіни з підшипником; 8 – монтажна муфта; 9 – щит автоматизації; 10 – кріплення направляючого валу з підшипником; 11 – провідник; 12 – генератор; 13 – направляючий вал; 14 – монтажна направляюча; 15 – блок керування навантаженням [4].

Лабораторну установку з дослідження турбін обладнано щитом автоматизації з контролером, який:

- вимірює рівень рідини до і після експериментального стенду [5];
- вимірює кількість обертів турбіни з генератором;
- відображає мнемосхему експериментальної установки в режимі реального часу;
- вимірює величину виробленої електричної напруги в різних режимах навантаження та рівнях води у верхньому б'єфі;

- відображає отримані дані в графічному вигляді та записує в архів отримані результати.

Для автоматизації процесу вимірювання вищезазначених параметрів розроблено автоматичний контролер [6], який складається з:

- програмованого логічного контролера Siemens CPU 1215C;
- модуля розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT;
- давача тиску bd sensors Imp 808;
- перетворювач імпульсів датчика Холла з генератора, реалізований на основі ARDUINO NANO;
- давача дифузного та світло відбиваючого режимів Pepperl + Fuchs UB800-18GM40-I-V1;
- HMI панелі Schneider Electric HMIET6500.

Автоматизований контроль параметрів у лабораторній установці здійснюється за такою схемою: під час зміни рівня води датчик, підключений до аналогового входу модуля розширення, передає сигнал 4–20 мА пропорційно відстані до поверхні води. Контролер зчитує його на вході %IW102, перетворює у цифрове значення та масштабує у блоці FC1 відповідно до діапазону вимірювань. Рівень води визначається як різниця між початковою заміряною відстанню до дна лотка та поточним показом датчика.

Швидкість обертання ротора вимірюється за допомогою датчика Холла, вбудованого в генератор. Він формує 30 імпульсів на один оберт, які надходять до мікроконтролера Arduino Nano. Пристрій перетворює імпульси у напругу 0–5 В, що подається на аналоговий вхід контролера PIW0 для обчислення частоти обертання.

Напруга генератора вимірюється аналоговим датчиком, підключеним до входу PIW2. Сигнал з однієї фази проходить через трансформатор, нормалізується та масштабується у контролері, після чого цифрове значення використовується для аналізу ефективності роботи турбіни.

Для додаткового обчислення витрати води був використаний попередній розрахунок, який включав в себе визначення площі перерізу направляючої камери потоку і швидкості водного потоку. Використання математичних формул дозволило точно визначити витрату води в експериментальних умовах [7].

Визначення витрати води. Основною формулою для обчислення витрати водив програмному середовищі має вигляд [8]:

$$Q_1 = S_k v$$

де:

- Q_1 – визначена за допомогою програмного забезпечення, м³/с;
- S_k – площа перерізу направляючої камери потоку, (м²);
- v – швидкість водного потоку, (м/с).

Для забезпечення більш глибокого та всебічного аналізу вихідних показників, що виробляються генератором, у блоці керування навантаженням було здійснено поетапне збільшення навантаження. З цією метою до схеми підключено три ідентичні лампи розжарювання (див. рис. 3) загальною номінальною потужністю 63 Вт (3 лампи х 21 Вт кожна). Така конфігурація дозволила отримати вимірювання в чотирьох чітко визначених режимах: без навантаження (холостий хід) та при трьох різних рівнях навантаження, що сприяє комплексному дослідженню електричних характеристик генератора в широкому діапазоні робочих умов [4].

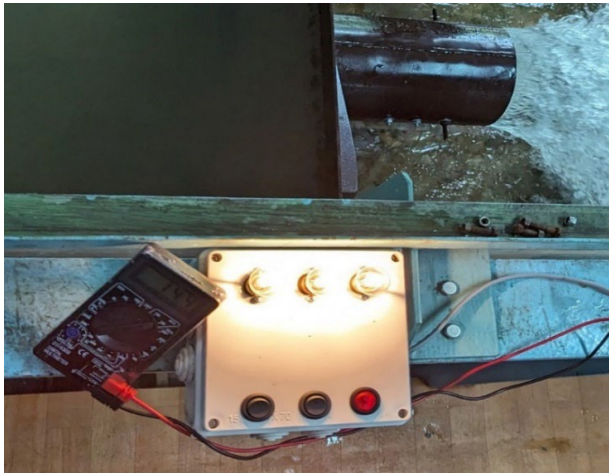


Рис. 3. Зовнішній вигляд блоку з електричним навантаженням

Конструкція випробувального модуля узгоджена з габаритами лотка лабораторної установки та забезпечує вимірювання рівня води у верхньому б'єфі в шести фіксованих точках, що дозволяє визначати робочі межі експериментів. Контрольні точки розташовані вертикально відносно верхньої кромки заслінки подачі потоку, при цьому нульова відмітка фіксується перпендикулярно до осі, що проходить через центр направляючої шахти потоку, як показано на рис. 4.

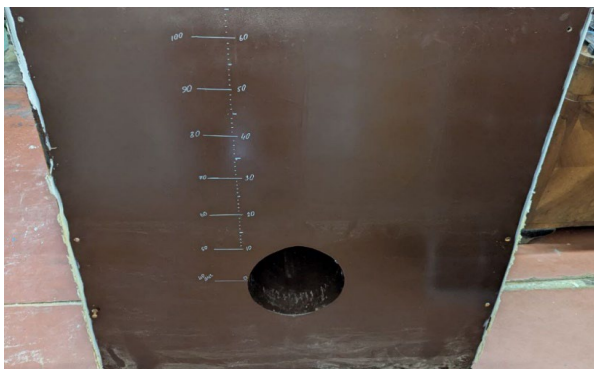


Рис. 4. Зовнішній вигляд випробувального модуля з контрольними позначками рівня води у верхньому б'єфі

Таке розташування забезпечує достатній простір для генератора над рівнем нижнього б'єфу, запобігає контакту електрообладнання з водою, знижує ризик затоплення та полегшує обслуговування. Конструкція також спрощує монтаж і заміну моделей турбін, що важливо для частих експериментів і навчальних завдань [4].

Для перевірки достовірності даних використано два паралельних методи вимірювання — автоматизований (контролер + SCADA) та ручний (прилади прямої дії). Це дозволяє верифікувати результати та визначити похибку вимірювань з точністю до 2 %.

IV. НАПРАВЛЯЮЧА ПОТОКУ

Для формування стабільного потоку під кутом 90° до лопатей турбін розроблено направляючу потоку, виготовлену методом 3D-друку з полімерного композиту (рис. 5). Конструкція має звужувальний профіль — від вхідного діаметра 0,315 м до вихідного 0,21 м, що забезпечує ефект стиснення струменя та підвищення швидкості потоку [4].

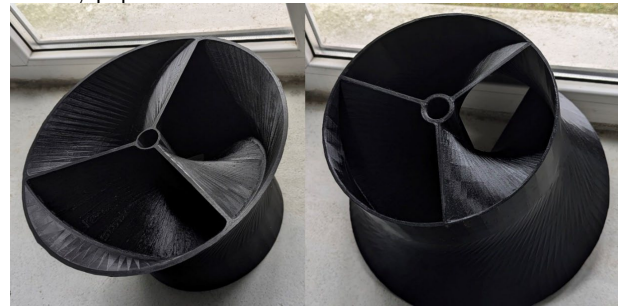


Рис. 5. Вигляд направляючої потоку з двох сторін

Базуючись на принципах гідродинамічної гармонізації, направляюча мінімізує втрати енергії, турбулентність і нерівномірність швидкостей, що підвищує точність і стабільність експериментів. Її форма дозволяє регулювати напрямок і рівномірність потоку, створюючи відтворювані гідродинамічні умови для дослідження.

Як показано на рис. 6, направляюча має дзеркально симетричні криві відносно лопатей турбіни, що забезпечує плавне перенаправлення потоку й зменшення турбулентності. Збільшений вхідний діаметр ($d_0 = 0,315$ м), який звужується до $d_c = 0,2095$ м, створює ефект стиску струменя, формуючи рівномірний розподіл швидкості та тиску [4].

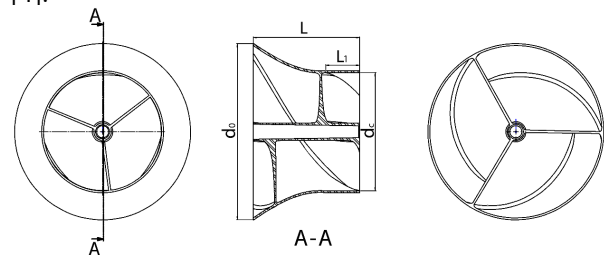


Рис. 6. Схема пристрою для спрямування потоку

Коефіцієнт стиску визначається як:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0} = \left(\frac{d_c}{d_0}\right)^2$$

а витрата Q_2 через направляючу [8]:

$$Q_2 = \mu S_0 \sqrt{2gh}$$

де $\mu=0,60-0,61$ – коефіцієнт витрати.

Таким чином, розроблена направляюча забезпечує плавне стиснення та стабільність потоку, знижує втрати енергії та створює контрольовані умови для дослідження ефективності гвинтових турбін.

V. ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТУРБІН

Для досліджень у розробленому випробувальному модулі створено п'ять експериментальних моделей турбін: три спіралеподібні, одну гвинтову та одну класичну шнекову.

3D-моделі розроблено в програмному середовищі Blender, а виготовлення здійснено методом 3D-друку на принтері Anycubic Kobra Max, що забезпечило високу точність геометрії та повторюваність форм.

Усі моделі мають уніфіковані розміри — діаметр 200 мм, довжина 210 мм, і виконують 0,75 оберта лопаті, що дозволяє проводити порівняльні випробування за однакових гідравлічних умов.

Випробувальний модуль забезпечує можливість тестування таких моделей турбін, а також інших варіантів з аналогічними габаритами, виготовлених методом 3D-друку, із можливістю швидкої заміни для серійних експериментів [4].

VI. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Модернізована лабораторна установка отримала комплекс технічних удосконалень, що істотно підвищили її точність, стабільність і функціональні можливості.

Запроваджено подвійні (ручні та автоматизовані) системи вимірювання основних параметрів, що дозволяє здійснювати взаємну перевірку та підвищити достовірність отриманих результатів.

Вимірювальні системи:

- Рівень води у верхньому (напір) та нижньому б'єфах контролюється п'єзометричними шкалами і ультразвуковими датчиками, підключеними до контролера, що забезпечує автоматичну реєстрацію показників і контроль стабільності напору.

- Оберти ротора вимірюються ручним тахометром і датчиком Холла, інтегрованим у SCADA - систему, яка здійснює збір, архівацію та аналіз даних у реальному часі.

- Напруга генератора контролюється мультиметром і аналоговим модулем SM 1231, що дозволяє відстежувати зміну напруги й потужності під час експериментів.

Для моделювання різних режимів роботи турбіни використано регульований блок навантаження, що складається з трьох ідентичних ламп розжарювання загальною потужністю 63 Вт (3 × 21 Вт) та опором 82,29 Ом (3 × 27,43 Ом)). Це дає змогу відтворювати режими від холостого ходу до повного навантаження генератора.

Витрата води визначається двома методами — непрямим (об'ємним) і гідравлічним, що дає можливість контролювати її в реальному часі.

Направляюча система з регульованою геометрією забезпечує зміну швидкості та кута атаки, формуючи стабільний потік під кутом 90° відносно лопатей, що дозволяє моделювати різні режими течії.

Межі експериментів:

- максимальна витрата — 0,160 м³/с;
- діапазон напорів — 0,2 – 0,6 м;
- максимальне навантаження — 63 Вт.

Після модернізації установка забезпечує:

- одночасний контроль п'яти ключових параметрів (рівень, витрата, оберти, напруга, навантаження);

- стабільну роботу при змінних напорах;
- інтеграцію з SCADA-системою для збору, архівації та аналізу даних;

- зниження сумарної похибки вимірювань до 3 %;

- формування керованого гідродинамічного середовища для відтворення різних режимів течії.

Узагальнення результатів.

Застосування направляючої системи потоку забезпечило рівномірність та стабільність гідравлічного режиму приблизно на 20 % у порівнянні з базовою конструкцією.

Оновлена установка стала універсальною експериментальною платформою для дослідження гвинтових, шнекових і спіралеподібних турбін різних геометрій.

Вона придатна для наукових, навчальних і практичних цілей, сприяє розвитку експериментальної бази малої гідроенергетики України та впровадженню інноваційних технологій у сферу відновлюваної енергетики.

- [1] Рябенко О. А. Хвилястий стрибок : монографія. Рівне : НУВГП, 2022. 277 с.
- [2] Рябенко О. А., Галич О. О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Методи та прилади візуалізації течії» студентами спеціальності 145 «Гідроенергетика» усіх форм навчання. Рівне : НУВГП, 2017. 37 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/8043/1/01-06-27.pdf> (дата звернення: 08.10.2025)
- [3] Рябенко О. А., Сунічук С. В., Галич О. О., Зайчук Р. М. Науково-технічний супровід експлуатації ГТС ГЕС Дніпровського та Дністровського каскадів : звіт з науково - дослідної роботи № 1504/24; № 2–179. 65 с.
- [4] Герба О.В. Удосконалення умов роботи та конструкцій гідравлічних турбін шнекового типу малих гідроелектростанцій. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії, НУВГП, Рівне, 2025.
- [5] Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1 : вебсайт. URL: <http://surl.li/yrzydu> (дата звернення: 08.10.2025).
- [6] Сафоник А. П., Таргоній І. М., Пилипенко В. М.. Розробка системи моніторингу та контролю процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель. МСІТ-2024. Моделювання, керування та інформаційні технології : VII Міжнародна науково-практична конференція 7–9.11.2024, м. Рівне. URL: DOI:10.31713/MCIT.2024.112. (дата звернення: 08.10.2025).
- [7] Letcher T. Comprehensive Renewable Energy. 2nd Edition. February 22, 2022. 5196 p. URL: <https://shop.elsevier.com/books/comprehensive-renewable-energy/letcher/978-0-12-819727-1> (дата звернення: 08.10.2025).
- [8] Федорець В. О., Педченко М. Н., Федорець О. О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідроприводи : підручник. Житомир : ЖІТІ, 1998. 412 с.