



УДК 621.311.21:556.16:681.2

## ASSESSMENT OF THE HYDROPOWER POTENTIAL OF SMALL RIVERS IN UKRAINE USING MODERN MEASUREMENT SYSTEMS

### ОЦІНКА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МАЛИХ РІЧОК УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

**Vashchyshak I. R. / Ващишак І.Р.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-9078-6726

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
Karpatska Street, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15 м. Івано-Франківськ, Україна, 76019***Chernetska I.V. / Чернецька І.В.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0009-0006-7643-2565

*National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Vitaliia Hrytsaienka, 24, Poltava, Ukraine, 36011**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,  
просп. В. Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011*

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну проблему оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок України в контексті розвитку відновлюваної енергетики та підвищення енергоефективності децентралізованих енергосистем. Обґрунтовано доцільність використання малих водотоків, особливо гірських річок Карпатського регіону, які характеризуються значними ухілами русла, стабільними гідрологічними режимами та наявністю невикористаного енергетичного потенціалу. Показано, що ефективне впровадження малих гідроелектростанцій потребує комплексного підходу до визначення ключових гідрологічних параметрів, зокрема витрати води, величини напору та температури водного середовища. У роботі використано аналітичні, гідрометричні та метрологічні методи дослідження, а також елементи математичного моделювання потоків. Розглянуто прямі й непрямі методи визначення витрати води, зокрема гідрометричний, поплавковий, об'ємний та акустичний методи, із застосуванням сучасних вимірювальних засобів, таких як доплерівські профілометри, електромагнітні витратоміри та автоматизовані гідрологічні станції. Особливу увагу приділено аналізу похибок вимірювання та їх впливу на результати енергетичних розрахунків. Показано, що навіть незначні відхилення у визначенні витрати або напору призводять до пропорційних похибок у розрахунку потужності та прогнозуванні енерговиробітку. Наведено узагальнений підхід до оцінювання сумарної невизначеності результатів відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 748 та ISO 6416. Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних вимірювальних підходів до оцінки гідропотенціалу малих річок із урахуванням метрологічних характеристик та можливостей автоматизованого збору даних. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час проєктування, модернізації та оптимізації режимів роботи малих гідроелектростанцій в умовах річкових систем України.

**Ключові слова:** гідроенергетика, гідротурбіна, енергетична ефективність, мала ГЕС, витрата води, напір.



## Вступ.

Мала гідроенергетика вважається одним із ключових елементів стратегії розвитку відновлюваної енергетики в Україні, насамперед через наявність значного гідропотенціалу, притаманного малим річкам, особливо у регіонах з вираженим рельєфом. Серед гірських регіонів Карпати мають найбільшу придатність до впровадження малої гідроенергетики завдяки значним перепадам висот та сталим гідрологічним характеристикам. Такі річки, як Прут, Черемош і Тиса, демонструють високі значення енергетичного потенціалу через ухили русел, що подекуди досягають 5-10 м/км.

Станом на сьогодні в Україні діє понад 100 малих гідроелектростанцій (ГЕС) загальною встановленою потужністю близько 200 МВт, що становить лише 0,5% від сумарної потужності національної енергосистеми [1]. Приклади діючих малих ГЕС, розміщених на річках з високою водністю та значним ухилом русла – типовими умовами для гірських територій України (табл. 1).

**Таблиця 1 – Приклади малих ГЕС в Україні**

Назва ГЕС	Річка	Область	Потужність, МВт	Рік введення
Тур'я-Полянська	Тур'я	Закарпатська	1.2	2011 рік
Слобідська	Черемош	Івано-Франківська	0,8	2014 рік
Верхньобистрянська	Ріка	Закарпатська	0,6	2016 рік
Сянська	Сян	Львівська	1.0	2018 рік
Косівська	Пістинька	Івано-Франківська	0,7	2020 рік

Більшість об'єктів функціонує на базі обладнання, введеного в експлуатацію ще в другій половині ХХ століття, що зумовлює низьку енергоефективність і підвищену зношеність. Тому нагальною є потреба в модернізації існуючої інфраструктури та впровадженні високотехнологічних рішень.

Разом з тим ефективне використання потенціалу малих річок неможливе без



комплексного підходу до оцінки їх водних ресурсів. Сьогодні це вимагає впровадження точних методів вимірювання ключових гідрологічних параметрів, таких як витрата, напір і варіативність потоку.

Використання новітніх вимірювальних технологій, зокрема гідроакустичних сенсорів, електромагнітних витратомірів, а також дронів для аерофотозйомки, відкриває нові можливості для підвищення точності оцінювання параметрів водного потоку, зокрема витрати, напору та інших характеристик. Зокрема, гідроакустичні методи дозволяють досягти похибки вимірювання на рівні не більше  $\pm 1\%$ , що істотно підвищує точність прогнозування енерговиробітку на малих ГЕС. Водночас автоматизовані гідрологічні станції забезпечують безперервний збір даних у режимі реального часу, що дає змогу оперативно реагувати на зміни гідрологічного режиму та оптимізувати роботу станцій.

Саме тому необхідність модернізації методичних підходів до оцінки гідроенергетичного потенціалу малих річок сьогодні набуває особливої актуальності та вимагає комплексного науково-практичного осмислення.

### **Основний текст.**

Основною гідрологічною характеристикою річки, яка визначає її енергетичний потенціал, є витрата води, що позначається як  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Витрата води є базовим показником для розрахунку можливостей вироблення електроенергії на ділянках річкових систем. Існує безпосередня залежність між значенням  $Q$  та такими характеристиками, як ухил водної поверхні, кінематичні особливості течії, а також морфологія дна – усі ці фактори формують основу для гідротехнічного проєктування [1].

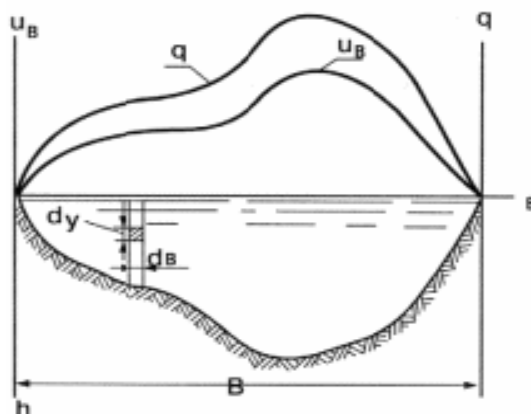
Існує два підходи до визначення витрати води: непрямий, що базується на побудові залежності між рівнем води та її витратою, і прямий – шляхом безпосереднього вимірювання. Прямі методи вважаються більш точними, особливо за умови застосування сучасного обладнання.

Найефективнішими на сьогодні є ультразвукові й акустичні доплерівські профілометри, які дозволяють визначати швидкісний профіль потоку у



поперечному перерізі річки з високою просторовою роздільною здатністю [2]. Значного поширення набувають також гідрометричні комплекси з дистанційним зчитуванням інформації, які інтегруються з геоінформаційними платформами (GIS) для подальшого моделювання гідрологічних процесів.

Базовим при вимірюванні витрати води в річковому руслі вважається гідрометричний метод, який полягає в обчисленні об'єму води, що протікає крізь поперечний переріз русла (рис. 1) за одиницю часу. Згідно з принципом методу, повна витрата  $Q$  визначається як сума часткових витрат через умовні сегменти поперечного перерізу. Кожен такий сегмент розглядається як окрема елементарна ділянка, для якої обчислюється добуток локальної швидкості течії та відповідної площі. Такий підхід дозволяє з достатньою точністю оцінити загальний об'єм води, що протікає через контрольовану ділянку.



**Рисунок 1 – Поперечний переріз потоку [1]**

Якщо вектор швидкості утворює певний кут  $\alpha$  з нормаллю до неї, то елементарну витрату  $dQ$  можна подати у вигляді [3]:

$$dQ = u \cdot \cos \alpha \cdot dW \quad (1)$$

де  $u$  – модуль локальної швидкості потоку,  $\alpha$  – кут між напрямком швидкості і нормаллю,  $dW$  – площа елементарного сегмента поперечного перерізу.

Загальна витрата води через весь переріз визначається інтегруванням цієї залежності по всій площі перерізу [3]:

$$Q = \int u \cdot \cos \alpha \cdot dW = \int \int u \cdot \cos \alpha \cdot dx \cdot dy \quad (2)$$



Така математична модель дозволяє враховувати складні просторові розподіли швидкості потоку, що особливо важливо при гідротехнічному моделюванні або проєктуванні малих гідроелектростанцій.

Цей метод активно застосовується завдяки впровадженню електромеханічних та акустичних засобів вимірювання: млинки обладнуються цифровими логерами, а системи типу ADCP забезпечують деталізоване сканування структури потоку в поперечному перерізі річки [2].

Метод поверхневих поплавців, що полягає у визначенні швидкості поверхневої течії шляхом фіксації часу проходження поплавцем відомої відстані, попри спрощеність, досі застосовують для попередніх оцінок водного режиму, зокрема на ранніх етапах досліджень гідропотенціалу малих ГЕС.

Швидкість руху кожного поплавця обчислюється за співвідношенням [3]:

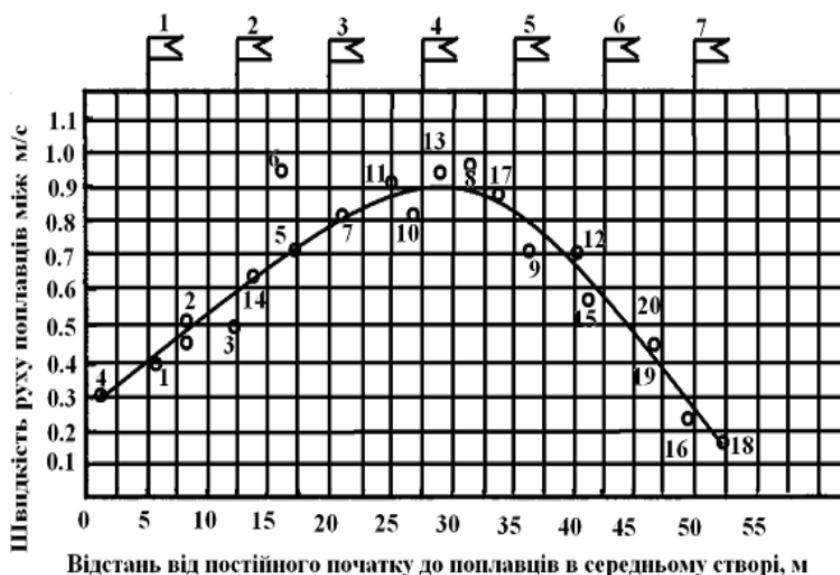
$$v_i = \frac{L}{t_i} \quad (3)$$

де  $L$  – довжина ділянки між створами (м), а  $t_i$  – час проходження поплавцем цієї відстані (с).

Для забезпечення відносної репрезентативності результатів вимірювання поплавці пускають у різних точках поперечного перерізу русла, що дозволяє зафіксувати неоднорідність швидкості потоку в горизонтальній площині.

На основі цих даних будується плавна епіюра швидкостей, яка відображає зміну швидкості течії по ширині потоку. Візуалізація результатів, як правило, подається у вигляді схематичної кривої, що проходить через нанесені точки перетину поплавців на створі (рис. 2).

Попри спрощеність, метод поверхневих поплавців досі застосовують для попередніх оцінок водного режиму, зокрема на ранніх етапах досліджень гідропотенціалу малих ГЕС. Такі дані можуть слугувати базою для первинних інженерних рішень. Однак через високу чутливість до вітру та стану водної поверхні він не використовується під час льодоходу, льодоставу або при швидкості вітру понад 6 м/с [1].



**Рисунок 2 – Епюра розподілу швидкості руху поплавців по ширині річки [3]**

Об'ємний метод застосовується переважно для визначення витрат води у дрібних водотоках, зокрема струмках і джерелах, де інші способи вимірювання є складними або економічно недоцільними [3]. Суть методу полягає у тому, що в обраному місці потік спрямовується через вертикальну стінку з отвором і лотком, котрі скеровують воду безпосередньо в мірну посудину. Це дозволяє здійснювати пряме вимірювання об'єму води за певний проміжок часу. Для вимірювання витрати об'ємним методом використовують мірний посуд різного типу – мензурки, колби, відра чи баки, за умови що час їх заповнення становить не менше 40 секунд для забезпечення точності результатів. Якщо витрата перевищує 5 л/с, воду відводять у мірний басейн об'ємом 1–2 м<sup>3</sup>, попередньо протарований при різних рівнях. Вимірювання приросту рівня протягом певного часу, що фіксується за допомогою гачкової або голчастої рейки, дає змогу обчислити витрату потоку з достатньою точністю.

Вимірювання напору рідини здійснюється гідростатичним методом, суть якого полягає у використанні лінійної залежності між висотою стовпа рідини та тиском, що чиниться ним задану точку вимірювання [4]:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$

де  $P$  – тиск стовпа рідини;  $\rho$  – густина рідини (кг / м<sup>3</sup>);  $g$  – прискорення вільного



падіння ( $9,8 \text{ м/с}^2$ );  $h$  – висота стовпа рідини (м).

До високоточних засобів вимірювання тиску належать прилади, що працюють на основі п'єзоелектричного ефекту. Під час роботи з динамічними навантаженнями значний вплив має так званий квазістатичний тиск, який зазвичай набагато перевищує миттєві значення і може досягати 10 МПа. Також для вимірювання тиску застосовуються п'єзотранзистори (пітрани) – високочутливі елементи, що реагують на зміну тиску та вбудовуються у відповідні сенсорні системи. Також, серед пристроїв для вимірювання тиску значну роль відіграють манометри, які класифікують на опірні та диференціальні. Перші застосовуються для вимірювання високих тисків – понад 100 МПа. Їхній принцип дії базується на зміні електричного опору матеріалу (провідника або напівпровідника), що виникає внаслідок деформації під дією тиску. Диференціальні манометри використовують для визначення надлишкового тиску, різниці тисків, рівня рідини та об'єму витрат рідини. Такі прилади часто поєднують із звужувальними елементами, що формують лінійну залежність між перепадом тиску і величиною витрати. Завдяки цьому досягається висока точність навіть в умовах інтенсивної експлуатації.

Для забезпечення точності вимірювань в умовах коливань температури, часто застосовують температурну компенсацію. Вона дає змогу врахувати вплив температури на густину рідини та відповідно скоригувати результати. Для цього, як правило, використовуються спеціальні таблиці поправок, за якими вручну вносяться необхідні коригування.

Температурну поправку обчислюють за наступним співвідношенням [4]:

$$P_{\text{кор}} = \rho(T) \cdot g \cdot h \quad (5)$$

де  $\rho(T)$  – густина води при температурі  $T$ .

Оцінка потужності гідроелектроустановки базується на гідрологічних, технічних і метрологічних даних та здійснюється з виразу [4]:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (6)$$

де  $P$  – потужність (Вт);  $\eta$  – ККД;  $\rho$  – густина води,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  –  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $Q$  – витрата води,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напір, м.



Точність визначення гідрологічних параметрів має вирішальне значення для досягнення достовірних енергетичних показників. Зокрема, критичними є: об'ємна витрата води, висота гідравлічного напору та температура водного середовища. Навіть незначні похибки у визначенні цих характеристик здатні спричинити суттєві відхилення в оцінці ефективності функціонування гідроагрегатів і в коректному плануванні режимів їхньої експлуатації.

Потужність гідроустановки є прямо пропорційною до витрати води. Відповідно, помилка у визначенні витрати призводить до еквівалентної похибки в обчисленні потужності та сумарного обсягу виробленої електричної енергії. Наприклад, при відхиленні вимірювання витрати на рівні 5% спостерігається приблизно такий самий рівень невідповідності у фінальних розрахунках [5]. Аналогічна закономірність спостерігається і у випадку висоти напору, що також має лінійну залежність із величиною потужності. У цьому випадку навіть похибка в 1% при визначенні напору трансформується у близько 1% помилки в оцінці енергогенеруючої здатності станції [5]. Температурний режим водного середовища, хоча і не має прямого впливу на потужність, все ж опосередковано впливає через зміну густини води. Оскільки густина входить до рівняння потужності у вигляді коефіцієнта, її коливання можуть викликати незначні, але помітні відхилення в обчисленнях. Зокрема, похибка у вимірюванні температури води в межах 1 °С може змінити значення густини на 0,02–0,05%, що має значення у системах, де передбачено високоточне енергетичне моделювання [5].

Сумарна похибка, яка виникає під час обчислення потужності, обумовлена точністю визначення всіх вхідних параметрів, зокрема витрати води, напору та температури. У випадках, коли ці похибки не залежать одна від одної, можливо застосувати узагальнену оцінку відносної похибки потужності шляхом використання відповідної аналітичної формули [4]:

$$(\Delta P/P)^2 \approx (\Delta \rho/\rho)^2 + (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta H/H)^2 \quad (7)$$

Такий підхід надає можливість кількісно визначити вплив кожного окремого параметра на загальну невизначеність у розрахунку потужності, що є дуже важливим у процесі формування обґрунтованих енергетичних прогнозів.



Також встановлено чіткі вимоги до класу точності приладів. Згідно з ISO 748 [6] в оптимальних умовах вимірювання відносна похибка не повинна перевищувати  $\pm 5\%$ . У більш складних ситуаціях, як-от під час паводків чи зміни русла, допускається похибка до  $\pm 10\%$ , а при орієнтовних розрахунках – навіть до  $\pm 15\%$ .

Отже, надійне оцінювання гідроенергетичних можливостей малих річок потребує максимальної точності у встановленні основних гідрологічних характеристик, зокрема витрати води, величини напору та температурного стану водного середовища, оскільки саме ці параметри безпосередньо впливають на продуктивність та доцільність експлуатації малої гідроелектростанції. Застосування таких підходів, як млинкові, поплавкові, акустичні та об'ємні методики, відповідно до вимог міжнародних нормативів ISO 748 [6] і ISO 6416 [7], дає змогу адаптувати отримані результати до специфічних умов річкових систем України. Водночас особливе значення має впровадження автоматизованих платформ збору та обробки інформації, які не лише забезпечують постійний контроль за змінами гідрологічного режиму, а й дозволяють оперативно інтегрувати ці дані у цифрові аналітичні моделі.

### Література:

1. Державне агентство водних ресурсів України: офіційний сайт. URL: <https://www.davr.gov.ua> (дата звернення: 01.11.2025).
2. Iozzi Sperandelli, D., & Zenker Gireli, T. Discharge measurements field validation using remote-controlled boat with ADCP. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2022, №11(3), p. 345–356.
3. Яров Я.С., Гращенко Т.В., Пилипюк В.В. Геодезичне забезпечення моніторингу водних екосистем: конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2024. 185 с.
4. Шакірзанова Ж. Р., Бурлуцька М. Є. Гідрологічні розрахунки і прогнози: конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2016. 158 с.
5. European Small Hydropower Association (ESHA). *Hydropower Technology Handbook*. Brussels: ESHA, 2020. 96 p.



6. ISO 748:2007. Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats.

7. ISO 6416:2017 Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic transit time (time of flight) method.

**Abstract.** *The article addresses the actual problem of assessing the hydropower potential of small rivers in Ukraine in the context of renewable energy development and improving the energy efficiency of decentralized power systems. The feasibility of utilizing small watercourses, particularly mountain rivers of the Carpathian region, is substantiated, as they are characterized by significant channel slopes, stable hydrological regimes, and the presence of untapped energy potential. It is demonstrated that the effective implementation of small hydropower plants requires a comprehensive approach to determining key hydrological parameters, including water discharge, hydraulic head, and water temperature. The study employs analytical, hydrometric, and metrological research methods, as well as elements of flow mathematical modeling. Both direct and indirect methods for determining water discharge are considered, including hydrometric, float, volumetric, and acoustic methods, using modern measuring instruments such as Doppler profilers, electromagnetic flow meters, and automated hydrological stations. Special attention is paid to the analysis of measurement errors and their impact on the results of energy calculations. It is shown that even minor deviations in the determination of discharge or head lead to proportional errors in power calculation and energy yield forecasting. A generalized approach to assessing the overall uncertainty of results in accordance with the requirements of international standards ISO 748 and ISO 6416 is presented. The scientific novelty of the study lies in the systematization of modern measurement approaches to assessing the hydropower potential of small rivers, taking into account metrological characteristics and the capabilities of automated data acquisition. The practical significance of the obtained results lies in their applicability to the design, modernization, and optimization of operating modes of small hydropower plants within the river systems of Ukraine.*

**Key words:** *hydropower, hydro turbine, efficiency, energy performance, small HPP, water discharge, head.*

Статтю надіслано: 27.01.2026 р.

© Ващишак І.Р., Чернецька І.В.