



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-37

УДК 658.631

М. І. Бабич, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-1295-4162

С. В. Коробка, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4717-509X

*Львівський національний університет природокористування*

e-mail: m.babych@ukr.net, тел.: 097-763-58-32

## МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТУРБИНИ ТА ДЕРИВАЦІЙНОГО КАНАЛУ МІКРОГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ УМОВ ГІРСЬКОЇ РІЧКИ

*Анотація.* В статті представлено методику дослідження параметрів гідроелектростанції для малих гірських річок. Обґрунтовано що для даного регіону доцільним є використання гідроспоруд дериваційного типу без застосування гребель та водосховищ. Обґрунтовано критерій оптимізації – прибуток від виробленої та реалізованої електроенергії в загальну мережу за «зеленим» тарифом, що дозволяє знайти оптимальний варіант для забезпечення максимального освоєння потенціалу річки та зменшення затрат на виробництво електроенергії. Розроблено алгоритм досліджень, який є основою для статистичного імітаційного моделювання віртуальної системи «мікро-ГЕС – річка» в результаті якого можливо обґрунтувати параметри гідроелектростанції для умов досліджуваної річки.

*Ключові слова:* річка, мікрогідроелектростанція, дериваційний канал, гідротурбіна, оптимізація.

*Постановка проблеми.* За перші місяці війни в Україні виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії значно скоротилось. Зокрема на півдні обсяги його впали на 40 %. При цьому на заході відпуск відновлюваної енергії виріс на 70%, за рахунок сонячних та вітрових електростанцій. Незважаючи на зростання виробленої «зеленої» електроенергії на заході, існує проблема забезпечення стійкості об'єднаної енергосистеми України. Адже через бойові дії на сході та півдні зупинені маневрові енергоблоки теплоелектростанцій, які виконували функції балансування та акумулювання енергії для забезпечення стійкості системи. На даний момент сонячні та вітрові електростанції такої задачі не вирішують. Ці проблеми вирішуються за рахунок освоєння стабільнішої гідроенергії.

За даними «Укргідропроекту» гідропотенціал малих річок України



складає 2 млн. кВт, з яких 30 % зосереджено у Карпатському регіоні [3]. Малі гідроелектростанції (МГЕС), без значного шкідливого впливу, можуть стати важливою складовою енергозабезпечення для регіонів Західної України, а для деяких районів Чернівецької і Закарпатської областей – джерелом повного енергозабезпечення. Для ефективного освоєння гідроенергетичного потенціалу річок, насамперед необхідно розробити методики обґрунтування параметрів мікрогідроелектростанцій (мікро-ГЕС) в конкретних умовах.

*Аналіз останніх досліджень.* На сьогоднішній день є багато праць присвячених обґрунтуванню параметрів гідроелектростанцій (ГЕС) на річках, адже даний напрям наукових досліджень розвивається протягом століть. Однак більшість робіт, зокрема [5, 8, 9], присвячено обґрунтуванню параметрів гідрообладнання великих ГЕС, розташованих на рівнинних річках, для створення напору яких використовують водосховища. У [5] описані відносні переваги гідроагрегатів різних типів для різних умов і робочих режимів. Дане дослідження стосується високонапірних турбін з напором від 200 до 800 м для рівнинних річок. Результати його можна використати лише частково, оскільки в нашому дослідженні використовується мікро-ГЕС, яка не потребує менших напорів.

У роботі [6], дослідження спрямовані на визначення оптимального місця розташування і потужності мікро-ГЕС для умов Ірану. Дана робота є цікавою з позиції електрозабезпечення автономного споживача у важкодоступних районах. Дослідження в [7] присвячене перспективам використання мікро-ГЕС для електрозабезпечення віддалених споживачів Узбекистану. Хоча у роботі здійснене обґрунтування гідроагрегату у складі пропелерної гідротурбіни та асинхронного генератора, однак методика є дуже загальною та більше стосується процесу перетворення гідравлічної енергії потоку рідини в електричну енергію, зокрема узгодження асинхронного генератора з гідротурбіною.

Цікавою є робота [8], де авторами обґрунтовано, що для того щоб гідроенергетика стала частиною сталого майбутнього, необхідно залишити в минулому ГЕС з великими греблями, які своїми водосховищами підтоплюють значні території, необхідно використовувати екологічні установки, зокрема МГЕС та мікро-ГЕС, які не порушують екологію водотоків, рибне господарство та життя людей, а також поєднувати їх виробництво з іншими відновлюваними джерелами енергії.

У [9] представлені результати дослідження та удосконалена методика розрахунку водовідвідних споруд низького напору ГЕС зі встановленою поперечно-реактивною гідротурбіною, що актуально для електропостачання малих споживачів електроенергії в Центральній



Азії. Недоліком даного дослідження є відсутність прив'язки до конкретної річки, а також не обґрунтовано який саме тип турбіни необхідно застосовувати. Також методика не враховує вартісної складової.

Досить ґрунтовні дослідження проведені в роботі [10], зокрема обґрунтовано використання різних типів турбін в залежності від гідрологічних характеристик річки, та прийнятих умов роботи мікро-ГЕС. Результати можна застосувати лише частково, оскільки в роботі розглядається застосування греблі для створення напору.

Таким чином, для ефективного використання гідроенергетичного потенціалу малих річок необхідне застосування підходів, поєднаних єдиною методологією з використанням системного підходу. Насамперед необхідно розкрити особливості роботи мікро-ГЕС в умовах малих гірських річок та обґрунтувати їх системні функціональні показники та критерії оптимізації.

*Формулювання мети статті.* Метою даного дослідження є розроблення відповідних методик, які давали б змогу обґрунтувати параметри мікро-ГЕС, зокрема гідротурбіни та дериваційного каналу в умовах гірської річки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати тип мікро-ГЕС для освоєння гідропотенціалу гірських річок;
- розкрити та обґрунтувати системні функціональні показники мікро-ГЕС в умовах малих річок;
- обґрунтувати критерії оптимізації параметрів мікро-ГЕС;
- розробити алгоритм дослідження віртуальної системи «мікро-ГЕС – річка».

*Основна частина.* На сьогодні немає єдиної світової класифікації щодо того, які ГЕС належать до малої гідроенергетики. У більшості країн, як і в Україні, малі гідроелектростанції (МГЕС) потужністю до 10 МВт, з яких мікро-ГЕС до 0,2 МВт, і міні ГЕС до 1 МВт.

В Україні нараховується 152 МГЕС, проте в Карпатському регіоні, до якого відноситься Львівська, Івано-Франківська, Закарпатська і Чернівецька області, знаходиться лише 20 МГЕС, що дуже мало зважаючи на гідропотенціал регіону [3].

Для обґрунтування типу мікро-ГЕС, насамперед необхідно охарактеризувати особливості гірських річок на яких вони будуть використовуватись. Цим річкам притаманний гірський характер, їх схили є стрімкими, а долини є глибокими та вузькими. Тому для даних умов ефективною є застосування дериваційної схеми створення напору. Значні ухили русла дозволяють отримати високий напір за незначної довжини дериваційного каналу. При цьому непотрібно будувати греблю, яка може спричинити значне підтоплення території.



Крім схеми створення напору, важливим є обґрунтування типу гідроагрегату, основним елементом якого є гідротурбіна. Гідротурбіну вибирають за витратою води та створеним напором. При цьому гідротурбіна налаштована на певний діапазон робочих витрат води. При дериваційній схемі це важливо, адже за відсутності водосховища ми можемо розраховувати лише на мінливий природний стік води.

Для гірських річок Карпатського регіону необхідна така гідротурбіна, яка працює на високих напорах та малій кількості води. При цьому діапазон робочих витрат має бути досить широким. Даним вимогам відповідає радіально-осьова турбіна Френсіса, яку ми будемо використовувати у даному дослідженні.

Для того щоб мікро-ГЕС ефективно функціонувала необхідно узгодити параметри гідротурбіни з гідрологічними характеристиками річки. Таке узгодження дозволяє обґрунтувати параметри мікро-ГЕС.

Гідротурбіна ефективно функціонує за обґрунтованих потужності, напору і витрати води. Наприклад розрахункова витрата води  $q$  в створі річки, повинна знаходитись у робочому діапазоні мінімальної  $q^{\min}$  і максимальної  $q^{\max}$  витрати води турбіни, тобто  $q^{\min} \leq q \leq q^{\max}$ . Аналогічно з робочим напором  $H$ , який має бути в межах  $H^{\min} \leq H \leq H^{\max}$ . Тоді вироблена потужність мікро-ГЕС  $P \leq P^{\max}$ .

Для дериваційної схеми створення напору робочий напір  $H$  визначимо з виразу, м:

$$H = H^{\text{br}} - h_w, \quad (1)$$

де  $H^{\text{br}}$  – статичний напір бруто, м;  $h_w$  – втрати напору у дериваційному каналі, гідроелектростанції тощо, м.

Для ефективної роботи гідротурбіни необхідно постійно забезпечувати її водою. Для мінливої витрати води, необхідно щоб більшість днів у році витрата води у річці попадала в діапазон витрат гідротурбіни. В конкретний момент часу витрату води  $q$  у досліджуваному створі річки визначимо:

$$q = \bar{Q} - q_e, \quad (2)$$

де  $\bar{Q}$  – миттєве значення витрати води у досліджуваному створі річки, м<sup>3</sup>/с;

$q_e$  – витрата води, яку не можна використовувати згідно екологічних вимог, м<sup>3</sup>/с [1, 4].

Потужність  $P$  залежить від режиму роботи мікро-ГЕС, який залежить від витрати води в конкретний момент часу. Якщо витрати води  $q < q^{\min}$  тоді потужність  $P = 0$ . Якщо  $q^{\min} \leq q \leq q^{\max}$  тоді потужність мікро-ГЕС порахуємо, кВт:



$$P = g \cdot q \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_G . \quad (3)$$

Якщо  $q > q^{\max}$  тоді потужність  $P$  рівна номінальній потужності прийнятої гідротурбіни, тобто  $P = N_n$  [2].

Отримавши значення потужності можна визначити виробіток електроенергії  $W$ , кВт·год:

$$W = P \cdot t , \quad (4)$$

де  $t$  – тривалість роботи мікро-ГЕС, год.

Порахувавши річний виробіток електроенергії  $W$ , можна визначити собівартість електричної енергії  $c_e$  виробленої на мікро-ГЕС, грн/кВт·год:

$$c_e = \frac{B}{W} , \quad (5)$$

де  $B$  – частка річних відрахувань вартості мікро-ГЕС, грн/рік.

Важливим моментом є вибір та обґрунтування критерію оптимізації. У дослідженні планується, що мікро-ГЕС буде працювати на електричну мережу, оскільки виробництво електричної енергії є значним, крім цього основні параметри мікро-ГЕС можуть регулюватись електромережею, зокрема частота, напруга і струм. Зважаючи на постанову НКРЕКП «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками споживачів, у тому числі енергетичних кооперативів, встановлена потужність яких не перевищує 150 кВт», № 1960 від 30.12.2022 року, відповідно до якої держава зобов'язується закуповувати вироблену електроенергію за ціною 607,47 коп/кВт·год (без ПДВ), прибуток  $\Pi$  від реалізованої електроенергії в загальну мережу визначимо:

$$\Pi = W \cdot (c_3 - c_e), \quad (6)$$

де  $\Pi$  – річний прибуток, грн/рік;

$c_3$  – показник зеленого тарифу, грн/кВт·год;

$c_e$  – собівартість виробленої електроенергії, грн/кВт·год.

Обґрунтування параметрів мікро-ГЕС та їх кількості здійснюють на підставі перебору всіх можливих варіантів їх розміщення на досліджуваній річці. Оскільки таких варіантів може бути дуже багато, в залежності від довжини річки, розв'язання цієї задачі можливе на підставі статистичного імітаційного моделювання. Використовуючи розроблену методику обґрунтування параметрів турбіни і дериваційного каналу, нами запропоновано алгоритм дослідження



віртуальної системи «мікро-ГЕС – річка», укрупнена схема якого представлена на рис. 1.

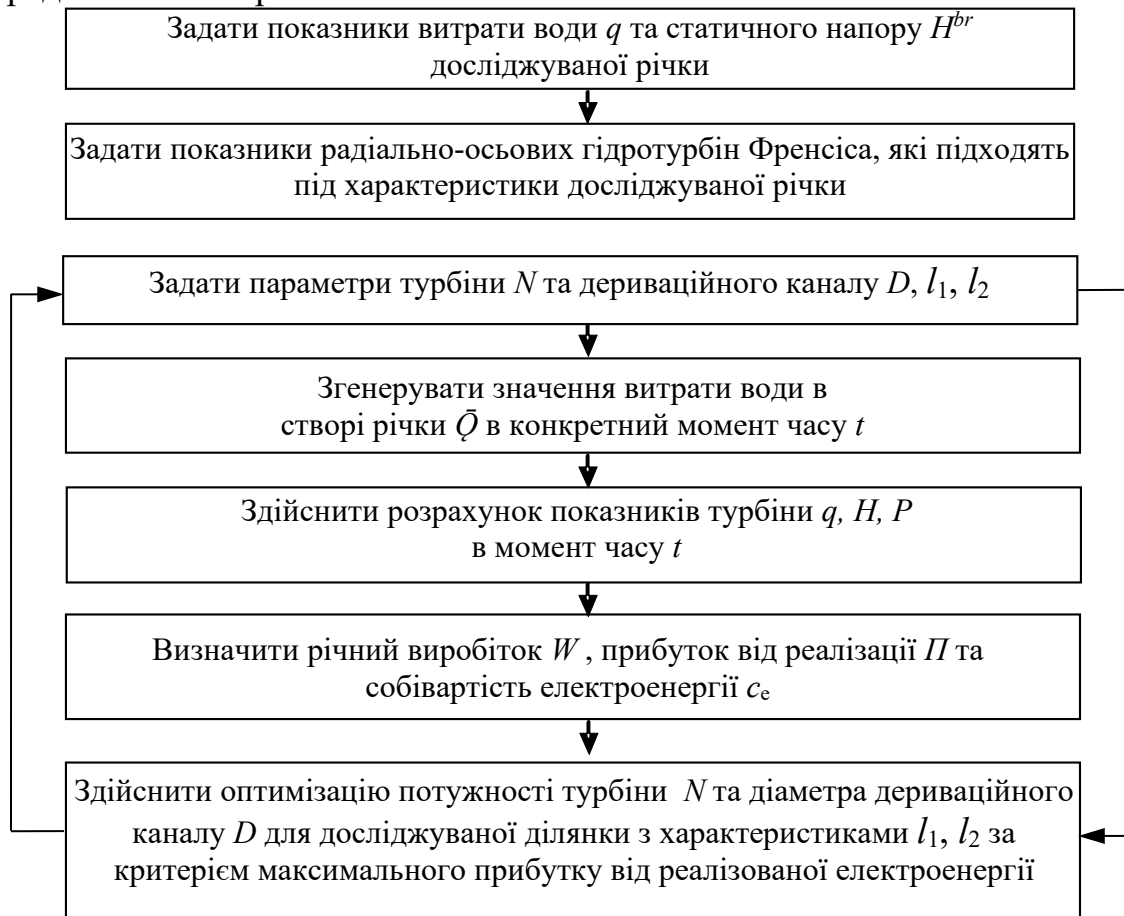


Рисунок 1. Укрупнена схема алгоритму дослідження віртуальної системи «мікро-ГЕС – річка»

Як бачимо з наведеної схеми, насамперед необхідно задати попередньо визначені показники досліджуваної річки – статичний напір  $H$  і витрату води  $q$ .

Наступним кроком є введення показників досліджуваних гідроагрегатів, а саме робочих діапазонів витрат води  $q^{\min}$  і  $q^{\max}$  та робочих напорів  $H^{\min}$  і  $H^{\max}$ , коефіцієнта корисної дії, вартості гідрообладнання тощо.

Одним з основних елементів мікро-ГЕС в умовах гірської річки є дериваційний канал, який характеризується діаметром  $D$  та довжиною – у моделі з відмітками початку  $l_1$  і кінця  $l_2$ . Тому на цьому етапі задаємо параметри деривації і максимальну потужність турбіни  $N$ .

Далі генеруємо випадкове значення витрати води  $\bar{Q}$  у створі річки в конкретний момент часу  $t$  для визначення витрати води  $q$ , робочого напору  $H$  і виробленої потужності  $P$  гідроагрегату.

Оскільки в дослідженні поставлена задача максимального освоєння гідроенергетичного потенціалу річки, та використовуючи як



критерій прибуток від реалізації виробленої електроенергії, порівнюємо отримані показники функціонування мікро-ГЕС і здійснюємо оптимізацію потужності турбіни  $N$  та діаметра дериваційного каналу  $D$  для досліджуваної ділянки з характеристиками  $l_1, l_2$ .

*Висновки.* Обґрунтовано, що для гірських регіонів необхідно використовувати гідроспороди без водосховищ, зокрема дериваційного типу. Застосування даної схеми створення напору дає змогу ефективніше використати потенціал гірської річки з мінімальним екологічним впливом та меншими капіталовкладеннями. Застосування прибутку від виробленої електроенергії в якості критерію, дозволяє відшукати оптимальний варіант для забезпечення максимального освоєння гідроенергетичного потенціалу та зменшення затрат на виробництво електроенергії. Розроблені методика та алгоритм обґрунтування гідротурбіни та дериваційного каналу є основою для статистичного імітаційного моделювання віртуальної системи «мікро-ГЕС – річка» в результаті якого можливо обґрунтувати параметри мікро-ГЕС для реальних характеристик досліджуваної річки.

#### Список використаних джерел

1. Бабич М. І. Обґрунтування стохастичної складової проектного середовища в проектах систем виробництва електроенергії на малих річках. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2015. № 19. С. 7–12.
2. Боярчук В., Бабич М., Кригуль Р., Шолудько Я. Дослідження функціональних та вартісних показників малих гідроелектростанцій. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2013. № 17. С. 281–286.
3. Васько П. Ф., Мороз А. В. Потенціал використання гідроенергетичних ресурсів основних малих річок України. *Відновлювальна енергетика*. 2016. № 3. С. 50–56.
4. Васько П. Ф., Мороз А. В., Бриль А. О, Ібрагімова М. Р. Екологічні аспекти розвитку гідроенергетики в Україні. *Відновлювальна енергетика*. 2018. № 2. С. 57–69.
5. Миронов К. А., Олексенко Ю. Ю. Обґрунтування вибору типу високонапірної гідротурбіни при її проектуванні. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків. : НТУ «ХПІ», 2016. №41(1213). С. 79–83.
6. Ghadimi A., Razavi F., Mohammadian B. Determining optimum location and capacity for micro hydropower plants in Lorestan province in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 8. P. 4125–4131. DOI:10.1016/j.rser.2011.07.003
7. Ismailov A. I., Samatov N. A., Bakhramov Sh. K., Rayimdjanov B. N., Sharipov I. F. Substantiation of parameters of hydro turbines of



microhydroelectric stations with an asynchronous generator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 12th-14th May 2021, Tashkent, Uzbekistan*. Vol. 868. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/868/1/012025>

8. Moran E., Lopez M., Moore N., Müller N., Hyndman D. Sustainable hydropower in the 21st century. *PNAS*. 2018. Vol. 115 (no. 47). P. 11891–11898. DOI: <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.1809426115>

9. Zakharov Y. Y. Method of calculation of water-diverting structures of low-head hydroelectric power plant for power supply of small power consumers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1211. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1211/1/012012>

10. Nasir B. A. Design Considerations of Micro-Hydro-Electric Power Plant. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 19–29. DOI: [10.1016/j.egypro.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.003)

Стаття надійшла до редакції 10.04.2023 р.

**M. Babych, S. Korobka**  
**Lviv National Environmental University**

#### **METHOD OF SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF HYDRO TURBINES AND THE DERIVATION CHANNEL OF MICROHYDROELECTRIC STATIONS FOR THE CONDITIONS OF THE MOUNTAIN RIVER**

##### ***Summary***

The article presents the method of researching the parameters of a micro-hydroelectric station for small mountain rivers. It is substantiated that for this region it is expedient to use hydroelectric structures of the derivation type without the use of dams and reservoirs. It was established that for mountain rivers it is advisable to use a Francis radial-axial turbine, the parameters of which must be coordinated with the hydrological characteristics of the river.

It is proposed that the hydroelectric power station works on the general electric grid, since the production of electrical energy can be significant, and the main parameters of the hydroelectric power station can be regulated by the electric grid, in particular the frequency, voltage and current. A methodology for calculating the main indicators of a hydroelectric power plant, in particular its capacity, annual production and cost of electricity, is proposed. The optimization criterion is substantiated - the profit from the produced and sold electricity to the general network at the "green" tariff.

The substantiation of the parameters of micro-hydroelectric station and their number must be carried out on the basis of a selection of all possible options for their placement on the studied river. Since these options can be hundreds, and sometimes even thousands, depending on the length of the river, it is suggested to use statistical simulation modeling to solve this problem. A research algorithm has been developed, which is the basis for statistical simulation modeling of the virtual system "micro-HES - river", as a result of which it is possible to justify the parameters of the hydroelectric power plant for the conditions of the studied river.

**Key words:** river, microhydroelectric station, derivation channel, hydro turbine, optimization.