

ТЕХНІЧНЕ Й ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТИПОРОЗМІРІВ ГІДРОТУРБІН ДЛЯ НИЗЬКОНАПІРНИХ МАЛИХ ГЕС

У роботі проведено дослідження проблем спорудження в Україні нових і експлуатації діючих мережеских низьконапірних малих ГЕС потужності до 100 кВт на базі осевих пропелерних турбін, які працюють «за водотоком» (тобто підлаштовуються під витрату води в річці) і спільно з електрогенераторами виробляють електроенергію для її збуту державі за пільговим «зеленим» тарифом. Метою дослідження є зведення до мінімуму згубного впливу на довкілля генерувальних об'єктів малої гідроенергетики за умови забезпечення високих технічних показників їх роботи. Під час вирішення поставлених у роботі завдань було використано аналітичний метод. Результатами дослідження є аналітично обґрунтовані рекомендації підприємствам та організаціям, діяльність яких прямо чи опосередковано пов'язана з малою гідроенергетикою, щодо того, які саме типорозміри гідротурбін повинні випускатися, а також яка кількість і яких саме турбін має бути встановлена на кожній конкретній низьконапірній малій гідроелектростанції. Запропонований підхід до компонування машинних майданчиків низьконапірних малих ГЕС дозволить суттєво спростити на стадії проектування вибір основного обладнання цих станцій і зведе нанівець на стадії експлуатації згубний вплив ГЕС на життєдіяльність річкової флори та фауни.

Ключові слова: мала ГЕС, екологія, гідротурбіна, розрахунок, низький напір, Україна.

Вступ

Зміна технологічних укладів, яка зараз відбувається в Україні, ставить нові завдання перед вітчизняним енергетичним сектором та промисловістю. Енергетика потребує проведення широкого спектру заходів щодо модернізації об'єктів інфраструктури паливно-енергетичного комплексу, поширення інформаційно-комунікаційних технологій, впровадження інтелектуальних мереж. Одночасно з цим має підвищуватися ефективність енерговикористання, впроваджуватися чисті безпечні технології та процеси, зростати частка використання відновлюваних джерел енергії [1]. Одним з таких джерел є гідроенергія середніх і малих річок. Ця стаття присвячується підвищенню ефективності її використання та зведенню до мінімуму негативного впливу малих ГЕС на довкілля. Зокрема, автор зосереджує свою увагу на проблемах проектування та експлуатації низьконапірних (до 5 метрів водяного стовпчика) мікроГЕС потужності до 100 кВт. З огляду економіки цей напрямок малої гідроенергетики є найменш привабливим. Однак з огляду сумарного енергетичного потенціалу він приховує величезні можливості [2, 3]. Наше завдання полягає в тому, щоб запропонувати такі пропозиції гідротурбобудівним підприємствам, проектним організаціям та підприємствам малої гідроенергетики, які б дозволили в кінцевому підсумку зробити малі ГЕС більш «дружніми» до довкілля за умови підтримування на високому рівні і навіть покращення їхніх технічних та економічних показників. Вирішення цього завдання дозволить краще зберігати розмаїття річкової флори та фауни в місцях спорудження і експлуатації малих ГЕС, прискорити темпи розвитку малої гідроенергетики й відтак сприяти реалізації глобальної стратегії сталого розвитку, переходу до низьковуглецевої економіки та конкурентоспроможному енергогенеруванню з використанням відновлюваних енергетичних ресурсів [4].

Аналіз досліджень і публікацій щодо інноваційного розвитку в низьконапірній мікрогідроенергетиці, постановка проблеми

В роботі [2] детально представлено беззаперечні техніко-економічні переваги малої гідроенергетики над іншими підгалузями безпаливної альтернативної енергетики, а також вказано конкретний (-і) ефект (-и), який (-і) забезпечує та чи інша перевага. Крім того, представлено проблеми, які виникають під час організування спорудження малих ГЕС, а також шляхи їх розв'язання. Але які саме технічні рішення потрібно приймати у кожному конкретному випадку, не наведено.

В роботі [3] детально описано особливості малої гідроенергетики у порівнянні з іншими галузями відновлюваної енергетики. Запропоновано також програму розвитку малої гідроенергетики, але вона носить перш за все організаційний, а не технічний характер.

У праці [5] автори відзначають організаційні, технічні, правові та фінансові проблеми відновлення та будівництва малих ГЕС в Україні. Однак їхні прикінцеві рекомендації є майже виключно організаційними, а не технічними: створити й удосконалити законодавчу базу, розробити податкові пільги, сформулювати умови для залучення інвестицій в малу гідроенергетику тощо.

В статті [6] висвітлено досвід ТОВ «Мінігідро» (м. Харків) з проектування гідротурбін, а також

наведено технічні характеристики гідротурбін для малих ГЕС, які виготовляє це підприємство. Зокрема, зазначається, що підприємство випускає 5 типорозмірів осьових горизонтальних пропелерних чотирилопатових трубних гідротурбін з витратами води в діапазоні $0,5 \div 8,5 \text{ м}^3/\text{с}$ – Т-32, Т-50, Т-65, Т-80, Т-90 (число в позначенні турбіни означає діаметр робочого колеса в сантиметрах). На сьогоднішній день турбіну Т-80 знято з виробництва. У роботі йдеться також про те, що в сучасних умовах мережеві (не автономні) малі ГЕС змушені працювати «за водотоком», тобто повинні підлаштовуватися під витрати води у річках, які, згідно з даними гідрологічних служб, можуть змінюватися (насамперед залежно від погодних умов) в дуже широких діапазонах. Тому на низьконапірній (до 15 м) малій ГЕС повинні бути встановлені щонайменше дві (а ще краще – 3 і більше) пропелерні гідротурбіни, але яким саме повинно бути співвідношення між діаметрами їхніх робочих коліс, автор не зазначає (у пропелерній гідротурбіні, що характеризується простотою, надійністю, швидкохідністю і високим ККД (останнє, правда, стосується лише випадку, коли витрата води турбіною дорівнює номінальній ($\pm 5\%$) для даного напору), як відомо, немає жодного регулювання витрати води). Автор також пропонує оснащувати низьконапірні мікроГЕС комплектами змінних робочих коліс з різною геометрією робочого лопаткового апарату. Це в якійсь мірі вирішує проблему регулювання витрати води, але за рахунок деякого зниження ККД турбіни (особливо тому, що напрямний лопатковий апарат (під час заміни робочого колеса на інше, що має той самий зовнішній діаметр, але решту геометричних розмірів – інші) не регулюється). Варто відзначити, що підприємство випускає також гідротурбіни Т-32, Т-50, Т-65 і Т-90 з регульованим напрямним лопатковим апаратом, але вони є значно складнішими й дорожчими від нерегульованих. Крім того, заміна робочого колеса трубної осьової гідротурбіни виробництва ТОВ «Мінігідро» є досить трудомісткою операцією, що виконується протягом щонайменше одного робочого дня.

В роботі [7] виконано порівняння екологічних наслідків роботи 27 малих ГЕС з аналогічними наслідками роботи 3 великих ГЕС у Норвегії (загальна потужність обох зазначених груп ГЕС приблизно однакова). Результати цього порівняння показують, що великі гідроелектростанції мають менший ступінь впливу на екологію, ніж багато дрібномасштабних проєктів, але недостатня точність даних і слабка методологічна основа вносять невизначеність у достовірність результатів досліджень. Якщо ж необхідна методологія буде створена, можна буде виконати більш досконалу порівняльну оцінку розвитку малих і великих гідроенергетичних потужностей, що дозволить краще узгодити цілі енергетичної й екологічної політики. Тут варто відзначити, що клімат і рельєф територій України та Норвегії суттєво відрізняються, тому подібне порівняння для наших умов може дати протилежний результат. У нашій роботі ми прагнемо зробити все можливе для того, щоб звести негативний вплив низьконапірних мікроГЕС на екологію до мінімуму. Для цього ми розробляємо методологію прийняття екологічно, технічно й економічно обґрунтованих технічних рішень як на стадіях проєктування гідротурбін для малих ГЕС, так і на стадіях проєктування відповідних енергогенерувальних об'єктів. У роботі [7] подібні дослідження не виконувалися.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є зведення до мінімуму згубного впливу на річкову флору і фауну низьконапірних мікроГЕС, які оснащені осьовими пропелерними гідротурбінами, працюють «за водотоком» (тобто підлаштовуються під витрату води в річці) і віддають всю вироблену електроенергію в мережу за пільговим «зеленим» тарифом, за умови забезпечення високої енергетичної ефективності цих енергогенерувальних об'єктів. Для реалізації мети були поставлені наступні **з а в д а н н я** :

- дати екологічну і технічну оцінку можливих варіантів оснащення низьконапірних мікроГЕС двома чи трьома осьовими пропелерними гідротурбінами однакової або різної потужності;
- аналітично вивести співвідношення діаметрів робочих коліс і швидкостей обертання валів двох геометрично подібних гідротурбін, якщо співвідношення витрат води ними (і потужностей яких) за сталого напору становить 2:1;
- запропонувати гідротурбобудівним підприємствам теоретично обґрунтовані та екологічно прийнятні закономірності для створення модельних рядів пропелерних гідротурбін для низьконапірних мікроГЕС;
- перевірити відповідність діаметрів робочих коліс пропелерних гідротурбін для малих ГЕС, які випускає ТОВ «Мінігідро» (м. Харків), закономірностям, що запропоновані у цій статті.

Основні матеріали дослідження

Вихідні дані та методи дослідження. Вихідними даними дослідження є витрата води і напір нетто на низьконапірній мікроГЕС. Для визначення знаменника геометричної прогресії, на основі якої створюється модельний ряд пропелерних геометрично подібних гідротурбін для малих ГЕС, використано аналітичні методи.

Обґрунтування вибору відносних величин генерувальних потужностей низьконапірних мікроГЕС з двома та трьома гідроагрегатами на базі осьових пропелерних турбін. На низьконапірній мікроГЕС повинно бути встановлено щонайменше 2 гідроагрегати [6]. Це пояснюється як потребою регулювання генерованої потужності, так і необхідністю мати хоча б який небудь резерв потужності на

випадок виходу з ладу одного з гідроагрегатів. Наше завдання полягає в тому, щоб визначити правильне (з огляду різних чинників) співвідношення між встановленими потужностями й іншими технічними характеристиками цих гідроагрегатів. Однак, перш ніж перейти власне до такого дослідження, визначимося з критеріями оцінки економічного й екологічного впливу. Оцінювання економічної ефективності, яке наведене у цій праці – попереднє, воно базується на власному досвіді автора, який був набутий під час проектування декількох мікроГЕС (ці електростанції вже декілька років успішно працюють). Детальне економічне обґрунтування можливих варіантів компонування машинних майданчиків мікроГЕС, враховуючи його великий обсяг, стане тематикою наших майбутніх досліджень.

Будь яка промислова діяльність людини наносить шкоду природі. Не є виключенням і ГЕС, незалежно від їх розмірів і встановленої потужності. Тому на сьогоднішній день екологічні й інші організації виступають проти спорудження нових і за закриття вже діючих ГЕС. Багато таких протестів, особливо проти малих ГЕС, мали місце і в Україні. Наше завдання – цю шкоду мінімізувати, з тим щоб вона не змогла призвести до незворотних наслідків.

У цій роботі ми розглядаємо лише один критерій екологічного впливу малої ГЕС на річку – **дискретність** («скачкоподібність») зміни витрати води у нижньому б'єфі, яка спричинена роботою цієї ГЕС. Він характеризує величину впливу ГЕС на раптову (миттєву) зміну витрати води у нижньому б'єфі, яка має періодичний характер. Дискретність описують витратними і часовими показниками. Витратні можуть вимірюватися у $\text{м}^3/\text{с}$ або у відсотках. Наприклад, на виході руслової мікроГЕС витрата води протягом 16 годин на добу становить $3 \text{ м}^3/\text{с}$, а протягом наступних 8 годин доби – $1 \text{ м}^3/\text{с}$ (після цього знову $3 \text{ м}^3/\text{с}$, потім $1 \text{ м}^3/\text{с}$ і так далі). У зазначеному випадку дискретність – $2 \text{ м}^3/\text{с}$ або 67 %, тривалість великого імпульсу – 16 годин, тривалість малого імпульсу – 8 годин, період коливання витрати води – 24 години (одна доба). Якщо витрата води у нижньому б'єфі дорівнює природній витраті води у верхньому б'єфі, то дискретність водотоку рівна нулю. Осьові гідротурбіни, що мають регульований як робочий, так і напрямний апарат, можуть працювати з нульовою дискретністю.

Малі ГЕС з пропелерними гідротурбінами, у яких робочий апарат – нерегульований, а напрямний – лише у дуже незначній кількості турбін регульований, не можуть плавно підлаштуватися під природну витрату води у річці і тому, як правило, працюють з певною дискретністю. Її причиною є перемикання гідроагрегатів (наприклад, вмикається або вимикається який небудь агрегат). Для кращого розуміння критерію «дискретність» використаємо ще одне пояснення. Нехай витрата води у нижньому б'єфі дорівнює номінальній пропускній здатності ГЕС. Приймемо її рівною 100 %. Якщо ж витрата води раптово знизилася на 30 % відносно попередньої, то дискретність становить так само 30 %. Дискретність може бути постійною або змінною. У цій роботі ми розглядаємо малі ГЕС лише з постійною дискретністю, тобто з однаковою «висотою» кожного окремого «східця» регулювання витрати води.

Зі збільшенням дискретності витрати води у нижньому б'єфі (і, відповідно, величини зміни рівня води у зазначеному б'єфі) згубний вплив ГЕС на річкову флору і фауну зростає. Тут варто навести дуже наочний приклад з вітчизняної гідроенергетики: між Дністровською ГЕС потужності 600 МВт і так званою «буферною» ГЕС потужності 40 МВт, яка знаходиться на відстані 20 км нижче від першої, з причини наявності між ними діючої Новодністровської ГАЕС рівень води у річці щодоби змінюється на 15 м або більше; з цієї причини у нижньому б'єфі зазначеної Дністровської ГЕС (і, відповідно, у верхньому б'єфі «буферної» ГЕС) взагалі відсутня будь яка флора і фауна; це абсолютно мертва ділянка довжиною 20 км річки Дністер, де неможливо зловити навіть будь яку рибу. Тому, повертаючись до зазначеного на початку цього абзацу, з метою збереження гідросфери значення дискретності витрати води на виході ГЕС повинно бути мінімально можливим. У цій праці ми зробимо все для того, щоб запропонувати проектним організаціям та іншим зацікавленим у цьому фахівцям такі варіанти компонування малих ГЕС пропелерними турбінами, які зможуть забезпечувати у процесі експлуатації мінімально можливі значення дискретності витрати води у нижньому б'єфі.

Дискретний характер зміни витрати води у нижньому б'єфі властивий практично лише для ГЕС з нерегульованими пропелерними турбінами. Інших критеріїв оцінки екологічного впливу, що є характерними для ГЕС як з пропелерними турбінами, так і з будь яким іншим типом турбін, ми не розглядали.

Розглянемо три можливі варіанти компонування машинних майданчиків низьконапірних мікроГЕС.

Перший варіант – два однакові гідроагрегати. Якщо на ГЕС наявні два гідроагрегати, то вони можуть бути однакової або різної потужності. З огляду експлуатації краще мати два однакові агрегати, тому що тоді буде потрібен лише один комплект запчастин, який буде підходити як для першої, так і для другої силової установки. З економічної точки зору це також вигідно. За однакових генерованої потужності та напору нетто ідентичні гідроагрегати також будуть витрачати однакову кількість води за одиницю часу. Завдяки такому компонуванню машинного майданчика мікроГЕС буде забезпечена можливість рівномірного дискретного двохсхідцевого регулювання витрати води станцією, яке матиме наступні характеристики: глибина регулювання – 50 %, дискретність регулювання – також 50 %. Відносні витрати води станцією можуть набувати наступних значень: 100 %, 50 %. Але з урахуванням того, що

витрата води у річці зазвичай змінюється у значно ширшому діапазоні, а мережева мікроГЕС працює «за водотоком» (тобто підлаштовується під витрату води у річці), то цей варіант вибору потужностей гідроагрегатів – не найкращий. З огляду екології це також небажано: у нижньому б'єфі витрата води буде мати яскраво виражену імпульсну характеристику: то якийсь час матиме номінальне значення, то буде у два рази меншою. Наприклад, на мікроГЕС встановлено дві гідротурбіни з пропускною здатністю $2 \text{ м}^3/\text{с}$ кожна. Нехай якогось дня витрата води у річці становить $3 \text{ м}^3/\text{с}$. Для однієї турбіни цього забагато, для двох – замало. Як тоді буде працювати мікроГЕС? На якийсь час (який залежить від площі плеса верхнього б'єфу), наприклад, на 3 години, включаться в роботу дві турбіни. Витрата води у нижньому б'єфі буде становити $4 \text{ м}^3/\text{с}$, рівень води у верхньому б'єфі почне падати. Цей режим роботи буде тривати до того часу, аж поки падіння верхнього б'єфу досягне відмітки, наприклад, 0,15 м. Після того одна з турбін вимикається, залишається працювати друга. Витрата води у нижньому б'єфі набуває у 2 рази меншого значення – $2 \text{ м}^3/\text{с}$, рівень води у верхньому б'єфі починає зростати. Цей режим роботи також буде тривати приблизно 3 години, аж поки рівень води у верхньому б'єфі не досягне максимального значення. Потім знову працюють дві турбіни, потім одна, і так цей процес буде тривати невизначений час – аж до суттєвої зміни в ту чи іншу сторону витрати води у верхньому б'єфі мікроГЕС. Яскраво виражений імпульсний характер витрати води у нижньому б'єфі мікроГЕС негативно позначається на річковій флорі та фауні й тому екологи і рибалки цього не вітають.

Другий варіант – два різні гідроагрегати (великий і малий). Значно кращим для екології варіантом компонування мікроГЕС є оснащення її двома осьовими пропелерними гідротурбінами – великою і малою – зі співвідношенням витрат води ними 2:1. Якщо ці дві турбіни – геометрично подібні і працюють під одним і тим самим напором води, то співвідношення їхніх потужностей буде становити 2:1, діаметрів їхніх робочих коліс – $\sqrt{2}:1$, швидкостей обертання їхніх валів – $1:\sqrt{2}$ (геометрично подібними називають турбіни, лінійні розміри яких – пропорційні, а кутові – ідентичні). Цей варіант компонування машинного майданчика мікроГЕС дає можливість забезпечувати рівномірне дискретне трисхідцеве регулювання витрати води станцією з наступними характеристиками: глибина регулювання – 67 %, дискретність регулювання – 33 %. Відносні витрати води станцією можуть набувати наступних значень: 100 %, 67 %, 33 %. 100 % – коли працюють обидві турбіни, 67 % – якщо працює лише велика турбіна, 33 % – коли працює лише мала турбіна. Це значно краще, ніж у першому випадку, але не завжди достатньо. В праці [6] зазначається, що на сьогоднішній день витрата води у річках може на тривалі проміжки часу падати аж до 10 % від розрахункових значень, які були прийняті під час проектування ГЕС. Тому реалії вимагають пошуку інших технічних рішень компонування машинних майданчиків мікроГЕС з пропелерними гідротурбінами.

З огляду економіки другий варіант дуже мало поступається першому. Чим він гірший? Різні гідроагрегати, й тому різні комплектуючі та запчастини. Але ці недоліки майже на 100 % нівелюються тим, що сучасні пропелерні гідротурбіни – високонадійні машини, які багато років поспіль можуть працювати без будь якого ремонту [6].

Третій варіант – три різні гідроагрегати (великий, середній і малий). Найкращим для екології варіантом компонування мікроГЕС є оснащення її трьома осьовими пропелерними гідротурбінами – великою, середньою і малою – зі співвідношенням витрат води ними 4:2:1. За аналогією до попереднього випадку, співвідношення їхніх потужностей буде становити 4:2:1, діаметрів їхніх робочих коліс – $2:\sqrt{2}:1$, швидкостей обертання їхніх валів – $1:\sqrt{2}:2$. Як і у попередньому варіанті, всі співвідношення, крім першого, є справедливими за умови, що всі три турбіни – геометрично подібні, а розрахунковий напір на мікроГЕС – однаковий для всіх зазначених турбін. Цей варіант компонування машинного майданчика мікроГЕС дає можливість забезпечувати рівномірне дискретне семисхідцеве регулювання витрати води станцією з наступними характеристиками: глибина регулювання – 86 %, дискретність регулювання – 14 %. Відносні витрати води станцією можуть набувати наступних значень: 100 %, 86 %, 71 %, 57 %, 43 %, 29 %, 14 %. 100 % – коли працюють всі три турбіни, 86 % – якщо працюють велика і середня турбіни, 71 % – коли працюють велика і мала турбіни, 57 % – якщо працює лише велика турбіна, 43 % – коли працюють середня і мала турбіни, 29 % – якщо працює лише середня турбіна, 14 % – коли працює лише мала турбіна. З огляду економіки третій варіант гірший від другого тим, що наявний ще третій, хоч і невеликий, гідроагрегат. І що всі три гідроагрегати – різні. Але мікроГЕС, яка спроектована за третім варіантом, найбільш гармонійно вписується в природу і нібито стає її невід'ємною частиною. Вона адекватно відповідає сучасним глобальним загрозам, найголовнішою з яких є зміна клімату, що спричинена діяльністю людини. Ця зміна клімату стає все помітнішою і проявляється, зокрема, в тому, що річки міліють і мають значно більші коливання витрат води на протязі року, ніж це було ще 30 – 40 років тому, не кажучи вже про доіндустріальну епоху. Величезний екологічний вигравш, без сумніву, зі сторицею компенсує відносно незначні додаткові капітальні й експлуатаційні витрати на потреби низьконапірної мікроГЕС з трьома різними пропелерними гідроагрегатами.

Вважаємо за потрібне пояснити, як на основі наявних співвідношень витрат води

геометрично подібними гідротурбінами одержано співвідношення їх потужностей, а також діаметрів і швидкостей обертання їхніх робочих коліс. Потужність турбіни прямо пропорційна напору і витраті води. Якщо напір сталий, то потужність турбіни прямо пропорційна лише витраті води. Звідси впливає ідентичність співвідношень потужностей геометрично подібних турбін і витрат води ними для одних і тих самих напорів.

Складнішим є пояснення одержання співвідношень діаметрів робочих коліс турбін. Напишемо рівняння неперервності потоку для камери робочого колеса діаметру d_1 турбіни (для спрощення розрахунків діаметр втулки робочого колеса умовно приймемо рівним нулю):

$$Q_1 = v \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{v \cdot \pi}{4} \cdot d_1^2,$$

де Q_1 – витрата води великою турбіною;

v – швидкість руху води в камері робочого колеса турбіни.

Нехай мала турбіна з діаметром робочого колеса d_2 має в два рази меншу витрату Q_2 , але таку ж саму швидкість руху води v в камері робочого колеса:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{v \cdot \pi}{4} \cdot d_2^2 = \frac{Q_1}{2} = \frac{v \cdot \pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{2}; \\ d_2^2 &= \frac{d_1^2}{2}; \\ d_2 &= \frac{d_1}{\sqrt{2}}; \\ d_1 &= \sqrt{2} \cdot d_2; \\ d_1 : d_2 &= \sqrt{2} : 1. \end{aligned}$$

Отже, в результаті цих нескладних перетворень ми одержали, що для двох геометрично подібних гідротурбін, для яких співвідношення між витратами води становить $Q_1 : Q_2 = 2 : 1$, співвідношення між діаметрами робочих коліс буде становити $d_1 : d_2 = \sqrt{2} : 1$. Звідси впливає наступне: якщо яке небудь підприємство випускає пропелерні гідротурбіни (для малих ГЕС) декількох різних типорозмірів, то співвідношення між діаметрами їхніх робочих коліс повинно становити $\sqrt{2}$. Завдяки цьому буде забезпечена можливість прийнятної (насамперед з огляду екології) комплектації практично будь якої низьконапірної мікроГЕС, що працює «за водотоком» і віддає всю вироблену енергію в мережу за пільговим «зеленим» тарифом.

За однакових напорів швидкість обертання робочих коліс геометрично подібних гідротурбін є обернено пропорційною до їхніх діаметрів. Зі зменшенням діаметру робочого колеса швидкість його обертання зростає. Якщо діаметр робочого колеса зменшити в два рази, швидкість його обертання, навпаки, зростає, причому так само у два рази. Доведемо це на такому прикладі. Нехай ми маємо дві геометрично подібні гідротурбіни – велику і малу – з діаметрами робочих коліс відповідно d_1 і d_2 , причому $d_1 : d_2 = \sqrt{2} : 1$. Турбіни працюють під однаковим напором води, тому швидкість руху води в камерах їхніх робочих коліс також є однаковою і дорівнює v . За таких умов швидкість $v_{\text{пер}1}$ руху точки, яка знаходиться на периферійному перерізі лопаті великого робочого колеса, дорівнює швидкості $v_{\text{пер}2}$ руху точки, яка знаходиться на периферійному перерізі лопаті малого робочого колеса:

$$\begin{aligned} v_{\text{пер}1} &= v_{\text{пер}2}; \\ v_{\text{пер}1} &= \omega_1 \cdot \frac{d_1}{2}; \\ v_{\text{пер}2} &= \omega_2 \cdot \frac{d_2}{2}; \\ \omega_1 \cdot \frac{d_1}{2} &= \omega_2 \cdot \frac{d_2}{2}; \\ \omega_1 \cdot d_1 &= \omega_2 \cdot d_2; \\ \omega_1 \cdot (\sqrt{2} \cdot d_2) &= \omega_2 \cdot d_2; \\ \omega_1 : \omega_2 &= 1 : \sqrt{2}. \end{aligned}$$

В наведених вище формулах ω_1 – кутова швидкість обертання великого робочого колеса (діаметру d_1); ω_2 – кутова швидкість обертання малого робочого колеса (діаметру d_2).

Виконані розрахунки дають можливість зробити наступні висновки та рекомендації. Якщо яке небудь підприємство випускає пропелерні гідротурбіни (для малих ГЕС) декількох різних типорозмірів, то співвідношення між швидкостями обертання їхніх робочих коліс для якогось певного напору повинно становити $\sqrt{2}$. Причому бажано так підбирати діаметри робочих коліс, щоб швидкість обертання хоча б щонайменше одного з них дозволяла б, в свою чергу, підібрати стандартний серійний електрогенератор з аналогічною номінальною швидкістю обертання валу. Це дало б змогу хоча б частково обійтися без мультиплікатора або редуктора між валами гідротурбіни та електрогенератора. Подібно до попереднього

випадку, якщо (для якого небудь одного сталого напору) швидкості обертання валів низки геометрично подібних пропелерних гідротурбін для малих ГЕС являють собою геометричну прогресію зі знаменником $\sqrt{2}$, то з цієї низки турбін можна вибрати дві або три різні турбіни з суміжними діаметрами робочих коліс для прийнятної (насамперед з огляду екології) комплектації практично будь якої низьконапірної мікроГЕС, що працює «за водотоком» і віддає всю вироблену енергію в мережу за пільговим «зеленим» тарифом.

Перевіримо відповідність пропелерних гідротурбін для малих ГЕС, які випускає ТОВ «Мінігідро», нашим розрахункам. Як зазначалося вище, це підприємство наразі випускає турбіни Т-32, Т-50, Т-65, Т-90 з діаметрами робочих коліс відповідно 32, 50, 65 і 90 см. Прийmemo за початок геометричної прогресії діаметр робочого колеса турбіни, що дорівнює 32 см, а за знаменник – $\sqrt{2}$. Тоді послідовність діаметрів робочих коліс гідротурбін повинна бути наступною (округлюємо діаметри з точністю до одного сантиметра): 32, 45, 64, 91 см. А тепер прийmemo за початок геометричної прогресії діаметр робочого колеса турбіни, який рівний 90 см, а за знаменник – $1/\sqrt{2}$. В цьому випадку послідовність діаметрів робочих коліс гідротурбін набуде наступного вигляду (напишемо її у зворотному напрямку): 32, 45, 64, 90 см. Отже, діаметри робочих коліс щонайменше двох типорозмірів турбін, які випускає ТОВ «Мінігідро», не відповідають запропонованій нами послідовності: замість 45 см підприємство випускає 50 см, а замість 64 см – 65 см. Особливо кричущою є перша невідповідність діаметрів ($50-45=5$ см), тому ми б порадили цьому підприємству обов'язково ввести запропоновані нами корективи в номенклатуру своєї продукції. З якою метою? Це дозволить покращити регульовальні характеристики малих ГЕС з пропелерними гідротурбінами і за рахунок цього зведе до мінімуму негативний вплив ГЕС на екологію (витрата води в річках нижче ГЕС буде максимально можливо відповідати природній, «зарегульованість» річок знизиться до мінімуму) (в цій роботі під поняттям «*регульовальна характеристика ГЕС*» ми розуміємо здатність гідравлічної електростанції підлаштовуватися під витрату води в річці (як уже зазначалося вище, вона (витрата) може змінюватися в досить широкому діапазоні): чим точніше станція підлаштовується під витрату води в річці, тим кращу регульовальну характеристику вона має).

Наукова новизна. В роботі аналітично визначено знаменник геометричної прогресії, рівний $\sqrt{2}$, для створення модельного ряду пропелерних геометрично подібних гідротурбін (ППГТ) для малих ГЕС (тобто коефіцієнт пропорційності між діаметрами робочих коліс будь яких двох суміжних за розмірами ППГТ повинен бути рівним $\sqrt{2}$). Модельний ряд ППГТ, виготовлених з дотриманням знаменника $\sqrt{2}$, дозволить найбільш ефективно компонувати машинний майданчик будь якої низьконапірної мікроГЕС двома або трьома *різними*, але суміжними за розмірами моделями турбін, і забезпечувати при цьому *найкращу регульовальну характеристику* станції, що особливо важливо тоді, коли ГЕС працює «за водотоком» і віддає всю вироблену енергію в мережу за пільговим «зеленим» тарифом, а також за умови значних коливань витрат води у річках (які (коливання) характеризуються, зокрема, падіннями витрат води до 14 % від розрахункових значень), що зазвичай все частіше, різкіше і з більшим розмахом себе проявляють в сучасних реаліях глобального потепління.

Висновки

1. Дано екологічну та технічну оцінку можливих варіантів оснащення низьконапірної мікроГЕС, яка працює «за водотоком» і віддає всю вироблену електроенергію у мережу за пільговим «зеленим» тарифом, двома чи трьома осьовими пропелерними гідротурбінами однакової або різної потужності. Встановлено, що найкращим з огляду екології, однак, можливо, найменш прийнятним з економічних міркувань, є варіант оснащення машинного майданчика мікроГЕС трьома різними пропелерними турбінами – великою, середньою і малою – зі співвідношенням витрат води ними 4:2:1. Цей варіант дає змогу забезпечувати рівномірне дискретне семисхідцеве регулювання витрати води станцією з наступними характеристиками: глибина регулювання – 86 %, дискретність регулювання – 14 %. У цьому випадку відносні витрати води станцією можуть набувати наступних значень: 100 %, 86 %, 71 %, 57 %, 43 %, 29 %, 14 %. Дещо гірший з огляду екології, але, за попередньою оцінкою, кращий з огляду економіки варіант з двома різними пропелерними турбінами – великою та малою – зі співвідношенням витрат води ними 2:1. Він дає змогу забезпечувати рівномірне дискретне трисхідцеве регулювання витрати води станцією з наступними характеристиками: глибина регулювання – 67 %, дискретність регулювання – 33 %. У цьому випадку відносні витрати води станцією можуть набувати наступних значень: 100 %, 67 %, 33 %. Більш детальне і математично обґрунтоване економічне оцінювання можливих варіантів оснащення машинної зали низьконапірної мікроГЕС основним гідроенергетичним обладнанням вимагає наявності великої кількості важкодоступних вхідних даних і є дуже об'ємним, у зв'язку з чим його неможливо представити в рамках цієї праці (воно стане темою наступного нашого дослідження).

2. Аналітично доведено, що для двох геометрично подібних гідротурбін, співвідношення витрат води якими (і потужностей яких) за сталого напору становить 2:1, співвідношення діаметрів робочих коліс рівне $\sqrt{2}:1$, а швидкостей обертання валів – $1:\sqrt{2}$.

3. Запропоновано створювати модельні ряди пропелерних геометрично подібних гідротурбін для

малих ГЕС у вигляді геометричних прогресій зі знаменником $\sqrt{2}$ (тобто коефіцієнт пропорційності діаметрів робочих коліс двох суміжних за розмірами турбін модельного ряду повинен становити $\sqrt{2}$). Це уможливить здійснення найкращого з огляду екології вибору типорозмірів турбін для будь якої низьконапірної мікроГЕС.

4. Перевірено відповідність діаметрів робочих коліс пропелерних гідротурбін для малих ГЕС, які випускає ТОВ «Мінігідро» (м. Харків), геометричній прогресії зі знаменником $\sqrt{2}$. За її результатами встановлено, що цій закономірності не відповідають діаметри двох робочих коліс. Тому задля покращення задоволення потреб споживачів і вимог природоохоронних організацій, які слідкують за роботою малих ГЕС, цьому підприємству запропоновано, зокрема, зняти з виробництва турбіну Т-50 з діаметром робочого колеса 50 см і натомість спроектувати та почати випускати турбіну Т-45, у якої діаметр робочого колеса – 45 см.

5. Перспективи подальших розвідок за цим напрямком досліджень полягають у створенні розширеної матриці діаметрів робочих коліс пропелерних гідротурбін для малих ГЕС, у економічному обґрунтуванні вибору кількості та типорозмірів таких турбін для тієї чи іншої електростанції й у визначенні оптимального варіанту компоновки машинної зали малої ГЕС на підставі економіко-екологічного обґрунтування.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Стрелкова Г.Г., Пфайфер К.Ф., Стрелков М.Т., Іщенко О.С. Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 2(52). С. 7 – 19.
2. Тарасенко М.Г., Зінь М.М., Підгайний Ю.Б. Переваги і проблеми кількісного розвитку малої гідроенергетики та шляхи їх розв'язання. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2014. Вип. 2 (85). С. 31–40.
3. Тарасенко М.Г., Зінь М.М., Підгайний Ю.Б. Шляхи прискорення темпів розвитку малої гідроенергетики в Україні. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2014. Вип. 4 (87). С. 56–61.
4. UNITED NATIONS. SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> (дата звернення: 08.01.2020).
5. Дегтяренко О.Г., Шашков С.В. Доцільність та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні. *Вісник Сумського державного університету. Серія «Економіка»*. Суми, 2010. № 1. С. 89–96.
6. Бумарсков С.А. Про досвід проектування гідротурбін для низьконапірних і високонапірних малих ГЕС. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 309–313.
7. Bakken T.H., Sundt H., Ruud A., Harby A. Development of small versus large hydropower in Norway comparison of environmental impacts. *Energy Procedia*. 2012. No. 20. P. 185–199.

M. Zin, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; ORCID 0000-0003-3301-0216
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL JUSTIFICATION OF CHOICE OF DIMENSIONS OF HYDRAULIC TURBINES FOR LOW-PRESSURE SMALL HYDRO POWER PLANTS

The **purpose** of the work is to minimize the harmful impact on the environment of low-pressure micro-hydropower plants, which are equipped with axial propeller hydro turbines and give all generated electricity to the grid at a preferential "green" tariff. **Methodology**. Analytical methods have been used in the theoretical studies described in this article. **Findings**. At small low-pressure hydropower plants up to 100 kW, 2 or 3 hydraulic units with different geometrically similar propeller turbines should be installed. We have proven this from economic, technical and environmental points of view. The proportionality factor of the impeller diameters of these turbines shall be $\sqrt{2}$. **Originality**. We have analytically determined a denominator of geometric progression equal to $\sqrt{2}$ to create a model row of propeller geometrically similar hydro turbines for small hydroelectric power plants (i.e., the proportionality factor of the impeller diameters of any two adjacent turbine sizes must be equal to $\sqrt{2}$). **Practical value**. The results of the studies can be used in practice when designing propeller hydro turbines for small hydroelectric power plants up to 100 kW, which operate at pressures up to 5 meters of water column. **Conclusions**. It is established that the best option for ecological and economic reasons is the equipping a small hydroelectric power plant up to 100 kW and a head of up to 5 m with three different propeller turbines – large, medium and small – with a 4:2:1 ratio of water consumption. This option allows for uniform discrete seven-stage regulation of water flow by the station with the following characteristics: depth of control – 86%, discretion of regulation – 14%. In this case, the relative water consumptions by the station may take the following values: 100%, 86%, 71%, 57%, 43%, 29%, 14%. Slightly worse in terms of ecology, but economically preferable option with two

different propeller turbines – large and small – with a 2:1 ratio of water consumption. It allows providing a uniform discrete three-stage regulation of water flow by the station with the following characteristics: depth of regulation – 67%, discretion of regulation – 33%. In this case, the relative water consumptions by the station can take the following values: 100%, 67%, 33%. References 7.

Key words: *small hydroelectric power station, ecology, hydro turbine, calculation, low head, Ukraine.*

References

1. S. Denysiuk, H. Strelkova, C. Pfeiffer, M. Strelkov, O. Ishchenko. “European tendencies of innovative development for energy sector and final energy consumption”, *Power engineering: economics, technique, ecology*, no. 2(52), pp. 7 – 19, 2018.
2. M. Tarasenko, M. Zin, Y. Pidhainyi. “Advantages and problems of micro-hydro power quantitative development and ways of their solution”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, issue 2 (85), pp. 31–40, 2014.
3. M. Tarasenko, M. Zin, Y. Pidhainyi. “Ways of accelerating the micro-hydro power development pace in Ukraine”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, issue 4 (87), pp. 56–61, 2014.
4. UNITED NATIONS. SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> [Accessed: Jan. 8, 2020].
5. O. Degtjarenko, S. Shashkov. “Expedience and prospects of development of midget power plants in Ukraine”, *Transactions of Sumy State University, series "Economy"*, no. 1, pp. 89–96, 2010.
6. S. Bumarskov. “Experience hydro-turbines design for low-pressure and high-pressure small hydro power”, *Transactions of National University of Water Management and Nature Resources Use (Rivne)*, issue 2 (62), pp. 309–313, 2013.
7. T.H. Bakken, H. Sundt, A. Ruud, A. Harby. “Development of small versus large hydropower in Norway comparison of environmental impacts”, *Energy Procedia*, no. 20, pp. 185–199, 2012.

Надійшла 21.11.2022

Received 21.11.2022