

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07>

УДК 621.311.21:681.5.015.23

¹**А. Ю. МЕЗЕРЯ**, кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzerv@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>

¹**С. С. ПРИДВОРОВ**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: spridv@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5164-4997>

¹*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МАЛИХ ГЕС ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто проблему підвищення комплексних показників якості роботи малих гідроелектростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування гідроагрегатами. Показано, що в умовах зростання частки децентралізованих джерел генерації та підвищених вимог до енергоефективності особливого значення набуває якість динамічних процесів, що формуються під час зміни навантаження мГЕС. Для вирішення зазначеної проблеми запропоновано підхід до оптимізації параметрів ПІД-регулятора системи автоматичного регулювання обертання гідротурбіни на основі моделювання її динаміки у вигляді об'єкта другого порядку з типовими часами гідравлічних та електромеханічних ланок. Як об'єкт дослідження використано модель гідротурбіни Френсіса малої потужності з номінальними параметрами: нетто-напір 74 м, витрата 2,05 м³/с та номінальна потужність близько 1,28 МВт. Наведено напірні, енергетичні та потужнісні характеристики турбіни, отримані в узагальненому вигляді. Проведено імітаційні дослідження реакції гідротурбіни на стрибкові зміни навантаження для двох варіантів налаштування ПІД-регулятора – неоптимального та оптимального. Виконано кількісну оцінку якості перехідних процесів за інтегральними критеріями якості за похибкою та часом, а також за показниками енергетичної ефективності, включаючи відносні втрати виробленої енергії у перехідному режимі. Показано, що оптимальне налаштування ПІД-регулятора дозволяє істотно зменшити амплітуду та тривалість коливань, прискорити усталення режиму та скоротити втрати енергії з 12,9 % до 2,1 %. Запропоновано комплексний показник якості, що узагальнює динамічні та енергетичні критерії й може бути використаний як універсальна метрика для порівняння різних законів регулювання. Отриманий результат підтверджує доцільність оптимізації систем керування як одного з найефективніших шляхів підвищення продуктивності та надійності малих ГЕС.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, гідротурбіни, енергозбереження, системи керування, оптимізація

Як цитувати: Мезеря А. Ю., Придворов С. С. Підвищення показників якості малих ГЕС шляхом оптимізації систем керування. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 70-80. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07>



Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Мала гідроенергетика розглядається як один з ключових напрямів розвитку відновлюваної енергетики в Європі та Україні, забезпечуючи децентралізоване електропостачання, підтримку енергетичної безпеки та зменшення викидів CO₂ [4-8, 14]. Для мГЕС особливо актуальними є:

- стабілізація частоти й напруги в умовах змінного навантаження;
- максимізація ККД гідроагрегату в широкому діапазоні режимів;
- мінімізація механічних навантажень та кавітаційних явищ у гідротурбінах;
- забезпечення надійної роботи в автономних та ізольованих мережах [2, 3, 5].

Якість цих властивостей безпосередньо визначається характеристиками системи керування гідротурбіною та системою автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) (САРЧ, сервоприводами напругного апарата, системою збудження тощо) [2, 12-15]. Відсутність оптимізації параметрів ПД-регуляторів призводить до тривалих перехідних процесів, перевищення допустимих відхилень частоти та втрат енергії, що критично для малих потужностей. Отже, виникає науково-практичне завдання розроблення підходів до оцінювання і підвищення комплексних показників якості мГЕС шляхом оптимізації систем керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика підвищення ефективності та якості роботи малих гідроелектростанцій активно розглядається як у міжнародних, так і в українських науково-технічних джерелах. У фундаментальних роботах, присвячених гідродинамічному проектуванню та підбору гідротурбін для малих ГЕС, детально розглянуто питання формування напірних, енергетичних та потужнісних характеристик турбін та пропелерних агрегатів, а також наведено практичні рекомендації щодо вибору їх геометричних параметрів і режимів роботи [1, 3, 5]. Ці праці формують теоретичну основу для побудови математичних моделей гідроагрегатів, які застосовуються надалі для аналізу динаміки й синтезу систем керування.

У дослідженнях, присвячених розвитку малої гідроенергетики, значну увагу приділено техніко-економічним аспектам впровадження мГЕС, аналізу їх потенціалу в енергетичних системах та оцінці бар'єрів, пов'язаних із мережевими приєднаннями, нормативною базою й інвестиційною привабливістю [4, 6-8]. У цих роботах підкреслюється, що для підвищення конкурентоспроможності малих ГЕС необхідно не лише оптимізувати гідротехнічні споруди та гідромеханічне обладнання, а й забезпечити високий рівень автоматизації та якості регулювання режимів роботи.

Україномовні джерела з гідравлічних машин і гідроелектричних станцій містять систематизований виклад теорії гідротурбін, методики їх розрахунку, побудову регулювальних та експлуатаційних характеристик, а також питання взаємодії турбіни з електричною частиною станції [9-11]. Окремі публікації присвячені саме гідроагрегатам малої потужності, особливостям їх проектування для конкретних гідрологічних умов та варіантам компоновки обладнання [9, 10]. Ці роботи створюють базу для вибору реалістичних номінальних параметрів гідротурбіни, які використовуються в математичному моделюванні.

Питання побудови динамічних моделей гідротурбіни та систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) для аналізу перехідних процесів у електроенергетичних системах висвітлено у сучасних міжнародних публікаціях [12, 13]. У них запропоновано типові передатні функції гідротурбіни й системи регулювання обертів, розглянуто вплив гідравлічних запізнь, сервоприводів, еластичності водопроводів та нелінійностей виконавчих механізмів. Ці моделі слугують основою для досліджень стабільності та якості регулювання частоти, зокрема в умовах змінного навантаження та роботи в ізольованих або слабких мережах.

Окремий напрям становлять роботи, присвячені порівнянню різних структур і алгоритмів роботи систем керування для малих ГЕС, у тому числі з використанням ПД-регуляторів, адаптивних та оптимізаційних методів налаштування [14]. У таких дослідженнях аналізується вплив параметрів регуляторів на перехідні процеси потужності та частоти, а показники якості оцінюються з використанням інтегральних критеріїв (ISE, IAE, ITAE) і показників енергоефективності. У більш нових роботах робиться акцент на змінношвидкісному керуванні, максимізації ККД гідроагрегату в широкому діапазоні напорів та навантажень, а також на використанні сучасних обчислювальних методів оптимізації [15].

Разом з тим, попри значний прогрес у моделюванні гідротурбін та розробленні сучасних систем, у більшості публікацій

дослідження або зосереджені переважно на енергетичних показниках (ККД, виробіток, втрати), або на динамічних характеристиках (час установлення, перерегулювання, стійкість), тоді як комплексна інтегральна оцінка, що одночасно враховує і якість перехідних процесів, і енергетичні наслідки неідеального регулювання, розглядається недостатньо повно. Це стосується особливо малих ГЕС, які працюють у специфічних умовах децентралізованих мереж і для яких кожен відсоток втрат енергії та погіршення якості електропостачання має суттєве значення. Таким чином, окреслюється наукова ніша, пов'язана з розробленням комплексних показників якості та застосуванням їх для оптимізації параметрів ПД-регуляторів у системах керування гідротурбінами малих ГЕС на основі динамічного моделювання.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи – підвищити комплексні показники якості роботи малих ГЕС шляхом оптимізації параметрів ПД-регулятора гідротурбіни на основі динамічного моделювання.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

- обрати реальний прототип гідротурбіни малої ГЕС та узагальнити її основні параметри й статичні характеристики;
- розробити спрощену динамічну модель «гідротурбіна – САРЧ» у вигляді

передатної функції другого порядку з ПД-регулятором;

- записати аналітичні вирази показників якості (ISE, IAE, ITAE) та комплексного показника якості;
- виконати імітаційні дослідження для двох наборів параметрів ПД-регулятора (неоптимальний та оптимальний), побудувати перехідні та енергетичні характеристики;
- оцінити вплив оптимізації системи керування на комплексний показник якості гідроагрегату мГЕС.

Виклад основного матеріалу

1. Об'єкт дослідження та статичні характеристики гідротурбіни

Як прототип прийнято гідротурбіну Френсіса малої ГЕС з нетто-напором $H_{\text{ном}}=74$ м, розрахунковою витратою $Q_{\text{ном}}=2,05$ м³/с та ККД в номінальному режимі $\eta_{\text{ном}}\approx 0,86$. За цими даними номінальна механічна потужність турбіни становить [1]:

$$P_{\text{ном}} = \rho g Q_{\text{ном}} H_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} = 1,28 \text{ МВт}, \quad (1)$$

де $\rho=1000$ кг/м³ – густина води, $g=9,81$ м/с².

У діапазоні витрат Q у відносних координатах $q=Q/Q_{\text{ном}}$, статичні характеристики турбіни апроксимовано аналітичними залежностями:

- напірна характеристика:

$$H(q) = H_{\text{ном}} \left[1 - a_h (q - 1)^2 \right]; \quad (2)$$

- енергетична характеристика (ККД):

$$\eta(q) = \eta_{\text{max}} \exp \left[-b_\eta (q - 1)^2 \right]; \quad (3)$$

- потужнісна характеристика:

$$P(q) = \rho g Q H(q) \eta(q). \quad (4)$$

За результатами розрахунку побудовано основні характеристики гідротурбіни, які показані на рис. 1-3).

Максимальна потужність досягається в околиці робочої точки з витратою $Q_{\text{ном}}$, а ККД різко зменшується при роботі в надлишковому чи недостатньому напорі.

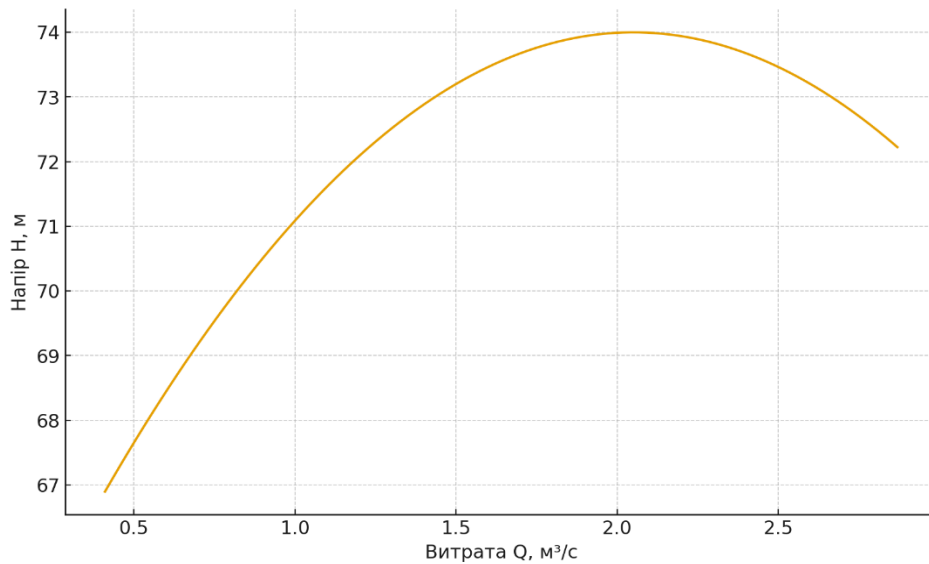


Рис. 1 – Натірна характеристика гідротурбіни
Fig. 2 – Pressure characteristic of a hydroturbine

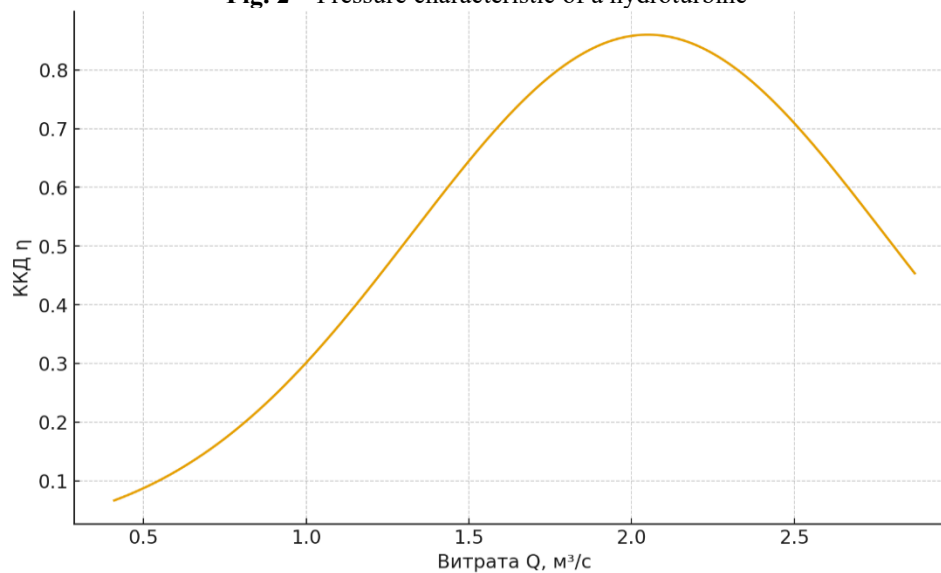


Рис. 2 – Енергетична характеристика гідротурбіни
Fig. 2 – Energy characteristics of a hydroturbine

2. Динамічна модель гідротурбіни та ПІД-регулятора

Для аналізу якості перехідних процесів використано узагальнену модель ланцюга «гідротурбіна – виконавчий механізм» як об'єкта другого порядку [2,12,13]:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; \quad (5)$$

де $Y(s)$ – нормована зміна активної потужності турбіни; $U(s)$ – нормований керуючий сигнал (відкриття напрямного апарата); K – статичний коефіцієнт передачі, T_1 , T_2 – постійні часу гідротурбіни та сервопривода.

У моделюванні прийнято: $K=1$, $T_1=2$ с, $T_2=10$ с. У часовій області модель можна записати як:

$$T_1 T_2 \ddot{y}(t) + (T_1 + T_2) \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t), \quad (6)$$

де $y(t)$ – нормована потужність, $u(t)$ – керуючий сигнал.

Система керування реалізує ПІД-закон:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

де $e(t)=r-y(t)$ – відхилення від завдання r (нормоване значення потужності).

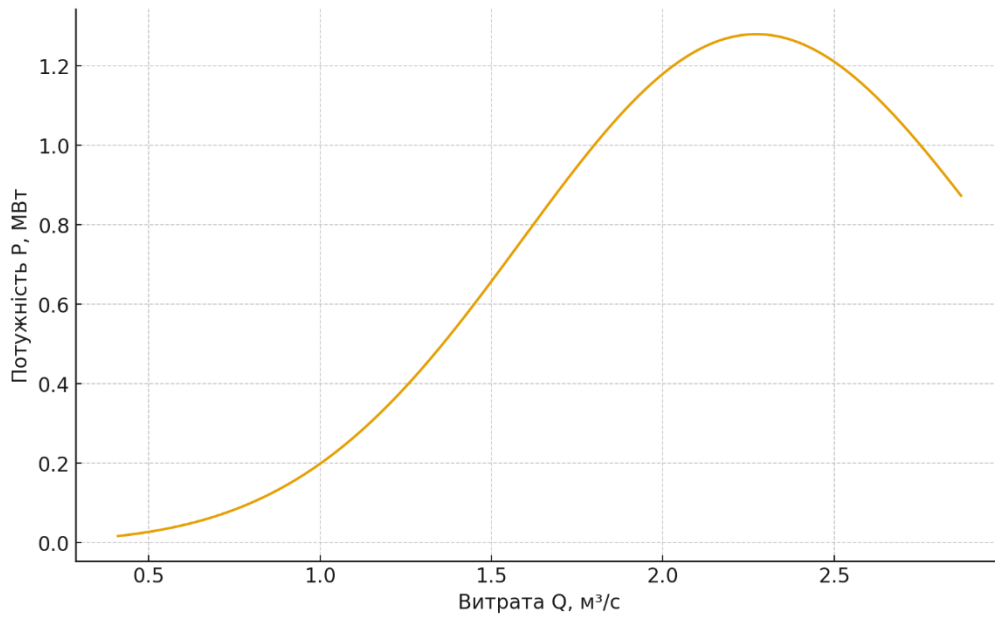


Рис. 3 – Потужнісна характеристика гідротурбіни
Fig. 3 – Characteristics of the transient process at different regulator settings

3. Показники якості та комплексний показник

Для кількісної оцінки застосовано стандартні інтегральні критерії якості:

1. Інтеграл квадрата похибки (ISE):

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt, \quad (8)$$

2. Інтеграл абсолютної похибки (IAE):

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt, \quad (9)$$

3. Інтеграл абсолютної похибки, зважений за часом (ITAE):

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (10)$$

Енергетичні характеристики оцінювались за інтегралом виробленої енергії:

$$E = \int_0^T P(t) dt = P_{\text{ном}} \int_0^T y(t) dt. \quad (11)$$

Ідеальний перехідний процес відповідає миттєвому досягненню $y(t)=1$.

Відносні втрати енергії в перехідному режимі:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{ідеал}} - E}{E_{\text{ідеал}}}. \quad (12)$$

Для інтегральної оцінки запропоновано комплексний показник якості:

$$KQ = \sum_{i=1}^4 w_i p_i, \quad (13)$$

де w_i – вагові коефіцієнти ($\sum w_i=1$); p_1, p_2, p_3, p_4 – нормовані (в інтервалі $[0;1]$) значення критеріїв ISE, IAE, ITAE та ΔE відповідно. Нормування виконувалося за лінійним правилом:

$$p_i = \frac{I_i^{\max} - I_i}{I_i^{\max} - I_i^{\min}}, \quad (14)$$

де $I_i^{\max}, I_i^{\min}$ – найкраще і найгірше значення відповідного критерію серед порівнюваних варіантів. Для попереднього аналізу можна прийняти $w_1=w_2=w_3=w_4=0,25$.

4. Результати моделювання

Розглянуто одиничний стрибок завдання потужності з 0 до 1 (перехід з холостого ходу на номінальний режим). Порівнювалися два набори параметрів ПІД-регулятора:

- неоптимальний варіант: $K_p=4,0$; $K_i=0,1$; $K_d=0$;
- оптимізований варіант: $K_p=3,0$; $K_i=0,8$; $K_d=1,5$.

Перехідні процеси нормованої потужності наведено на рис. 4.

Неоптимальне налаштування забезпечує відносно мале перерегулювання, але супроводжується тривалим наближенням до сталого значення та значною сталою похибкою. Оптимізоване налаштування дає

дещо більший перший максимум, проте значно скорочує час встановлення та забезпечує швидку ліквідацію похибки.

Розраховані значення інтегральних критеріїв (для періоду $T=60$ с), наведені в таблиці 1.

Хоча значення ISE для оптимізованого регулятора дещо більше (через виразніший перший пік помилки), критерії ІАЕ та, особливо, ІТАЕ істотно поліпшуються (ІТАЕ зменшується приблизно у 2,6 рази), що відповідає більш швидкому затуханню відхилення.

Енергетичні характеристики (накопичена енергія за час перехідного процесу) показані на рис. 5.

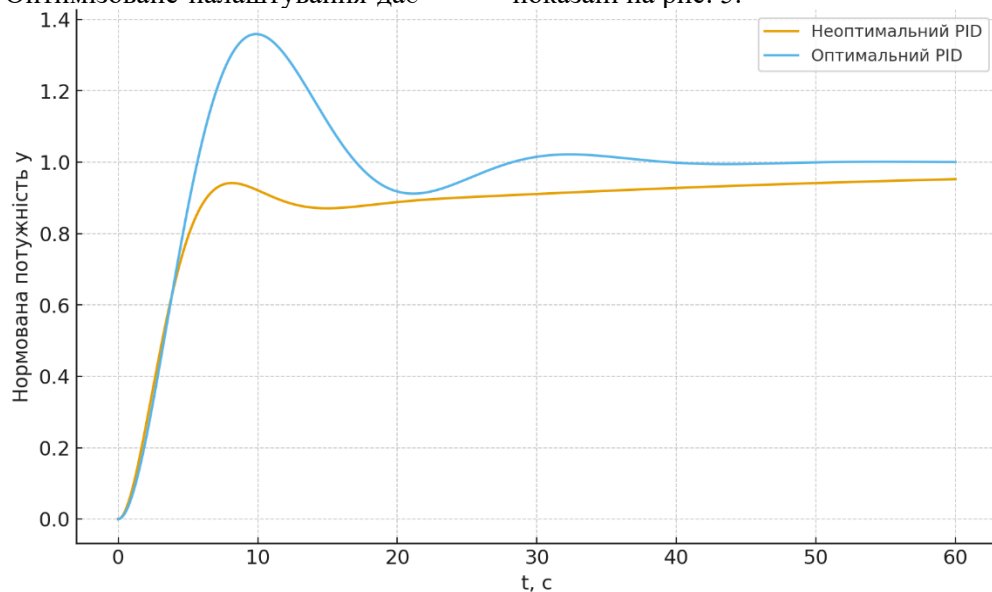


Рис. 4 – Характеристика перехідного процесу за різними налаштуваннями регулятора
Fig. 4 – Characteristics of the transient process at different regulator settings

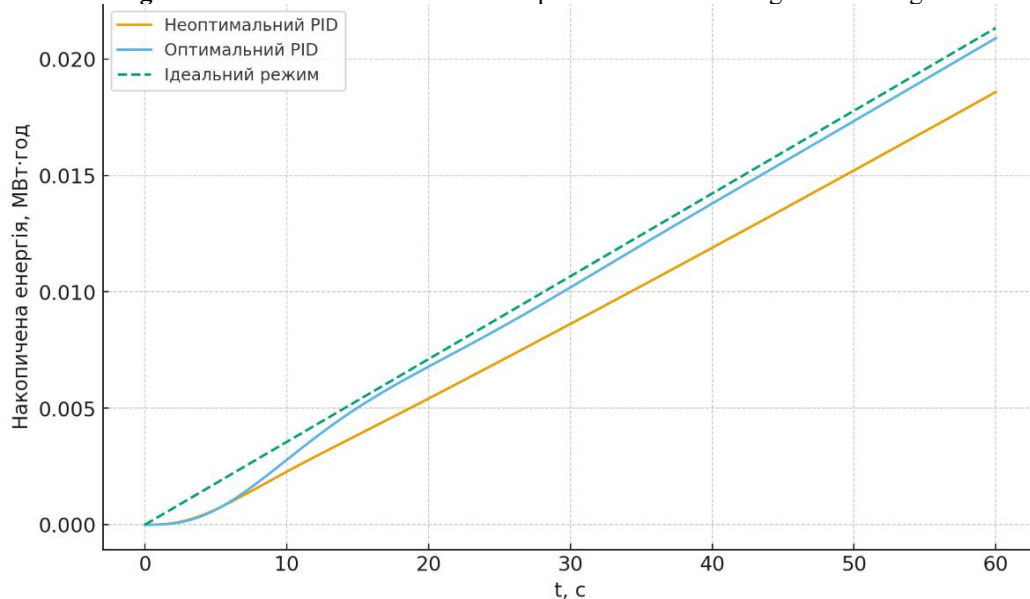


Рис. 5 – Енергетичні характеристики за різними налаштуваннями регулятора
Fig. 5 – Energy characteristics for different regulator settings

Для досліджуваного стрибка навантаження:

- ідеальний режим: $E_{\text{ідеал}} \approx 0,0213$ МВт·год;
- неоптимальний ПД: $E_{\text{non}} \approx 0,0186$ МВт·год; $\Delta E_{\text{non}} \approx 12,9\%$;
- оптимальний ПД: $E_{\text{opt}} \approx 0,0209$ МВт·год; $\Delta E_{\text{opt}} \approx 2,1\%$.

Таким чином, навіть для одного перехідного процесу економія енергії за рахунок оптимізації ПД-регулятора

становить близько 10,8 % від теоретично можливого виробітку в цьому режимі.

За сформованим комплексним показником якості при рівних вагових коефіцієнтах отримаємо:

$$\begin{aligned} KQ_{\text{non}} &= 0,25; \\ KQ_{\text{opt}} &= 0,75. \end{aligned} \quad (15)$$

Це підтверджує суттєву перевагу оптимізованого алгоритму керування з урахуванням сукупності динамічних і енергетичних критеріїв.

Таблиця 1

Інтегральні показники якості за різними настройками регулятора

Table 1

Integral quality indicators for different regulator settings

Критерій/ Criterion	Неоптимальний ПД/ Suboptimal PID	Оптимальний ПД/ Optimal PID
ISE	2,7392	3,1545
IAE	7,74	6,50
ITAE	137,50	52,67
E	0,0186 МВт·год	0,0209 МВт·год
Комплексний показник KQ / Comprehensive KQ indicator	0,25	0,75

Обговорення результатів

Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями, які підкреслюють критичну роль САРЧ у забезпеченні стабільної роботи малих ГЕС в ізольованих мережах [13, 14]. Показано, що проста оптимізація параметрів ПД-регулятора (без зміни структури системи керування) вже дає істотне зменшення інтегральних показників якості та втрат енергії.

Запропонований комплексний показник якості зручний тим, що дозволяє в одному безрозмірному числі врахувати різні аспекти роботи мГЕС – швидкодію, точність, «вартість» помилки з точки зору енергетичних втрат. У подальших роботах до нього доцільно включити додаткові

складові, пов'язані з обмеженням швидкостей зміни потужності, ресурсом механічних вузлів, умовами кавітації тощо [1, 5, 9].

Слід зазначити, що використана модель гідротурбіни є спрощеною і не враховує, зокрема, коливань у водопроводі, нелінійної залежності моменту від швидкості та гідродинамічних обмежень. У реальних мГЕС для уточнення параметрів T_1 , T_2 , K доцільне експериментальне ідентифікування за результатами випробувань, а оптимізація ПД-регулятора може виконуватись із застосуванням сучасних методів (генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок тощо) [12, 15].

Висновки

1. Показана необхідність підвищення комплексних показників якості роботи малої гідроенергетики та систем керування гідротурбінами. 2. Для реальної гідро турбіни побудовано напірні, енергетичні та потужнісні характеристики. Розроблено спрощену динамічну модель ланцюга «гидротурбіна – САРЧ» у вигляді об'єкта другого порядку з ПІД-регулятором, записано аналітичні вирази критеріїв ISE, IAE, ITAE та комплексного показника якості. 3. Імітаційні дослідження показали, що оптимізація параметрів ПІД-регулятора дозволяє змен-

шити інтегральний критерій ITAE приблизно у 2,6 рази та знизити відносні втрати енергії в перехідному процесі з 12,9 % до 2,1 %. 4. Запропонований комплексний показник якості підвищується з 0,25 до 0,75 при переході від неоптимального до оптимального алгоритму керування, що кількісно підтверджує ефективність оптимізації. 5. Результати можуть бути використані при модернізації систем керування існуючих малих ГЕС, а також при проектуванні нових об'єктів із підвищеними вимогами до енергоефективності та стабільності режимів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Ciontu M. Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni / M. Ciontu, D. Popescu, M. Motocu // Published in International Conference on... 11 November 2010. – Engineering, Environmental Science. – 2010. DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409
2. Standards / manuals / guidelines for small hydro development. Part 3-1: Selection of turbine and governing system. – New Delhi : Alternate Hydro Energy Centre, 2010. – 62 p. – Access mode : <https://www.iahhydro.org/media/4992a422/3-1-Selection-of-turbine-and-governing-system.pdf> (Last accessed November 7, 2025)
3. Small-Hydro Manual. – Tokyo : JICA, 2005. – 320 p. – Access mode : https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11810165_04.pdf (Last accessed November 7, 2025)
4. Guide on how to develop a small hydropower plant / Energy Community Secretariat. –Vienna, 2022. – 140 p. – Access mode : <https://energycommunityplatform.eu/wp-content/uploads/2022/06/Merged-Guide-Develop-a-Small-Hydropower-Plant.pdf> (Last accessed November 7, 2025)
5. Small hydropower technologies – European state-of-the-art handbook. HYPOSO Project. – Stuttgart, 2021. – 180 p. – Access mode : https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/hyposo-handbook-final.pdf (Last accessed November 7, 2025)
6. Мала гідроенергетика України. Т. 2: Технологічні аспекти розвитку / за ред. В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. – Київ : Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, 2013. – 272 с. – Режим доступу : <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf> (дата звернення 07.11.2025)
7. Васько П. Ф. Енергетична ефективність гідроагрегатів у складі малої гідроелектростанції за регулювання її потужності по водотоку [Електронний ресурс] / П. Ф. Васько, М. Р. Ібрагімова // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 4. – С. 44-49. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2015_4_10 (дата звернення 07.11.2025)
8. Клюха О. О. Сучасний стан та проблеми розвитку малої гідроенергетики України / О. О. Клюха // Вісник НУВГП. Серія «Енергетика». 2013. – Вип. 2(62). – С. 151-156. <https://ep3.nuwm.edu.ua/1663/1/Vt6215.pdf> (дата звернення 07.11.2025)
9. Зінь М. М. Розрахунок і проектування гідроагрегатів з гідротурбінами малої потужності / М. М. Зінь // Матеріали МНТК «Проблеми гідроенергетики». –

- Тернопіль, 2018. – С. 252–253. – Режим доступу : https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/25415/2/MNTK_2018_2018_Zin_M-Calculation_and_designing_of_252-253.pdf (дата звернення 07.11.2025)
10. Бриль А. О. Технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок України з урахуванням природоохоронних обмежень [Електронний ресурс] / А. О. Бриль, П. Ф. Васько, А. В. Мороз // Гідроенергетика України. – 2019. – № 3-4. – С. 47-51. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gidenu_2019_3-4_13 (дата звернення 07.11.2025)
 11. Дранковський В. Є. Гідравлічні електричні станції : навч. посіб. / В. Є. Дранковський, Ю. М. Кухтенков. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 260 с. – Режим доступу : <https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/da5fa85c-6de7-4d6d-b264-b50dca2b9b19/download> (дата звернення 07.11.2025)
 12. Prasad D. Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of small hydropower plants / Prasad D., Kumar R. // Int. J. Computer Applications. – 2012. – Vol. 1. – P. 1-7. – Access mode : <https://scispace.com/pdf/modeling-of-hydraulic-turbine-and-governor-for-dynamic-33hrbe9aj3.pdf> (Last accessed November 7, 2025)
 13. Okonkwo G. N. Control of a small hydropower system for power supply in a remote community / Okonkwo G. N. // Global Scientific Journal. – 2023. – Vol. 11, no. 5. – P. 165-176. – Access mode : https://www.globalscientificjournal.com/researchpaper/CONTROL_OF_A_SMALL_HYDROPOWER_SYSTEM_FOR_POWER_SUPPLY_IN_A_REMOTE_COMMUNITY.pdf (Last accessed November 7, 2025)
 14. Ngoma D. H. Comparative control governor systems for power and frequency optimization in off-grid small hydropower plants / Ngoma D. H. // Energy Systems. – 2025. – Access mode : <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00066-8> (Last accessed November 7, 2025)
 15. Zhu Z. Optimal guide vane opening-based variable-speed control for small hydropower units: enhancing efficiency under wide head fluctuations / Zhu Z. // Energy. – 2025. – Vol. 290, Article 130356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139111> (Last accessed November 7, 2025)

Отримано: 10.09.2025 Прийнято: 07.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

¹**A. MEZERYA**, Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the Department of Automation, Metrology, and Energy-Efficient Technologies

e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>

¹**S. PRIDVOROV**,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies

e-mail: spriidv@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5164-4997>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.*

IMPROVING THE PERFORMANCE INDICATORS OF SMALL HYDROPOWER PLANTS THROUGH OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEMS

The article addresses the problem of improving the comprehensive quality indicators of small hydropower plants by optimizing the automatic control systems of hydroelectric generating units. It is shown that, under conditions of increasing penetration of decentralized energy sources and heightened requirements for energy efficiency, the quality of dynamic processes occurring during load changes in small HPPs becomes particularly important. To solve this problem, an approach is proposed for optimizing the parameters of a PID controller within the automatic speed regulation system of a hydroturbine, based on modeling its dynamics as a second-order system with typical hydraulic and electromechanical time constants. A model of a small-capacity Francis turbine with nominal parameters – net head of 74 m, discharge of 2.05 m³/s, and nominal output of approximately 1.28 MW – is used as the research object. Generalized head, efficiency, and power characteristics of the turbine are presented. Simulation studies of the turbine's response to step load changes were carried out

for two configurations of the PID controller: non-optimal and optimized. A quantitative assessment of transient quality was performed using integral error- and time-based criteria, as well as energy efficiency indicators, including the relative loss of generated energy during the transient mode. It is demonstrated that optimal PID tuning significantly reduces the amplitude and duration of oscillations, accelerates the establishment of steady-state conditions, and decreases energy losses from 12.9% to 2.1%. A comprehensive quality index is proposed, integrating dynamic and energy criteria, which can be used as a universal metric for comparing different control strategies. The obtained results confirm the feasibility of optimizing control systems as one of the most effective ways to enhance the performance and reliability of small hydropower plants.

Keywords: quality indicators, hydroturbines, energy saving, control systems, optimization

In cites: Mezerya A., Pridvorov S. (2025), Improving the performance indicators of small hydropower plants through optimization of control systems. *Engineering*, (36), 70-80. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Reference:

1. Ciontu, M, Popescu, D. & Motocu, M 2010, 'Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni', *Published in International Conference on... 11 November 2010. Engineering, Environmental Science*. DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409
2. Alternate Hydro Energy Centre, 2010, *Standards / manuals / guidelines for small hydro development. Part 3-1: Selection of turbine and governing system*, viewed <<https://www.ieahydro.org/media/4992a422/3-1-Selection-of-turbine-and-governing-system.pdf>> (Last accessed November 7, 2025)
3. Small-Hydro Manual, 2005, viewed <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11810165_04.pdf> (Last accessed November 7, 2025)
4. Energy Community Secretariat 2022, *Guide on how to develop a small hydropower plant*, viewed <<https://energycommunityplatform.eu/wp-content/uploads/2022/06/Merged-Guide-Develop-a-Small-Hydropower-Plant.pdf>> (Last accessed November 7, 2025)
5. Small hydropower technologies – European state-of-the-art handbook. HYPOSO Project. Stuttgart, 2021, viewed <https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/hyposo-handbook-final.pdf> (Last accessed November 7, 2025)
6. Skorohoda, VV & Solonina, YuM (ed) 2013, *Mala gidroenergetika Ukraini. Tom II. Tehnologichni aspekti rozvitku* [Small Hydropower of Ukraine. Volume II. Technological Aspects of Development], In-t vidnovlyuvanoi energetiki NAN Ukraini, Kyiv. (in Ukraine)
7. Vasko, PF & Ibragimova, MR 2015, 'Energetichna efektyvnist gidroagregativ u skladi maloyi gidroelektrostanciyi za reguluvannya yiyi potuzhnosti po vodotoku' [Energy efficiency of hydraulic units in a small hydroelectric power plant for regulating its power along the watercourse.], *Vidnovlyuvana energetika*, no 4, Pp. 44-49. (in Ukraine)
8. Klyuha, OO 2013, 'Suchasnij stan ta problemi rozvitku maloyi gidroenergetiki Ukraini' [Current status and problems of development of small hydropower in Ukraine], *Visnik NUVGP. Seriya «Energetika»*, iss. 2(62), Pp. 151-156. (in Ukraine)
9. Zin, MM 2018, 'Rozrahunok i proektuvannya gidroagregativ z gidroturbinami maloyi potuzhnosti' [Calculation and design of hydraulic units with low-power hydraulic turbines], *Materiali MNTK «Problemi gidroenergetiki»*, Ternopil, Pp. 252–253. (in Ukraine)
10. Bril, AO, Vasko, PF & Moroz, AV 2019, 'Tehnichnij potencial gidroenergetichnih resursiv malih richok Ukraini z urahuvannyam prirodoohoronnih obmezhen' [Technical potential of hydropower resources of small rivers of Ukraine taking into account environmental restrictions], *Gidroenergetika Ukraini*, no 3-4, Pp. 47-51. (in Ukraine)

11. Drankovskij, VYe & Kuhtenkov, YuM 2023, *Gidravlichni elektrichni stanciyi* [Hydraulic power plants], NTU «HPI», Kharkiv. (in Ukraine)
12. Prasad, D & Kumar, R 2012, 'Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of small hydropower plants', *Int. J. Computer Applications*, Vol. 1, P. 1-7.
13. Okonkwo, GN 2023, 'Control of a small hydropower system for power supply in a remote community', *Global Scientific Journal*, Vol. 11, no. 5, P. 165-176.
14. Ngoma, DH 2025, 'Comparative control governor systems for power and frequency optimization in off-grid small hydropower plants', *Energy Systems*, viewed <<https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00066-8>> (Last accessed November 7, 2025)
15. Zhu, Z 2025, 'Optimal guide vane opening-based variable-speed control for small hydropower units: enhancing efficiency under wide head fluctuations', *Energy*, Vol. 290, Article 130356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139111> (Last accessed November 7, 2025)

Submission received: 09/10/2025 Accepted: 11/07/2025 Published: 12/30/2025