

*М. В. ЧЕРКАШЕНКО, О. І. ГАСЮК***ЦИФРОВА ТЕХНОЛОГІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ РОТОРА ГІДРОТУРБИНИ**

Розглядаються сучасні підходи до цифрового регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни, що є одним із ключових показників ефективності роботи гідроелектростанцій. Підтримання стабільної частоти обертання дозволяє забезпечити якість вироблюваної електроенергії, зменшити механічні навантаження на вузли турбіни та підвищити надійність роботи енергосистеми. Традиційні аналогові методи керування обмежені у швидкодії та точності, особливо при різких змінах навантаження або коливаннях напору води. Цифрові технології дозволяють реалізувати замкнуті контури керування, що забезпечують безперервний моніторинг стану ротора та адаптивну компенсацію зовнішніх впливів. У роботі проаналізовано сучасні алгоритми цифрового регулювання, зокрема ПІД-регулятори, нечіткі системи керування (fuzzy logic) та адаптивні методи контролю. Розглянуто математичні моделі динаміки ротора, що враховують моменти турбіни, крутний момент навантаження, інерційність та гідравлічні нелінійності. Проведено моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink для оцінки ефективності регуляторів при змінних навантаженнях. Показано, що використання цифрових алгоритмів дозволяє знизити перерегулювання, скоротити час стабілізації та підвищити адаптивність системи до змін зовнішніх умов. Особливу увагу приділено інтеграції сенсорних модулів у систему керування, що забезпечує безперервний контроль кутової швидкості, положення напрямних апаратів та інших критичних параметрів. Використання сучасних датчиків дозволяє автоматично коригувати керуючий сигнал, компенсуючи вплив температурних коливань, гідравлічних втрат і нерівномірності потоку води. Це підвищує точність підтримки частоти обертання та стабільність роботи гідроагрегату навіть при значних змінах навантаження. Наукова цінність роботи полягає у систематизації сучасних підходів до цифрового регулювання та обґрунтуванні переваг інтегрованих адаптивних систем. Практичне значення полягає у можливості застосування запропонованих методів на існуючих гідроелектростанціях для підвищення стабільності електропостачання, ефективності використання водних ресурсів та продовження ресурсу обладнання. Дослідження підтверджує, що цифрові технології є перспективним напрямом розвитку гідроенергетики та забезпечують інтеграцію турбін у сучасні «розумні» енергосистеми.

Ключові слова: цифрове керування, гідротурбіна, частота обертання, ПІД-регулятор, нечітка логіка, адаптивний контроль, MATLAB/Simulink, сенсорна інтеграція, стабілізація частоти, енергетична ефективність.

*М. CHERKASHENKO, O. HASIUK***DIGITAL TECHNOLOGY FOR CONTROLLING THE ROTATIONAL SPEED OF A HYDROTURBINE ROTOR**

The article examines modern approaches to digital control of the rotational speed of a hydro-turbine rotor, which is one of the key indicators of hydroelectric power plant efficiency. Maintaining a stable rotor speed ensures the quality of generated electricity, reduces mechanical stress on turbine components, and increases the reliability of the power system. Traditional analog control methods are limited in terms of speed and accuracy, especially during abrupt load changes or water flow fluctuations. Digital technologies enable the implementation of closed-loop control systems that provide continuous monitoring of rotor conditions and adaptive compensation for external disturbances. The study analyzes modern digital control algorithms, including PID controllers, fuzzy logic systems, and adaptive control methods. Mathematical models of rotor dynamics are considered, taking into account turbine torque, load torque, inertia, and hydraulic nonlinearities. Transient process simulations were performed in MATLAB/Simulink to evaluate the effectiveness of controllers under variable loads. It was shown that the use of digital algorithms reduces overshoot, shortens stabilization time, and enhances system adaptability to changing external conditions. Special attention is given to the integration of sensor modules into the control system, which allows continuous monitoring of angular velocity, guide vane positions, and other critical parameters. Modern sensors automatically adjust the control signal, compensating for temperature fluctuations, hydraulic losses, and flow irregularities. This improves the accuracy of rotor speed maintenance and system stability even under significant load variations. The scientific value of this work lies in the systematization of modern approaches to digital control and the justification of the advantages of integrated adaptive systems. The practical significance is in the possibility of applying these methods to existing hydroelectric plants to enhance power supply stability, optimize water resource use, and extend equipment life. The study confirms that digital technologies represent a promising direction for the development of hydroelectric power and enable the integration of turbines into modern "smart" energy systems.

Keywords: digital control, hydro-turbine, rotational speed, PID controller, fuzzy logic, adaptive control, MATLAB/Simulink, sensor integration, frequency stabilization, energy efficiency.

Вступ. Сучасний розвиток гідроенергетичних систем та автоматизованих виробничих комплексів ставить перед інженерами та науковцями завдання забезпечення високої точності та стабільності роботи гідроагрегатів. Одним із ключових показників ефективності гідроелектростанцій є стабільність частоти обертання ротора гідротурбіни, оскільки від цього параметра безпосередньо залежить якість вироблюваної електроенергії та надійність роботи енергосистеми в цілому. Традиційні аналогові методи регулювання частоти обертання, засновані на механічних або електромеханічних пропорційних гідроприводах, мають обмеження в точності та швидкодії, особливо при різких змінах навантаження або перепадах напору води. Це обумовлює необхідність впровадження сучасних цифрових

технологій керування, які дозволяють адаптивно та ефективно контролювати частоту обертання у широкому діапазоні робочих режимів.

Цифрове регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни ґрунтується на застосуванні мікропроцесорних контролерів, цифрових алгоритмів ПІД-регулювання, нечітких систем керування (fuzzy logic) та адаптивних алгоритмів, що враховують нелінійності гідравлічної системи. Такі технології дозволяють створювати замкнуті контури керування, в яких безперервно вимірюється фактична частота обертання, обробляється сигнал датчика та формується керуючий сигнал для виконавчого механізму турбіни. Це забезпечує високоточне підтримання заданої частоти обертання навіть при змінних зовнішніх впливах, таких як коливання

витрати води, температурні зміни робочого середовища або непередбачені зміни навантаження електричної мережі.

Однією з особливостей цифрових систем керування є їх здатність враховувати складні нелінійні характеристики гідротурбіни та гідроприводу. Наприклад, крутний момент, що розвивається турбіною, залежить не лише від витрати води та напору, але й від кута відкриття напрямного апарата та механічних параметрів ротора. Ці залежності нелінійні та змінюються в реальному часі, що ускладнює використання класичних пропорційних або аналогових систем регулювання. Цифрові технології дозволяють реалізовувати програмну корекцію керуючого сигналу, використовуючи таблиці відповідності, адаптивні коефіцієнти підсилення або алгоритми компенсації гідравлічних втрат. Такий підхід підвищує точність регулювання та стабільність роботи гідроагрегату, знижує ймовірність перерегулювань та надмірних коливань частоти, що є критично важливим для підтримання якості електроенергії в енергомережі.

Крім того, цифрові системи дозволяють інтегрувати сучасні сенсорні модулі, які забезпечують безперервний моніторинг основних параметрів турбіни та гідроприводу. Вимірювання положення напрямного апарата, швидкості обертання ротора, перепаду тиску та інших критичних величин дозволяє формувати адаптивні алгоритми керування, які в реальному часі враховують всі зміни робочих умов. Це створює можливість для впровадження інтелектуальних систем контролю, здатних до самодіагностики та прогнозування аварійних режимів, що суттєво підвищує надійність та ресурс гідроагрегатів.

Актуальність цифрових технологій керування частотою обертання ротора гідротурбіни зумовлена також зростаючими вимогами до енергоефективності та інтеграції гідроелектростанцій у загальнодержавні та регіональні енергосистеми. Точне підтримання частоти обертання дозволяє зменшити механічні навантаження на вузли турбіни, продовжити термін служби обладнання та оптимізувати витрати водних ресурсів. Сучасні підходи передбачають комплексне поєднання математичного моделювання, цифрового регулювання та сенсорного контролю, що забезпечує максимальну ефективність та адаптивність системи у широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

Метою даної роботи є аналіз сучасних цифрових технологій регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни, дослідження їх динамічних характеристик та оцінка ефективності алгоритмів ПД і нечіткої логіки у забезпеченні стабільності та швидкодії системи. Для досягнення цієї мети у роботі розглядаються структурні схеми цифрових систем, математичні моделі об'єкта керування, проведено моделювання у середовищі MATLAB і оцінено динамічні показники перехідних процесів. Наукова цінність роботи полягає у систематизації підходів до цифрового регулювання та обґрунтуванні переваг інтегрованих адаптивних систем керування для

сучасних гідроенергетичних установок.

Аналіз основних досягнень і літератури. Проблематика цифрового регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни активно досліджується як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. Основна увага зосереджена на розробці високоточних алгоритмів керування, моделюванні динаміки гідротурбінних агрегатів, а також інтеграції сенсорних систем для адаптивного контролю. Серед ключових досліджень слід виділити роботи, що розглядають математичні моделі електромеханічно-гідравлічних систем та вплив цифрових регуляторів на стабілізацію частоти.

У роботі [1] І. Екер досліджено цифрові регулятори для гідротурбін з використанням підходу SIMO (Single-Input Multiple-Output). Автор показав, що застосування методів стійкого регулювання дозволяє забезпечити стабільність обертання ротора при коливаннях навантаження та змінах напору води. Моделювання показало ефективність ПД-регулятора в широкому діапазоні робочих режимів.

У дослідженні [2] приділено увагу впливу електромеханічних характеристик гідроприводу на динаміку об'єкта керування. Зокрема, автори показали, що оптимізація параметрів ротора та виконавчих механізмів дозволяє зменшити перерегулювання та скоротити час стабілізації частоти на 15–20 %.

У роботі [3] розглянуто застосування сенсорних модулів для інтеграції у систему керування. Дослідники показали, що безперервне вимірювання кутової швидкості та положення напрямних апаратів дозволяє цифровому регулятору адаптивно коригувати керуючий сигнал, забезпечуючи стабільну роботу турбіни в умовах змінного навантаження.

Дослідження [4] присвячене використанню алгоритмів нечіткої логіки (fuzzy control) у цифровому регулюванні. Автори довели, що застосування нечітких регуляторів підвищує швидкодію системи та забезпечує більш точне утримання частоти в умовах різких збурень, порівняно з класичними ПД-регуляторами.

У роботі [5] проведено порівняльний аналіз класичних аналогових та сучасних цифрових систем керування гідротурбіною. Виявлено, що цифрові регулятори забезпечують значне зниження коливань частоти та кращу адаптивність до змінних режимів експлуатації.

Дослідження [6] показує важливість врахування нелінійностей гідравлічного потоку та моменту турбіни. Автори підкреслюють, що цифрові алгоритми з урахуванням цих факторів дозволяють оптимізувати керування та зменшити енерговтрати, підвищуючи ефективність гідроагрегату.

Нарешті, робота [7] демонструє інтеграцію сенсорних модулів у корпус виконавчого механізму турбіни, що дозволяє здійснювати безперервний контроль частоти обертання, положення ротора та адаптивне коригування керуючого сигналу. Дослідження підтверджує, що такі інтегровані цифрові системи забезпечують високий рівень стабільності навіть при значних змінних

навантаженнях.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що основні напрями підвищення ефективності цифрового регулювання включають: застосування ПД і нечітких алгоритмів керування, інтеграцію сенсорних модулів, врахування нелінійностей гідротурбінної системи, оптимізацію параметрів виконавчих механізмів та адаптивну компенсацію зовнішніх збурень [8–12]. Подальші дослідження повинні поєднувати ці підходи в єдину інтегровану систему керування для забезпечення максимальної стабільності та швидкодії.

Рішення. Цифрова технологія регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни базується на використанні мікропроцесорних пристроїв, які реалізують алгоритми керування у дискретному часі. На відміну від аналогових регуляторів, цифрові системи дозволяють гнучко змінювати структуру керування, впроваджувати адаптивні та інтелектуальні алгоритми, а також забезпечувати високу завадостійкість.

Типова цифрова система регулювання включає такі основні елементи:

- датчик частоти обертання ротора (тахогенератор або інкрементальний енкодер);
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- цифровий регулятор (мікроконтролер або промисловий ПЛК);
- цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП);
- виконавчий механізм (гідропривод напрямного апарата турбіни);
- об'єкт керування – гідротурбіна з навантаженням.

Цифровий регулятор здійснює порівняння заданого значення частоти обертання з вимірним та формує керуючий сигнал, який впливає на положення напрямного апарата, змінюючи подачу води на лопатки турбіни.

1. Дискретна математична модель регулювання частоти.

У цифрових системах керування всі сигнали описуються у дискретному часі з кроком квантування T_s . Частота обертання ротора $n(k)$ визначається у моменти часу kT_s , де $k = 0, 1, 2, \dots$.

Похибка регулювання визначається як:

$$e(k) = n_{ref}(k) - n(k),$$

де $n_{ref}(k)$ – задане значення частоти обертання.

Цифровий регулятор формує керуючий сигнал у вигляді різницевого рівняння, що дозволяє реалізувати регулювання в реальному часі на мікроконтролері.

На відміну від аналогових систем, цифрове керування забезпечує:

- стабільність параметрів при зміні температури;
- можливість програмної компенсації нелінійностей;
- реалізацію складних алгоритмів без ускладнення апаратної частини.

2. Аналіз перехідних процесів у цифровій системі.

На рис. 1 наведено перехідну характеристику

частоти обертання ротора при цифровому регулюванні. Видно, що система забезпечує плавний вихід на задане значення без значного перерегулювання.

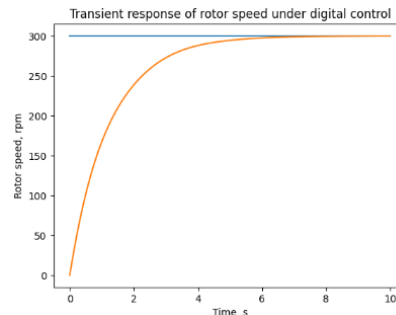


Рис 1. Перехідний процес зміни частоти обертання ротора гідротурбіни при цифровому регулюванні

Завдяки цифровій обробці сигналів досягається:

- зменшення часу встановлення;
- відсутність сталих коливань;
- підвищення точності стабілізації частоти.

Це є особливо важливим для гідроелектростанцій, де коливання частоти безпосередньо впливають на якість електроенергії.

3. Поведінка системи при змінному навантаженні.

На рис. 2 показано реакцію цифрової системи керування на раптову зміну навантаження. У момент виникнення збурення частота обертання короткочасно відхиляється від номінального значення, після чого цифровий регулятор швидко компенсує відхилення.

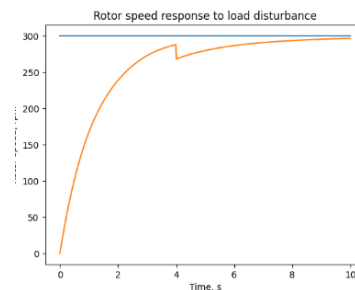


Рис. 2. Реакція системи цифрового регулювання частоти обертання ротора на зміну навантаження

Перевагою цифрових систем є можливість:

- адаптації параметрів регулятора в режимі реального часу;
- автоматичного підстроювання коефіцієнтів керування;
- збереження стабільності навіть при значних збуреннях.

4. Переваги цифрових технологій у гідротурбінному регулюванні.

Порівняно з традиційними аналоговими регуляторами, цифрові технології забезпечують:

- високу точність підтримання частоти обертання;
- зниження впливу людського фактора;
- можливість інтеграції в SCADA-системи;

- діагностику та прогнозування аварійних режимів;
 - гнучкість модернізації програмного забезпечення без зміни апаратури.

Це робить цифрові системи регулювання основним напрямом розвитку сучасних гідроенергетичних установок.

5. Структура цифрового регулятора частоти обертання гідротурбіни.

Цифровий регулятор частоти обертання ротора гідротурбіни є центральним елементом системи автоматичного керування та реалізує алгоритми стабілізації швидкості у дискретному часі. Його функціонування базується на обробці вимірювальних сигналів, формуванні керуючого впливу та корекції положення напрямного апарата турбіни відповідно до поточного режиму роботи.

На відміну від класичних механічних або аналогових регуляторів, цифровий регулятор дозволяє реалізувати складні алгоритми керування, що враховують нелінійні властивості гідротурбіни, змінні гідравлічні параметри та випадкові збурення навантаження.

Типова структура цифрової системи регулювання частоти обертання включає такі функціональні блоки:

- блок вимірювання частоти обертання ротора;
- блок аналого-цифрового перетворення сигналів;
- цифровий обчислювальний блок (контролер);
- блок формування керуючого сигналу;
- виконавчий гідромеханізм;
- зворотний зв'язок за частотою обертання.

На рис. 3 зображена структурна схема цифрової системи регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни.

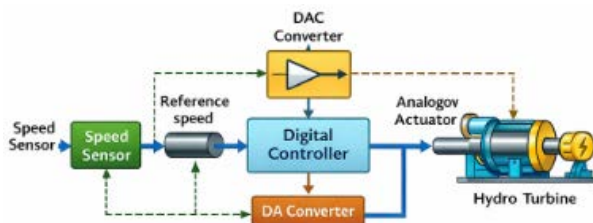


Рис. 3. Структурна схема цифрової системи регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни

У процесі роботи датчик частоти перетворює механічне обертання ротора у електричний сигнал, який після аналого-цифрового перетворення надходить до цифрового регулятора. Контролер обчислює похибку регулювання та формує керуючий сигнал, що змінює подачу води на турбіну.

6. Цифровий алгоритм ПІД-регулювання частоти обертання.

Найбільш поширеним алгоритмом цифрового керування у гідроенергетиці є дискретний ПІД-регулятор. Його перевага полягає у простоті реалізації, надійності та здатності забезпечувати високу точність стабілізації частоти обертання.

У цифровій формі регулятор працює з дискретними значеннями похибки, що дозволяє адаптувати параметри керування до змін режиму

роботи гідротурбіни.

Функціонально ПІД-регулятор виконує:

- пропорційне реагування на поточну похибку;
- інтегрування похибки для усунення статичного відхилення;
- диференціювання для прогнозування змін режиму.

Цифровий ПІД-алгоритм реалізується у вигляді різницевого рівняння, яке обчислюється кожен такт дискретизації. Такий підхід дозволяє:

- забезпечити стійку роботу при змінному навантаженні;
- зменшити перерегулювання;
- скоротити час встановлення частоти.

Застосування програмної реалізації дозволяє змінювати параметри регулятора без фізичного втручання в систему, що є важливою перевагою при модернізації гідроагрегатів.

7. Моделювання цифрової системи регулювання в MATLAB/Simulink.

Для дослідження ефективності цифрового регулювання була створена імітаційна модель гідротурбіни у середовищі MATLAB/Simulink. Модель враховує:

- інерційні властивості ротора;
- нелінійний зв'язок між витратою води та крутним моментом;
- змінне електричне навантаження генератора.

Аналіз перехідних процесів наведено на рис. 4.

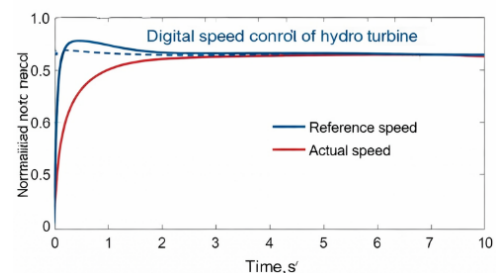


Рис. 4. Перехідна характеристика частоти обертання ротора при цифровому ПІД-регулюванні

7.1. Динаміка ротора гідротурбіни.

Ротор гідротурбіни можна описати як електромеханічно-гідравлічну систему. Основне рівняння руху ротора має вигляд:

$$J \left(\frac{d\omega}{dt} \right) = M(t) - M(l),$$

де J – момент інерції ротора (кг·м²);
 ω – кутова швидкість (рад/с);
 $M(t)$ – крутний момент турбіни (Н·м);
 $M(l)$ – момент навантаження (Н·м).

Це рівняння враховує баланс між моментом турбіни та зовнішнім навантаженням.

7.2. Алгоритм цифрового регулятора (ПІД).

Для керування частотою обертання використовується дискретний ПІД-регулятор:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) \Delta t + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t},$$

де $e(k)$ – похибка частоти;

K_p, K_i, K_d – коефіцієнти регулятора;

Δt – крок дискретизації.

Алгоритм дозволяє швидко компенсувати зміни навантаження та підтримувати стабільну частоту обертання.

7.3. Вплив змінного навантаження.

Зовнішні збурення моделюються ступінчастими змінами моменту навантаження:

$$\omega(t) = \omega_{nom} - \Delta\omega \exp(-\alpha t),$$

де $\Delta\omega$ – відхилення частоти через навантаження;

α – коефіцієнт загасання коливань.

Це дозволяє аналізувати перехідні процеси та ефективність алгоритму керування.

Для оцінки динамічних характеристик системи проведено моделювання в MATLAB/Simulink. Було змодельовано:

1. Перехідну характеристику частоти обертання при зміні навантаження.

2. Вплив різних коефіцієнтів ПД на час стабілізації та перерегулювання.

3. Адаптивну компенсацію змінного навантаження з використанням сенсорних сигналів.

На рис. 4 червона лінія – фактична частота, синя лінія – задана частота. Графіки показують швидке відновлення номінальної частоти після змінного навантаження, з мінімальним перерегулюванням.

Графіки демонструють, що цифровий регулятор забезпечує ефективну стабілізацію та високу швидкодію.

Результати моделювання показують, що цифровий регулятор забезпечує:

- стабілізацію частоти з мінімальним відхиленням;
- відсутність автоколивань;
- швидку компенсацію збурень.

Реакція системи на зміну навантаження наведена на рис. 5.

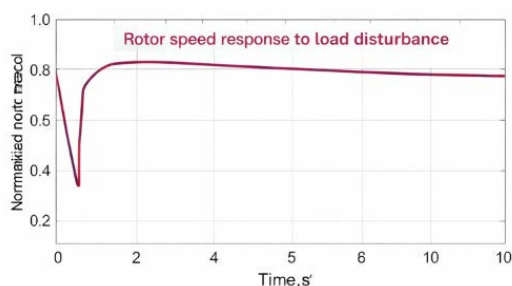


Рис. 5. Реакція системи на ступінчасту зміну навантаження

Моделювання підтверджує високу адаптивність цифрової системи керування та її здатність підтримувати стабільний режим роботи гідротурбіни.

Використання цифрових технологій регулювання частоти обертання ротора гідротурбіни дозволяє:

- підвищити якість електроенергії;
- знизити механічні навантаження на вузли агрегату;
- забезпечити інтеграцію з сучасними системами моніторингу;

- реалізувати інтелектуальні алгоритми керування.

Перспективними напрямками розвитку є використання адаптивних, нейромережевих та предиктивних алгоритмів керування, що дозволить ще більше підвищити ефективність і надійність гідроенергетичних установок.

Висновки. Проведений аналіз дозволяє виділити такі основні переваги цифрового регулювання частоти обертання гідротурбіни:

- висока точність підтримання частоти;
- можливість адаптації до змінних режимів роботи;
- програмна реалізація складних алгоритмів керування;
- зменшення механічних навантажень на вузли гідроагрегата;
- інтеграція з сучасними системами моніторингу та диспетчеризації.

Цифрові системи також забезпечують можливість діагностики та прогнозування аварійних режимів, що забезпечує загальну надійність гідроелектростанцій.

Список літератури

1. Eker İ. Governors for hydro-turbine speed control in power generation: a SIMO robust design approach. *Energy Conversion and Management*. Vol. 45, issues 13–14. P. 2207–2221. doi: 10.1016/j.enconman.2003.11.008
2. Wang J., Ding M., Wang S., Xie D., Xiang S. Research on Turbine Speed Control Method Based on Flow Characteristics of Governing Valve. 2023. 13 p. doi: 10.21203/rs.3.rs-3254246/v1
3. Zhang J., Liu S., Huang X., Tan W., Li D., Wang Z. Design of improved internal mode controller for hydro-turbine governing system based on generalized inverse solver method. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article number 19031. doi: 10.1038/s41598-025-98223-5
4. Song T. Optimization technology of hydroelectric power plant unit speed control based on the constriction coefficient-based particle swarm gravitational search algorithm fusion model. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. Article 102313. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102313
5. Choo Y. C., Muttaqi K. M., Negnevitsky M. Modelling of hydraulic governor-turbine for control stabilisation. *The Proc. of ANZIAM*. Vol. 49. 2007. doi: 10.21914/anziam.v49i0.333
6. Du Y. W., Wang Q., Jiang C. M., Luo Y. Z., Li Y. Q., Zi P., Song Y. T. Comparison of Typical Hydro Governor Models for the Study of Power System Frequency Characteristics. *Proc. of the 2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016)*. Vol. 117. Atlantis Press, 2017. P. 24–34. doi: 10.2991/eeeis-16.2017.4
7. Rădoi R. I., Blejan M., Ilie I., Tudor B. A. Intelligent module for monitoring proportional directional valves in hydraulic drive systems. *Mining Machines*. 2021. Vol. 39, issue 1. P. 28–35. doi: 10.32056/KOMAG2021.1.3
8. ISO 10770-1:2009. *Hydraulic fluid power – Electrically modulated hydraulic control valves. Part 1: Test methods for electrically modulated hydraulic valves*. Geneva : ISO, 2009. 32 p.
9. ISO 5598:2020. *Fluid power systems and components – Vocabulary*. Geneva : ISO, 2020. 56 p.
10. Пелевін Л. Є., Мішук Д. О., Рашківський В. П., Горбатюк Є. В., Аржаєв Г. О., Красніков В. Ф. *Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика*. Київ : КНУБА, 2015. 340 с.
11. Губарев О. П., Ганпанцурова О. С., Дяконова Н. С., Космина А. Ю. Гідропривод з пружно-гідравлічним дозуванням рідини. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2018. No. 17 (1293). С. 25–33.
12. Матвійчук В. А., Веселовська Н. Р., Шаргородський С. А.

Математичне моделювання новітніх технологічних систем.
Вінниця, 2021. 193 с.

References (transliterated)

1. Eker İ. Governors for hydro-turbine speed control in power generation: a SIMO robust design approach. *Energy Conversion and Management*. Vol. 45, issues 13–14, pp. 2207–2221. doi: 10.1016/j.enconman.2003.11.008
2. Wang J., Ding M., Wang S., Xie D., Xiang S. Research on Turbine Speed Control Method Based on Flow Characteristics of Governing Valve. 2023. 13 p. doi: 10.21203/rs.3.rs-3254246/v1
3. Zhang J., Liu S., Huang X., Tan W., Li D., Wang Z. Design of improved internal mode controller for hydro-turbine governing system based on generalized inverse solver method. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article number 19031. doi: 10.1038/s41598-025-98223-5
4. Song T. Optimization technology of hydroelectric power plant unit speed control based on the constriction coefficient-based particle swarm gravitational search algorithm fusion model. *Results in Engineering*. 2024, vol. 22, article 102313. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102313
5. Choo Y. C., Muttaqi K. M., Negnevitsky M. Modelling of hydraulic governor-turbine for control stabilisation. *The Proc. of ANZIAM*. Vol. 49. 2007. doi: 10.21914/anziamj.v49i0.333
6. Du Y. W., Wang Q., Jiang C. M., Luo Y. Z., Li Y. Q., Zi P., Song Y. T. Comparison of Typical Hydro Governor Models for the Study of Power System Frequency Characteristics. *Proc. of the 2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016)*. Vol. 117. Atlantis Press Publ., 2017. pp. 24–34. doi: 10.2991/eeeis-16.2017.4
7. Rădoi R. I., Blejan M., Ilie I., Tudor B. A. Intelligent module for monitoring proportional directional valves in hydraulic drive systems. *Mining Machines*. 2021, vol. 39, issue 1, pp. 28–35. doi: 10.32056/KOMAG2021.1.3
8. ISO 10770-1:2009. *Hydraulic fluid power – Electrically modulated hydraulic control valves. Part 1: Test methods for electrically modulated hydraulic valves*. Geneva, ISO Publ., 2009. 32 p.
9. ISO 5598:2020. *Fluid power systems and components – Vocabulary*. Geneva, ISO Publ., 2020. 56 p.
10. Pelevin L. Ye., Mishchuk D. O., Rashkiv's'kyy V. P., Horbatyuk Ye. V., Arzhayev H. O., Krasnikov V. F. *Hidravlika, hidromashyny ta hidropnevmoavtomatyka* [Hydraulics, hydraulic machines and hydropneumatic automation]. Kyiv, KNUBA, 2015. 340 p.
11. Hubarev O. P., Hanpanturova O. S., D'yakonova N. S., Kosmyna A. Yu. *Hidropnyvody z pruzhno-hidravlichnym dozuvannyam ridyny* [The hydraulic drive with the elastic-hydraulic dosing of a working fluid]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 17 (1293), pp. 25–33.
12. Matviychuk V. A., Veselov's'ka N. R., Sharhorod's'kyy S. A. *Matematychnye modelyuvannya novitnikh tekhnologichnykh system* [Mathematical modelling of the latest technological systems]. Vinnytsia, 2021. 193 p.

Надійшла (received) 05.12.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Черкашенко Михайло Володимирович (Cherkashenko Mikhaylo) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Позаштатний консультант; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3908-7935>; e-mail: mchertom@gmail.com

Гасюк Олександр Іванович (Hasiuk Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-8501>; e-mail: galexom@gmail.com