

АНОТАЦІЯ

Придворов С. С. Удосконалення методів підвищення якості автоматизованих систем керування гідроелектростанціями малої потужності – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво за спеціальністю 66 Інформаційно-вимірювальні технології. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота виконувалася впродовж 2022-2025 рр. на кафедрі автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи ФН-21-05 «Розробка алгоритмів та структур енергозберігаючих автоматизованих систем керування нагнітальними установками нафто- та газоперекачувальних станцій».

У дисертаційній роботі розглянуто науково-практичну задачу підвищення показників якості роботи гідроелектростанцій малої потужності шляхом удосконалення методів математичного моделювання, синтезу та оптимізації їх автоматизованих систем керування. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі малої гідроенергетики в забезпеченні енергетичної безпеки та децентралізації генерації, особливо в умовах нестабільності енергосистеми, руйнування традиційних джерел генерації та необхідності підвищення енергоефективності та автономності локальних енергетичних об'єктів.

Показано, що для більшості існуючих міні- та мікроГЕС системи керування проєктувалися на основі спрощених підходів, орієнтованих здебільшого на забезпечення стійкості й допустимих перехідних процесів без комплексного урахування енергетичних втрат, якості електроенергії, надійності та автономності. Внаслідок цього значний потенціал підвищення

ефективності роботи ГЕС малої потужності лишається нереалізованим: зростають втрати енергії в перехідних режимах, збільшується кількість ручних втручань, погіршуються умови роботи обладнання та показники якості електроенергії для споживачів.

Мета дослідження. Полягає у підвищенні комплексного показника якості роботи гідроелектростанцій малої потужності шляхом удосконалення методів математичного моделювання, синтезу та оптимізації автоматизованих систем керування за енергетичними, динамічними, електротехнічними та експлуатаційними критеріями.

Об'єкт дослідження: процеси підвищення показників якості роботи гідроелектростанцій малої потужності в нормальних режимах експлуатації.

Предмет дослідження: математичні моделі, методи та алгоритми підвищення показників якості автоматизованих систем керування гідроелектростанціями малої потужності, а також комплексні критерії оцінювання якості їх роботи.

Методи дослідження. Методи, які використовуються в дослідженні: методи теорії кваліметрії, стандартизації, системного аналізу та теорії автоматичного керування; методи математичного моделювання гідравлічних, механічних та електромагнітних процесів; лінеаризації нелінійних рівнянь у околі робочих режимів; методи аналізу динамічних систем; інтегральні критерії якості; методи чисельної оптимізації параметрів регуляторів (градієнтні та пошукові алгоритми); комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні наукові результати досліджень складають:

1. Вперше сформовано та обґрунтовано комплексний показник якості міні-ГЕС, який включає енергетичну, динамічну, електротехнічну, надійнісну, екологічну складову та показник автономності, що дозволяє кількісно оцінювати якість роботи гідроелектростанції у різних режимах;

2. Вперше запропоновано узагальнену математичну модель втрат енергії

через неідеальне керування малою ГЕС, яка явно враховує відхилення потужності, напору, витрати та параметрів системи керування від оптимальних значень та їх вплив на показники якості;

3. Набули подальшого розвитку методи синтезу систем керування малими ГЕС на основі лінеаризованих моделей у матричній формі та інтегральних критеріїв якості, що дає змогу обґрунтовано вибирати оптимальні параметри регуляторів;

4. Набули подальшого розвитку методи визначення вагових коефіцієнтів комплексного показника якості, що дає змогу більш адекватно відобразити пріоритети експлуатуючої організації (енергоефективність, якість електроенергії, автономність тощо).

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми в умовах сучасного стану енергосистеми України, зростання частки відновлюваних джерел енергії та необхідності підвищення енергоефективності, надійності й автономності локальних джерел генерації. Показано, що малі ГЕС відіграють важливу роль у децентралізації генерації, забезпеченні живлення віддалених споживачів, критичної інфраструктури та мікромереж, однак існуючі системи керування часто не забезпечують належного рівня комплексної якості їх роботи. Сформульовано об'єкт дослідження – процеси функціонування ГЕС малої потужності в умовах автоматизованого керування, та предмет дослідження – математичні моделі, методи й алгоритми підвищення показників якості автоматизованих систем керування ГЕС малої потужності, а також комплексні критерії оцінювання ефективності їх роботи.

Визначено мету роботи, сформульовано основні задачі дослідження, що охоплюють аналіз стану малої гідроенергетики, побудову математичних моделей, моделювання втрат енергії, розробку інтегральних і комплексних критеріїв якості, синтез систем керування та їх оптимізацію, а також формування практичних рекомендацій. Наведено перелік використаних методів дослідження, до яких віднесено методи теорії автоматичного

керування, системного аналізу, математичного моделювання гідравлічних, механічних та електромагнітних процесів, інтегральні критерії якості і чисельні методи оптимізації параметрів регуляторів. Сформульовано основні елементи наукової новизни, пов'язані з введенням комплексного показника якості та узагальненої моделі втрат енергії через неідеальне керування, а також окреслено практичну цінність отриманих результатів для проектування і модернізації систем керування міні-ГЕС.

У *першому розділі* виконано аналіз стану малої гідроенергетики та показників якості роботи малих ГЕС. Розглянуто концепцію розвитку малої гідроенергетики в Україні та світі, визначено основні тенденції, переваги та обмеження використання малих ГЕС у сучасних енергосистемах. Наведено класифікацію малих гідроелектростанцій за потужністю, схемами приєднання до мережі та режимами роботи (автономні, паралельні з енергосистемою, робота в складі мікромереж). Проаналізовано характеристики роботи малих ГЕС, включаючи гідравлічні, енергетичні та експлуатаційні параметри, і показано, які фактори найбільше впливають на їхню ефективність і стабільність. Особливу увагу приділено аналізу структури показників якості малих ГЕС: систематизовано енергетичні показники (ККД, втрати, виробіток), динамічні показники (перехідні процеси потужності та напруги), показники якості електроенергії, надійності, екологічні показники та показник автономності.

Виконано аналіз існуючих систем керування малими ГЕС, наведено типові структурні схеми, виявлено обмеження традиційних алгоритмів регулювання потужності та напруги, зокрема відсутність комплексного урахування енергетичних і динамічних критеріїв.

Проаналізовано нормативну базу щодо забезпечення високих показників якості роботи ГЕС малої потужності та якості електроенергії, виявлено недостатню адаптованість чинних стандартів до специфіки малих станцій.

На основі проведеного аналізу сформульовано ключові протиріччя між вимогами до високої якості роботи міні-ГЕС і існуючим рівнем їх автоматизованого керування, що обґрунтовують необхідність удосконалення методів синтезу та оптимізації систем керування.

У *другому розділі* розроблено математичні моделі малих ГЕС і моделі їхніх показників якості. Побудовано повну математичну модель малої ГЕС, що описує гідравлічні процеси в напірних трактах, динаміку гідротурбіни, механічну взаємодію турбіни та генератора, а також електромагнітні процеси в синхронному генераторі. На основі повної моделі синтезовано спрощену математичну модель, орієнтовану на аналіз і синтез систем керування, у якій виділено домінуючі динамічні ланки й сформовано рівняння в зручному для лінеаризації вигляді.

Виконано математичне моделювання втрат енергії в малих ГЕС: сформовано моделі гідравлічних втрат у напірних трактах, втрат у турбіні, механічних втрат у агрегаті та електричних втрат у генераторі. Далі запропоновано загальну математичну модель втрат енергії через неідеальне керування, де втрати виражені через відхилення потужності, напруги, частоти, напору та витрати від оптимальних режимів. Цю модель деталізовано з урахуванням конкретних відхилень основних змінних, що дозволило кількісно оцінювати вплив параметрів системи керування на сумарні втрати енергії.

Розроблено математичні моделі критеріїв та показників якості малих ГЕС, зокрема інтегральні показники ISE, ІТА, ІТАЕ для перехідних процесів, а також узагальнені показники якості електроенергії, надійності, екологічності й автономності. На основі цих моделей сформовано основу для подальшого визначення комплексного показника якості роботи міні-ГЕС.

У *третьому розділі* виконано синтез систем керування ГЕС малої потужності, які забезпечують підвищення показників якості, зокрема – енергоефективності. Для конкретної міні-ГЕС потужністю 100 кВт побудовано лінеаризовану модель у матричній формі, яка описує динаміку

основних станів в околі робочої точки, та на її основі визначено передатні функції каналів регулювання потужності та напруги, а також вимірювальних і виконавчих ланок. Це дозволило застосувати класичні та сучасні методи синтезу регуляторів.

Розроблено дві групи систем керування: системи, оптимізовані за критерієм максимуму комплексного показника якості гідроелектричної станції, та системи, оптимізовані за критерієм максимальної енергоефективності. Для кожного варіанта сформульовано критерії оптимізації, обрано методи чисельного налаштування параметрів ПД-регуляторів і проведено моделювання перехідних процесів. Показано, що оптимізація лише за енергоефективністю забезпечує мінімізацію втрат енергії, але не завжди гарантує необхідну швидкодію та якість електроенергії. Натомість синтез систем керування за критерієм максимуму комплексного показника якості дозволяє збалансувати вимоги до енергетичних, динамічних і експлуатаційних характеристик міні-ГЕС.

У четвертому розділі наведено результати аналізу експериментальних (імітаційних) досліджень щодо підвищення показників якості ГЕС малої потужності. Проаналізовано перехідні характеристики потужності міні-ГЕС за різними алгоритмами керування, зокрема для неоптимальних налаштувань, налаштувань, оптимізованих за енергоефективністю, та налаштувань, оптимізованих за комплексним показником якості. Окремо розглянуто перехідні процеси напруги генератора й оцінено їх відповідність вимогам до якості електроенергії. Розраховано інтегральні показники якості перехідних процесів та комплексний показник якості міні-ГЕС для кожного варіанта регулювання, що дозволило виконати кількісне порівняння ефективності систем керування. Доведено, що використання комплексного критерію при налаштуванні регуляторів забезпечує істотне зменшення інтегральних показників і значне зростання узагальненого показника якості порівняно з неоптимальним і суто енергетично орієнтованим варіантами.

Розглянуто вплив вибору типу генератора та параметрів електрообладнання на економічні показники якості роботи міні-ГЕС. Сформульовано практичні рекомендації щодо оптимізації систем керування за критерієм максимуму комплексного показника якості та надано рекомендації щодо визначення вагових коефіцієнтів окремих складових комплексного показника з урахуванням експлуатаційних умов і вимог замовника.

Розроблено проєкт технічних умов «Забезпечення високих показників якості роботи ГЕС малої потужності при їх автоматизованому керуванні».

Результати досліджень можуть бути впровадженні в автоматизованих системах керування при проєктуванні та модернізації гідроелектростанцій малої потужності.

Отримані в роботі нові наукові результати використовуються в навчальному процесі Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» у вигляді нових додаткових розділів у курсах лекцій з дисциплін: «Сучасні методи та алгоритми систем автоматичного керування», «Автоматизовані системи управління технологічними процесами і об'єктами».

Матеріали дисертації достатньо повно викладені у 12 наукових працях, у тому числі у 4 статтях у наукових фахових виданнях, апробовані на науково-технічних конференціях (опубліковано 8 тез доповідей в збірниках конференцій).

Ключові слова: показники якості, методи оцінювання якості, кваліметричні методи, комплексний показник якості, гідроелектростанції, поновлювальні джерела енергії, енергоефективність, енергозбереження, техніко-економічні показники, автоматизовані системи керування, оптимізація, нормативне забезпечення.