

АНОТАЦІЯ

Дрозд В. А. Удосконалення методів підвищення якості систем керування головними циркуляційними насосами атомних електростанцій – 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 ННІ «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 розв’язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості автоматизованого керування головними циркуляційними насосами (ГЦН) як критичного обладнання АЕС. Головні циркуляційні насоси забезпечують примусову циркуляцію теплоносія через активну зону реактора, парогенератори та трубопровідну систему, формуючи теплогідравлічні параметри, що визначають ефективність відведення тепла і стійкість роботи енергоблоку. Як агрегати великої потужності, ГЦН істотно впливають на власні потреби АЕС і економічні показники роботи. Разом із цим перехідні режими (пуск, компенсація збурень, вибіг) супроводжуються динамічними навантаженнями, коливаннями витрати та потужності, а також ризиками підвищеної вібрації, що може призводити до прискореного зношування та зниження ресурсу. У таких умовах виникає необхідність комплексного підходу до синтезу та оптимізації систем керування, який узгоджує різноманітні вимоги: якість регулювання, енергоефективність,

надійність (вібраційна складова), виконання обмежень електроприводу і режимну доцільність роботи насоса.

Мета досліджень полягає у розробці та обґрунтуванні методів підвищення показників якості систем керування головними циркуляційними насосами атомних електростанцій на основі математичного моделювання, синтезу структур САК і оптимізації параметрів регуляторів за критеріями енергоефективності, надійності та максимуму комплексного показника якості.

Об'єктом досліджень є процеси підвищення показників якості роботи циркуляційних насосів атомних електростанцій у пускових, перехідних та стаціонарних режимах роботи за нормальних умов експлуатації.

Предметом досліджень є наукові методи, математичні моделі та алгоритми підвищення показників якості головних циркуляційних насосів атомних електростанцій, а також комплексні критерії оцінювання якості їх роботи.

Методи дослідження: методи теорії кваліметрії, стандартизації, системного аналізу та теорії автоматичного керування; методи математичного моделювання гідромеханічних та електромеханічних систем (рівняння насоса, гідромережі, асинхронного двигуна, перетворювача частоти); методи лінеаризації нелінійних моделей у робочій точці та побудови передатних функцій для аналізу і синтезу регуляторів; методи оптимізації параметрів регуляторів за критеріями якості та за наявності обмежень (штрафні функції, багатокритеріальна оптимізація); імітаційне моделювання та обчислювальні експерименти для оцінювання перехідних процесів, втрат енергії та показників якості; методи статистичного аналізу та нормування показників якості (еталони, вагові коефіцієнти, комплексний показник).

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні наукові результати досліджень складають:

1. Набули подальшого розвитку методи оцінювання якості керування головних циркуляційних насосів шляхом формування комплексного показника якості, що інтегрує п'ять складових: динамічну якість, енергоефективність, надійність, штрафи за порушення обмежень та режимний показник роботи насоса, що дозволяє застосовувати його як універсальний критерій оптимізації в різних експлуатаційних режимах.

2. Вперше поставлена і вирішена задача оптимізації налаштування регуляторів головних циркуляційних насосів за критерієм максимуму комплексного показника якості, що дозволяє формувати налаштування регуляторів відповідно до пріоритетів експлуатації та забезпечувати керування з урахуванням режимних факторів.

3. Набули подальшого розвитку математичні моделі головних циркуляційних насосів шляхом введення узгоджених моделей перехідних втрат енергії та режимних відхилень, що забезпечує можливість оцінювання показників якості в динаміці.

4. Набули подальшого розвитку методи структурного синтезу систем автоматичного керування головними циркуляційними насосами АЕС з використанням еталонної математичної моделі, що підвищує енергоефективність роботи насосів і дає можливість вибору та оптимізації показників якості його роботи в залежності від режимних факторів.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційного дослідження, актуальність теми та її відповідність науковим напрямам, визначено наукову новизну та практичне значення результатів досліджень, а також предмет та об'єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено дані про апробацію результатів та публікації.

У першому розділі проаналізовано роботу ГЦН як частини технологічного ланцюга теплообміну та забезпечення теплогідравлічної стійкості. Показано, що насос не є автономним агрегатом, а працює у жорсткому взаємозв'язку з реакторною установкою, парогенераторами, трубопроводами і системами контролю та захисту. Окремо деталізовано режими роботи ГЦН: пускові, стаціонарні, режим компенсації збурень і вибіг, з акцентом на те, що вимоги до якості керування у цих режимах відрізняються як за критеріями, так і за обмеженнями. Для пуску важливими стають допустимі темпи розгону, обмеження за струмом і моментом, узгодження з теплогідравлічними процесами та вимоги до безпеки; для стаціонарних режимів – стабільність витрати, робота у зоні доцільних характеристик насоса, мінімізація втрат; для збурень – робастність і здатність компенсувати впливи без значних коливань; для вибігу – прогнозована деградація режиму та коректне спрацювання логіки безпечних станів.

Виконано аналіз впливу ГЦН на ефективність роботи енергоблоків. Показано, що якість керування ГЦН впливає на енергетичні показники не лише через середній рівень споживання, а й через перехідні режими, пікові навантаження, роботу поза оптимумом та непродуктивні втрати. Проаналізовано роль ГЦН у загальній надійності енергоблоку: підкреслено, що ризики формуються не тільки відмовами обладнання, а й накопиченням пошкоджень через вібрації та динамічні навантаження, які напряду залежать від якості керування.

Проведено аналіз нормативних документів щодо забезпечення високих показників якості обладнання АЕС, у тому числі в частині класифікації інформаційно-вимірювальних систем, вимог до надійності, процедур випробувань і вимог до функцій контролю/захисту. Це дозволило узгодити наукові постановки з вимогами реальної експлуатації.

Значну увагу приділено аналізу структур систем керування. Розглянуто ПП/ПД як базові структури, їхні переваги та обмеження в умовах потужних

насосних агрегатів. Показано доцільність каскадних структур, які розділяють швидкі електромеханічні процеси та повільні гідравлічні процеси, підвищуючи керованість і зменшуючи вплив взаємодії контурів. Окремо розглянуто підходи для вимірюваних збурень, робастні підходи для гарантій якості при невизначеностях параметрів та предиктивні методи як інструмент керування з обмеженнями і оптимізацією. Таким чином, у першому розділі сформовано системну рамку: які режими є ключовими, які вимоги й обмеження визначають якість, та які класи структур керування придатні для задачі.

Виконано узагальнення показників якості ГЦН та шляхів їх підвищення: обґрунтовано, що оцінювання якості має бути багатовимірним і включати точність регулювання, динамічні, енергетичні, вібраційні режимні та обмежувальні аспекти.

Другий розділ присвячено математичному моделюванню ГЦН як об'єкта керування та побудові моделей, необхідних для синтезу регуляторів і оцінювання якості. Введено позначення, базові величини та узгоджено систему змінних, що пов'язує насосні характеристики, параметри гідромережі та електропривід. Розроблено математичну модель насосу ГЦН, яка відображає залежності напору, потужності і ККД від витрати та швидкості обертання. Описано підхід до використання характеристик і їх параметризації для розрахунків у стаціонарних та у перехідних процесах.

Розроблено модель гідромережі першого контуру, яка визначає навантаження на насос і формує робочу точку. У моделі враховано нелінійність гідравлічного опору та інерційні властивості, що важливо для коректного опису перехідних процесів. Побудовано математичне моделювання електроприводу з частотним перетворювачем: описано електромагнітну модель асинхронного двигуна, принципи формування моменту, взаємодію електричних і механічних процесів, а також узагальнену модель перетворювача частоти як керованого джерела напруги/частоти з типовими динамічними обмеженнями, включно з обмеженнями за струмом і моментом.

Окремий блок присвячено пусковим режимам: описано методи моделювання часу розгону, характерних перехідних процесів і втрат енергії при пуску. Додатково (як окремий сценарій) наведено підхід до моделювання ГЦН з гідромурфтою та оцінювання втрат енергії, що дозволяє обґрунтувати переваги частотного керування з позиції енергоефективності та керованості.

Сформовано набір вихідних сигналів і похибок, які використовуються для оцінювання якості; визначено показники якості регулювання (динаміка і точність, зокрема за інтегральними критеріями типу ІТАЕ), енергетичні показники (споживання енергії та перехідні втрати), вібраційні показники як наслідки ресурсної надійності через динамічні навантаження, режимні гідравлічні показники (робота поблизу оптимуму насоса), а також штрафи за порушення обмежень. На цій основі введено комплексний показник якості, що інтегрує п'ять складових у єдину узгоджену оцінку, придатну для оптимізації і порівняння різних законів керування. Додатково сформовано модель втрат енергії у ГЦН у перехідних режимах як інструмент прямої оцінки енергоефективності керування.

Третій розділ присвячено синтезу систем керування ГЦН на основі розроблених моделей. Виконано аналіз системи регулювання реакторного обладнання в контексті місця ГЦН та обмежень, що накладаються верхніми рівнями керування та захисту. Розроблено лінеаризовану модель ГЦН, необхідну для класичного синтезу регуляторів у частотній/операторній області. Описано підхід до лінеаризації в робочій точці, визначення малосигнальних каналів «керування–вихід», а також підготовки моделі до розрахунку передатних функцій.

Сформовано структурну схему керування з обґрунтуванням каскадної організації (зовнішній контур витрати і внутрішній контур швидкості) та логіки обмежень електроприводу. Виконано розрахунок передатних функцій для насоса, двигуна, перетворювача частоти, елементів механічного тракту

та вимірювальних каналів (датчиків швидкості та витрати), що створює формальну основу для вибору і налаштування регуляторів.

Виконано постановку задачі оптимізації режимів роботи та налаштування регуляторів за різними критеріями якості. Сформульовано три постановки: оптимізація за критерієм енергоефективності, оптимізація за критерієм надійності (вібраційної складової) та оптимізація за максимумом комплексного показника якості. Показано, як у постановки включаються штрафи за порушення обмежень (струм, момент, потужність, межі режимів) і режимний фактор, що узгоджує оптимізацію з реальними умовами експлуатації. У результаті запропоновано принципи побудови структури САК ГЦН і методичні рекомендації щодо вибору підходу залежно від пріоритетів (економічних, ресурсних, технологічних).

Четвертий розділ присвячено експериментальним (імітаційним) дослідженням роботи ГЦН в пускових і стаціонарних режимах та перевірці ефективності запропонованих методів. Розроблено імітаційну модель ГЦН, що поєднує гідравлічну частину (насос–мережа) і електромеханічну частину (електропривід–перетворювач частоти) із реалізацією контурів керування та обмежень. Виконано дослідження пуску потужного двигуна у середовищі обчислювальних експериментів за різними способами керування, що дозволило порівняти характер перехідних процесів і енергетичні наслідки.

Проведено дослідження режимів при керуванні гідромурфтою як базового/порівняльного варіанта та дослідження роботи ГЦН за різними законами керування (неоптимальне налаштування, оптимізація за енергоефективністю, оптимізація за надійністю, оптимізація за комплексним показником). Для кожного сценарію виконано аналіз перехідних процесів витрати та потужності, а також оцінено втрати енергії у перехідних режимах. Паралельно проведено порівняльне оцінювання показників якості за розробленою системою критеріїв, що дозволило зробити висновок про переваги багатокритеріального під-

ходу та практичну доцільність комплексного показника якості для налаштування регуляторів. Виконано узагальнення результатів експериментів і формування рекомендацій щодо вибору закону керування залежно від експлуатаційних пріоритетів і режимів.

У додатках наведено результати імітаційного моделювання, проєкт технічних умов «Забезпечення високих показників якості роботи головних циркуляційних насосів АЕС при їх автоматизованому керуванні» та акти впровадження

Результати досліджень можуть бути впровадженні в автоматизованих системах керування головними циркуляційними насосами атомних електростанцій.

Отримані в роботі нові наукові результати використовуються в навчальному процесі Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Навчально-науковий інститут «Української інженерно-педагогічної академії» 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, головні циркуляційні насоси, атомна електростанція, енергоефективність, енергозбереження, техніко-економічні показники, автоматизовані системи керування, оптимізація, нормативне забезпечення.