

АНОТАЦІЯ

Чирочкін Д. О. Удосконалення методів підвищення якості систем керування глибинними насосами – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – 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 вирішено актуальні науково-технічні проблеми, що полягають у підвищенні показників якості систем керування глибинними насосами відцентрового та гвинтового типів шляхом забезпечення оптимальних і ефективних режимів їх функціонування у сталих та перехідних процесах при нормальних умовах експлуатації. Реалізація цього завдання дає змогу істотно покращити показники якості глибинних насосів, зокрема економічність та енергоефективність, завдяки зменшенню енергетичних втрат у насосах та підвищенню рівня енерго- та ресурсозбереження на насосних станціях.

Головним напрямом досліджень є вдосконалення методів підвищення якості функціонування систем керування глибинними насосами відцентрового та гвинтового типів шляхом застосування енергоефективного керування, а саме розробка наукових підходів і технічних рішень, що можуть слугувати базою для створення ефективних алгоритмів керування,

спрямованих на суттєве підвищення показників енергоефективності та динамічних показників роботи глибинних насосів.

Метою досліджень є удосконалення методів підвищення показників якості глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів шляхом синтезу ефективних систем керування, які забезпечують мінімальні втрати енергії в глибинних насосах в нормальних режимах експлуатації.

Об'єктом досліджень є процеси підвищення показників якості роботи глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів в нормальних режимах експлуатації.

Предметом досліджень є наукові методи, нормативне забезпечення і технічні засоби підвищення показників якості роботи глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів.

Методи дослідження. Методи, які використовуються в дослідженні, базуються на сучасних підходах теоретичних та експериментальних досліджень, а саме: аналіз та узагальнення науково-технічних джерел; системний аналіз технічних та експлуатаційних характеристик насосних установок; математичне моделювання для побудови нелінійних та лінеаризованих моделей глибинних насосів; методи теорії автоматичного керування для розроблення структур регуляторів, аналізу стійкості, побудови передатних функцій та визначення оптимальних параметрів регулювання; оптимізаційні методи для налаштування параметрів регуляторів за критеріями якості, мінімізації енерговитрат та забезпечення високих динамічних характеристик, методи ідентифікації; комп'ютерне моделювання для аналізувати динаміку насосних установок та перевірки працездатності запропонованих рішень; статистичні методи обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні наукові результати досліджень складають:

1. Удосконалено комплексний критерій якості роботи глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів шляхом поєднання показників якості роботи насоса та показників якості системи керування, що дає можливість використовувати його як основний критерій оптимальності.

2. Набули подальшого розвитку методи підвищення якості роботи глибинних насосів шляхом структурного синтезу і оптимізації систем керування та використання удосконаленого комплексного показника якості, що дає можливість підтримувати ефективність роботи насоса в процесі експлуатації на максимальному рівні.

3. Набули подальшого розвитку математичні моделі систем автоматичного керування глибинними насосами відцентрового та гвинтового типів в сталих та перехідних режимах експлуатації шляхом врахування інерційності насоса та нелінійності функцій втрат, що дозволяє визначати та аналізувати основні показники якості роботи насосів.

4. Вперше розроблено структуру системи автоматичного керування глибинними насосами відцентрового та гвинтового типів з використанням еталонної математичної моделі, що дозволяє визначати та підтримувати високі показники якості роботи безпосередньо в процесі експлуатації.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційного дослідження, його актуальність, відповідність науковим темам, визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, 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* представлено комплексний аналіз роботи глибинних насосів та факторів, що визначають їх якість і ефективність у процесі експлуатації. Розглянуто особливості функціонування глибинних насосів різних типів, зокрема відцентрових і гвинтових, з урахуванням їх конструктивних характеристик, гідравлічних режимів та умов роботи в

свердловинах і насосних станціях. Детально проаналізовано основні показники якості глибинних насосів, серед яких подача, напір, ККД, енергоспоживання, надійність, стабільність роботи у перехідних режимах та чутливість до зовнішніх збурень.

Здійснено огляд сучасних підходів до підвищення якості глибинних насосів, включно з методами оптимізації гідравлічних характеристик, зменшення енергетичних втрат, удосконалення конструкції робочих органів та впровадження енергоощадних режимів роботи. Проаналізовано нормативно-технічне забезпечення, що регламентує вимоги до ефективності, надійності та експлуатаційних показників насосного обладнання, а також окреслено його вплив на сучасні тенденції розвитку насособудування.

Особливу увагу приділено системам керування глибинними насосами, які визначають стабільність їх роботи в різних режимах. Наведено аналіз традиційних та сучасних методів керування, включаючи частотне регулювання, адаптивні та енергоефективні алгоритми, здатні забезпечити оптимізацію режимів роботи й підвищення загальної ефективності обладнання.

На основі проведених досліджень сформульовано висновки щодо актуальних проблем, способів їх вирішення та напрямів подальшого вдосконалення глибинних насосів і систем їх керування.

У другому розділі представлено системне дослідження та математичне моделювання роботи глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів із метою кількісної оцінки показників їх ефективності, надійності та енергетичних характеристик у різних режимах експлуатації. Розділ охоплює як теоретичні підходи до побудови моделей глибинних насосів, так і практичні аспекти застосування цих моделей у системах автоматичного керування, що забезпечують підвищення якості функціонування насосного обладнання.

Сформульовано основні задачі математичного моделювання глибинних насосів, серед яких визначення їх перехідних характеристик, прогнозування режимів роботи, аналіз впливу збурень та оцінювання енергетичних втрат у процесі перекачування рідини. Встановлено ключові вимоги до математичних моделей, які повинні забезпечувати відповідність реальним фізичним процесам, враховувати гідравлічні та механічні властивості насосного обладнання, бути простими в розрахунках та придатними для використання у системах керування. Окремо окреслено вимоги до моделей для гвинтових і відцентрових насосів, що зумовлено їх принциповими конструктивними та гідродинамічними відмінностями. Розглянуто специфічні вимоги до моделювання в контурі керування, зокрема необхідність урахування динамічних затримок та нелінійностей.

Наведено методи опису динаміки насосів на основі рівнянь другого порядку, напірно-витратних характеристик, а також залежностей ККД від параметрів робочої точки. Моделі враховують зміну швидкості обертання, вплив частотного регулювання, а також поведінку насоса у перехідних режимах. Для гвинтових насосів розглянуто математичні залежності, які описують об'ємний принцип їх роботи, утворення та руйнування камер перекачування, вплив тиску та в'язкості рідини на продуктивність і енергоспоживання. Моделі адаптовано до випадків роботи у свердловинних умовах, де важливими є нерівномірність навантаження та вплив складу видобувної рідини.

Наведено математичні моделі показників якості глибинних насосів, включаючи подачу, напір, частоту обертання, коефіцієнт корисної дії, стабільність режимів і динамічну точність. Запропоновано аналітичні залежності для оцінювання якості в сталих і перехідних режимах, а також методи розрахунку інтегральних критеріїв якості.

Проведено математичне моделювання втрат енергії, де розглянуто гідравлічні, механічні, об'ємні та швидкісні втрати. Визначено підходи до

їх мінімізації через оптимізацію режимів роботи, керування частотою обертання та адаптацію системи керування до змін параметрів перекачуваного середовища.

В *третьому розділі* розглянуто комплекс проблем та рішень, пов'язаних із підвищенням показників якості глибинних насосів шляхом удосконалення систем їх автоматичного керування. Розділ присвячено формуванню науково обґрунтованих підходів до оптимізації режимів роботи глибинних насосів, їх моделювання в контурах керування, а також синтезу енергоефективних систем керування, здатних забезпечити зменшення енергетичних втрат, підвищення надійності та покращення експлуатаційних характеристик насосного обладнання.

Постановлено задачу оптимізації режимів роботи глибинних насосів. Сформульовано критерії оптимальності, які охоплюють енергоефективність, стабільність роботи, мінімізацію динамічних відхилень та забезпечення роботи в зоні максимально можливого коефіцієнта корисної дії. Окреслено обмеження, пов'язані з конструктивними особливостями відцентрових і гвинтових насосів, а також із впливом зовнішніх збурювальних факторів та особливостей експлуатаційного середовища.

Наведено порівняльний аналіз різних варіантів структур керування з позиції ефективності, гнучкості та стабільності.

Побудовано лінеаризовані векторні моделі системи керування глибинними насосами, що дозволяє застосовувати сучасні методи оптимального та адаптивного керування.

Запропоновано підходи до мінімізації втрат енергії в глибинних насосах шляхом адаптивного коригування режимів роботи, оптимізації частоти обертання.

Виконано структурний синтез енергоефективної системи керування глибинним насосом. Розроблена структура враховує вимоги до стабільності, енергоефективності та швидкодії, а також забезпечує можливість адаптації

параметрів регуляторів до змін зовнішніх умов та технічного стану обладнання.

У *четвертому розділі* представлено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на оцінювання реальних робочих характеристик глибинних насосів відцентрового та гвинтового типів, а також на визначення резервів підвищення їх якості шляхом удосконалення режимів роботи та параметрів систем керування. Розділ охоплює аналіз експериментальних даних, ідентифікацію математичних моделей, оптимізацію регуляторів і режимів роботи, а також розрахунок комплексних показників якості та оцінку потенціалу їх покращення.

Наведено експериментальні характеристики насосів різних типів, що отримані у реальних умовах експлуатації. Представлено типові напірно-витратні характеристики, залежності коефіцієнта корисної дії від подачі, а також графіки енергоспоживання в різних режимах роботи. Описані закономірності дозволяють визначити фактичні енергетичні втрати, нестабільності у роботі насосів та діапазони, у яких їх ефективність мінімальна або, навпаки, максимальна.

Визначено кореляційні зв'язки між параметрами, що дозволяє формувати аналітичні залежності для подальшого структурно-параметричного синтезу. Отримано регресійні моделі є базою для оцінювання впливу технологічних параметрів на показники якості насосів.

Виконано ідентифікацію динамічних моделей глибинних насосів за експериментальними характеристиками. Представлено підхід, що передбачає визначення параметрів моделей другого порядку або більш складних структур на основі експериментальних сигналів. Ідентифіковані моделі забезпечують можливість оцінювання динамічної точності системи, реакції на збурення, часу перехідних процесів та амплітуди коливань.

Показано, що налаштування ПД-регуляторів відповідно до інтегральних критеріїв якості або енергетичних показників, дозволяє

зменшити час перехідного процесу, покращити стабільність роботи та знизити енергетичні втрати.

Наведено результати оптимізації режимів роботи глибинних насосів, зокрема вибір робочої точки, частоти обертання, параметрів навантаження. Показано, що перехід до частотно-регульованого керування забезпечує значне зниження енерговитрат за умови правильного визначення оптимального режиму.

Наведено методи інтегрального оцінювання роботи насосів з урахуванням ККД, стабільності, динамічних властивостей та енергоспоживання. Сформульовано підхід до визначення резервів підвищення комплексного показника якості, що ґрунтується на збільшенні ККД, зменшенні втрат енергії та удосконаленні роботи систем керування. Виконано порівняння роботи насосів у звичайних та оптимізованих режимах, наведено кількісні оцінки можливого підвищення ефективності.

Розроблено проєкт технічних умов «Забезпечення високих показників якості роботи глибинними насосами при їх автоматизованому керуванні».

Результати досліджень можуть бути впроваджені в автоматизованих системах керування глибинними насосами відцентрового та гвинтового типів.

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 викладено у 9 наукових працях, серед них: 5 статей у фахових виданнях України, 4 тези доповідей на міжнародних конференціях.

Ключові слова: показники якості, оптимізація, енергозбереження, техніко-економічні показники, глибинні насоси, система керування, насосна установка, економічність, нормативне забезпечення, кваліметричні методи.