

АНОТАЦІЯ

Насиров Сергій Володимирович. Удосконалення методів підвищення якості газоперекачувальних станцій шляхом синтезу енергоефективних систем керування – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка. Освітня програма «Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення» (галузь знань: 15 – Автоматизація та приладобудування). Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2025.

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 розвинуто підхід до розв’язання актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у підвищенні показників якості роботи компресорних установок газоперекачувальних станцій шляхом забезпечення оптимальних та енергоефективних режимів їх функціонування як у сталих, так і в перехідних процесах за нормальних умов експлуатації. Досягнення поставленої мети дозволяє істотно поліпшити ключові характеристики компресорного обладнання – передусім економічність та енергоефективність – завдяки зменшенню енергетичних втрат у глибинних насосах і підвищенню рівня енерго- та ресурсозбереження газоперекачувальних станцій.

Основним вектором досліджень є удосконалення методів підвищення якості роботи газоперекачувальних станцій шляхом впровадження

енергоєфективних принципів керування, зокрема розроблення наукових методів і технічних рішень, що можуть становити основу для формування енергоощадних алгоритмів керування, спрямованих на суттєве підвищення енергоєфективності при транспортуванні газу.

Мета дослідження. Полягає в підвищенні показників якості компресорних установок газоперекачувальних станцій шляхом удосконалення систем керування, які забезпечують мінімальні втрати енергії в компресорних станціях в нормальних режимах експлуатації.

Об'єкт дослідження: процеси підвищення показників якості роботи компресорних установок газоперекачувальних станцій в нормальних режимах експлуатації.

Предмет дослідження: наукові методи, нормативне забезпечення і технічні засоби підвищення показників якості роботи компресорних установок газоперекачувальних станцій.

Методи дослідження. Методи, які використовуються в дослідженні: аналіз та синтез математичних моделей газоперекачувальних агрегатів (використання динамічних моделей другого порядку, моделей газотурбінного приводу, а також лінеаризованих моделей у робочій точці; методи системного аналізу та ідентифікації параметрів (дослідження взаємодії газодинамічних, механічних і теплотехнічних підсистем компресорної установки, оцінка впливу зношування, зміни геометрії проточної частини та режимних параметрів на якість регулювання; оптимізаційні методи синтезу регуляторів (мінімізація інтегральних критеріїв якості, енергетично орієнтована оптимізація за питомими енерговитратами та паливною економічністю приводу, градієнтні методи для пошуку оптимальних параметрів ПД- та адаптивних регуляторів); моделювання перехідних процесів у середовищах MATLAB/Simulink (імітаційне моделювання стійкості, динаміки та енерговитрат для різних типів регуляторів і конфігурацій систем керування; методи

експериментальної верифікації (порівняння результатів моделювання з експлуатаційними даними газоперекачувальних станцій (змінami тиску, витрати, частоти обертання, паливних витрат), оцінка точності моделей і коректності запропонованого підходу)

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні наукові результати досліджень складають:

1. Удосконалено комплексний критерій якості роботи газоперекачувальних станцій на основі інтеграції енергетичних і технічних показників якості компресорного агрегату та динамічних інтегральних показників якості системи керування, зі змінними ваговими коефіцієнтами, що дає можливість використовувати його як основний критерій оптимальності в різних умовах експлуатації.

2. Набули подальшого розвитку методи підвищення якості роботи газо-перекачувальних станцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування та синтезу ефективних регуляторів, які працюють за критерієм максимальної енергоефективності, що дає можливість забезпечити високі показники якості в процесі експлуатації.

3. Набули подальшого розвитку математичні моделі систем автоматичного керування компресорними установками газоперекачувальних станцій в нормальних режимах експлуатації шляхом інтеграції моделей компресору з енергетичними характеристиками приводу та реальними нелінійностями (насичення приводу, обмеження витрати палива), що підвищує точність визначення та аналізу показники якості роботи станцій.

4. Вперше розроблено структуру системи автоматичного керування компресорними установками газоперекачувальних станцій, яка має еталонну математичну модель та працює за критерієм максимальної енергоефективності, що дозволяє в режимі реального часу підлаштовувати свої параметри при зміні внутрішніх параметрів компресорів та параметрів

навколишнього середовища і за рахунок цього забезпечувати високі показники якості.

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* здійснено комплексний аналіз показників якості газотранспортної системи України та факторів, що формують ефективність її роботи у сучасних умовах функціонування енергетичної інфраструктури. Наведено систематизований огляд технічного стану, пропускну здатності та експлуатаційного потенціалу газотранспортної системи, що включає магістральні газопроводи, компресорні станції та підземні газосховища. Особливу увагу приділено аналізу ролі газоперекачувальних станцій (ГПС) у забезпеченні стабільності транспортування природного газу та підтриманні необхідних параметрів тиску та витрати в магістральній мережі.

Розглянуто історичні особливості її формування, сучасні тенденції модернізації, технічні характеристики магістральних газопроводів, а також оцінено основні виклики, пов'язані зі зміною газових потоків, зростанням вимог до енергоефективності та забезпеченням надійності поставок. Визначено стратегічне значення ГТС не лише в контексті внутрішнього газопостачання, а й у рамках транзитного потенціалу держави.

Наведено принципи роботи газоперекачувальних агрегатів, що становлять основу функціонування газоперекачувальних станцій. Детально розглянуто конструкцію і функції газотурбінних, електропривідних та поршневих компресорних агрегатів, механізми стискання газу, перетворення енергії та взаємодію основних вузлів у складі ГПС.

Представлено особливості регулювання робочих параметрів, а також ключові технічні обмеження, що впливають на якість роботи компресорних установок.

Проведено аналіз впливу компресорних установок на показники якості газоперекачувальних станцій та визначенню оптимальних режимних параметрів газоперекачувальних агрегатів. Розглянуто взаємозв'язки між продуктивністю компресора, його енергоефективністю, стабільністю перехідних процесів та рівнем втрат енергії в технологічному циклі транспортування газу. Проаналізовано критерії, за якими визначається оптимальна робоча точка ГПА, зокрема напір, витрата, ККД, питомі енерговитрати та віддаленість від помпажної межі.

Проведено структурний аналіз показників якості газоперекачувальних станцій. До системи показників віднесено енергетичні, технічні, експлуатаційні, екологічні та динамічні критерії оцінки роботи ГПС. Окреслено взаємозалежності між окремими групами показників та їх вплив на загальну ефективність системи. Наведено характеристику таких ключових параметрів, як енергоефективність агрегатів, стійкість до збурень, стабільність робочих режимів, рівень автоматизації та надійність обладнання.

Проведено аналіз можливих шляхів підвищення показників якості газоперекачувальних станцій. Розглянуто інженерні, технологічні та організаційні підходи до підвищення ККД компресорів, зниження енергетичних втрат, впровадження систем адаптивного та оптимального керування, модернізації обладнання, а також переходу до енергозберігаючих технологій. Окрему увагу приділено ролі частотно-регульованих приводів, інтелектуальних систем керування та методів прогнозної діагностики.

Виконано аналіз нормативно-технічних документів, що регламентують вимоги до показників якості газоперекачувальних станцій.

Узагальнено основні положення українських та міжнародних стандартів, технічних регламентів і правил експлуатації, що визначають вимоги до технологічної безпеки, енергоефективності, екологічної відповідності та надійності роботи газоперекачувальних агрегатів. Показано значення нормативної бази для формування нових вимог до систем керування та модернізації існуючої інфраструктури.

У *другому розділі* проведено теоретичні дослідження, спрямовані на формування математичного апарату для моделювання роботи газоперекачувальних агрегатів та систем їх автоматичного керування. Розділ охоплює побудову моделей сталих і несталих режимів роботи компресорних установок, формування інтегральних показників якості, а також створення узагальненої динамічної моделі, що дозволяє проводити аналіз стійкості, адаптивності та енергоефективності системи в широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Сформовано математичну модель показників якості компресорних установок, яка враховує основні технічні характеристики газоперекачувальних агрегатів: подачу, напір, ККД, питомі енерговитрати, стабільність режимів. Модель дозволяє кількісно оцінювати енергетичну ефективність ГПА, а також визначати вплив зовнішніх та внутрішніх збурень на якість функціонування компресорних установок. У межах цієї моделі сформовано узагальнений комплексний критерій якості, який інтегрує енергетичні, технічні та динамічні показники.

Виконано математичне моделювання сталих режимів роботи газоперекачувальних агрегатів. Здійснено опис компресорної характеристики у вигляді залежностей напору від витрати, умов навантаження та частоти обертання приводу. Визначено рівняння балансу потужності та технологічні обмеження на роботу ГПА у сталих режимах. Показано, що коректне моделювання сталих режимів є необхідною основою для оптимізації робочої точки агрегату та мінімізації енергетичних втрат у

газотранспортному процесі.

Виконано математичне моделювання системи керування газоперекачувальними агрегатами. Наведено структуру класичної системи автоматичного керування, що включає регулятор тиску або витрати, виконавчі механізми, датчики та зворотні зв'язки. Представлено моделі ПД-регуляторів та адаптивних алгоритмів, які враховують нелінійності компресорних характеристик, інерційність газодинамічних процесів та вплив затримок у каналах керування. Розглянуто методи оптимізації параметрів регулятора відповідно до інтегральних критеріїв якості, що дозволяє забезпечити швидкодію, точність та стійкість системи керування.

Сформовано загальну динамічну модель газоперекачувального агрегату, яка поєднує моделі компресора, приводу, газодинамічних процесів у повітроводах, а також елементи системи автоматичного керування. Модель представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описують динамічні властивості агрегату у перехідних режимах. Такий підхід дозволяє досліджувати реакцію ГПА на різні типи збурень, оцінювати стійкість роботи, проводити лінеаризацію в робочих точках та застосовувати сучасні методи оптимального керування.

Виконано математичне моделювання нестійкості роботи компресора. На основі цієї моделі визначено умови виникнення нестійкості та методи її попередження шляхом оптимізації регулювання та переналаштування системи керування.

В *третьому розділі* представлено комплекс науково-обґрунтованих підходів до синтезу ефективних систем керування, спрямованих на підвищення показників якості газоперекачувальних станцій. Розділ охоплює аналіз функціональних задач систем регулювання, моделювання енергетичних процесів у компресорних агрегатах, розроблення лінеаризованих моделей для синтезу регуляторів, а також оптимізацію параметрів керування з метою забезпечення мінімізації енергетичних втрат

і покращення загальної ефективності роботи ГПС.

Виконано аналіз функцій та задач систем керування газоперекачувальними станціями. Розглянуто структуру контурів керування, роль основних вузлів систем автоматизації у підтриманні технологічних параметрів, а також взаємозв'язок між якістю регулювання та енергетичною ефективністю компресорних установок.

Сформульовано загальний принцип підвищення показників якості газоперекачувальних станцій шляхом застосування енергоефективного керування. Визначено основні критерії ефективності, серед яких мінімізація енерговитрат, оптимізація робочої точки за напірно-витратною характеристикою, зменшення амплітуди коливань тиску, підвищення ККД та забезпечення стійкості роботи агрегату в усіх режимах. Показано, що реалізація принципу енергозбереження можлива за умов коректної побудови моделі компресора, адаптивного налаштування регуляторів і впровадження оптимізаційних алгоритмів керування.

Виконано моделювання втрат енергії у компресорі. Розглянуто загальний енергетичний баланс як на одиницю маси газу, так і у формі потужнісного представлення. Визначено основні види втрат – гідравлічні, механічні, термодинамічні, об'ємні та швидкісні. Окремо представлено ексергійний підхід до аналізу втрат, який дозволяє розглядати їх з точки зору необоротності процесів та ефективності перетворення енергії. Наведено методи чисельної оцінки втрат, що включають використання експериментальних характеристик компресорів, моделі робочого циклу та залежностей, отриманих шляхом регресійного аналізу.

Сформовано функціонал, який дозволяє кількісно оцінювати втрати енергії та визначати оптимальні керуючі дії, що забезпечують їх зниження. Застосовано методи варіаційної оптимізації, оптимізацію за інтегральними критеріями якості.

Розроблено лінеаризовану математичну модель системи керування

компресором, призначену для синтезу оптимальних регуляторів. Проведено лінеаризацію нелінійної моделі ГПА у робочій точці з урахуванням напірно-витратних характеристик, динаміки приводу та газодинамічних процесів у нагнітальному тракті. Представлено матричне описання системи у формі станів, що дозволяє застосовувати методи сучасної теорії керування для проектування оптимальних регуляторів.

Наведено алгоритми оптимізації параметрів регулятора. Використано критерії швидкодії, мінімального перерегулювання, енергетичної ефективності та стійкості системи. Описано методи автоматичного налаштування ПД-регуляторів, адаптивних алгоритмів, а також методи чисельної оптимізації параметрів регулювання на основі локальних і глобальних оптимізаційних процедур.

Виконано синтез структури енергозберігаючої системи керування компресором. Розроблена структура інтегрує результати моделювання та оптимізації, забезпечує побудову системи регулювання, яка мінімізує енерговитрати, забезпечує стійку роботу у всіх режимах і зменшує навантаження на компресорний агрегат. Показано, що така система здатна адаптуватися до зміни характеристик компресора в процесі експлуатації та підтримувати його роботу в зоні максимального ККД.

Четвертий розділ присвячено аналізу результатів експериментальних досліджень роботи газоперекачувальних станцій та систем їх керування з метою визначення практичних резервів підвищення показників якості, в тому числі, енергоефективності. У розділі наведено результати аналізу експериментальних даних, оптимізації регуляторів, синтезу систем керування компресорними установками, а також розрахунок комплексних показників якості, що дозволяють кількісно оцінити ефективність впроваджених рішень.

Проведено аналіз впливу робочої точки компресорного агрегату, частоти обертання приводу, тиску на вході і виході, а також структури

перехідних процесів на енергетичні та технічні показники станції. Показано, що коректне визначення оптимальних режимів забезпечує мінімізацію втрат енергії, стабільність роботи та збільшення пропускної здатності газотранспортної системи.

Виконано синтез регулятора системи керування. Показано методику налаштування параметрів ПІД-регулятора відповідно до інтегральних критеріїв якості, що дозволяє підвищити точність регулювання, зменшити коливання тиску та прискорити перехідні процеси. Проаналізовано вплив зміни параметрів регулятора на стійкість системи, швидкодію та енергоефективність роботи агрегату.

Виконано синтез системи керування компресорною установкою з електроприводом. Розглянуто структуру системи автоматичного керування із застосуванням частотного перетворювача, що забезпечує плавне регулювання частоти обертання електродвигуна, адаптацію до зміни навантаження та мінімізацію втрат енергії. Визначено оптимальні принципи побудови контурів керування, зворотних зв'язків і фільтрації сигналів для забезпечення стабільної роботи компресора в усіх режимах.

Виявлено резерви енергозбереження при частотному керуванні електроприводом. Наведено аналіз залежності споживаної потужності від частоти обертання, що дозволяє встановити значні резерви зниження енерговитрат при роботі в часткових режимах. Показано, що застосування інтелектуальних алгоритмів регулювання дозволяє додатково зменшити споживання електроенергії та підвищити ресурс обладнання завдяки зниженню механічних навантажень.

Проведено розрахунок показників якості компресорної станції, що визначаються режимами її роботи, зокрема продуктивності, стабільності тиску, пропускної здатності, питомих енерговитрат, втрат потужності у приводі. Здійснено порівняння роботи станції в неоптимальних та оптимізованих режимах, що дозволяє оцінити реальний ефект від

удосконалення системи керування.

Проведено розрахунок загального комплексного показника якості, що інтегрує динамічні, енергетичні, технічні та експлуатаційні параметри роботи компресорної станції. Сформовано методику визначення цього показника на основі нормалізації, вагових коефіцієнтів та узагальнених критеріїв якості. Отримані результати дозволяють об'єктивно оцінити рівень ефективності роботи станції після впровадження оптимізаційних заходів та визначити додаткові резерви енергозбереження.

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

Результати досліджень можуть бути впровадженні в автоматизованих системах керування компресорними установками газоперекачувальних станцій.

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 13 наукових працях, у тому числі у 4 статтях у наукових фахових виданнях, апробаційного характеру опубліковано 9 тези доповідей в збірниках конференцій.

Ключові слова: показники якості, енергоефективність, магістральні газопроводи, компресорні станції, оптимальне управління, економічність, техніко-економічні показники, енергозбереження, оптимізація, нормативне забезпечення, кваліметричні методи