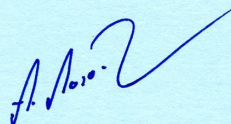


681.51(043)  
Л 14

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Лагойда Андрій Іванович



УДК 681.513.52:622.691.4

**АНТИПОМПАЖНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ  
АГРЕГАТОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

Спеціальність 05.13.07 - автоматизація процесів керування

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ - 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Семенцов Георгій Никифорович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
завідувач кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Рудакова Ганна Володимирівна**,  
Херсонський національний технічний  
університет,  
завідувач кафедри технічної кібернетики

кандидат технічних наук  
**Филипчук Леонід Вікторович**,  
Національний університет водного господарства  
та природокористування,  
доцент кафедри автоматизації, електротехнічних  
та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Захист відбудеться «08» серпня 2017 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий «05» травня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03,  
кандидат технічних наук, доцент

О.Б. Барна



## ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Тема.** Створення швидкодіючих автоматичних систем антипомпажного регулювання (АПР) відцентрових нагнітачів (ВН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) дотискувальних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ) є однією з ключових проблем автоматизації газотранспортної системи (ГТС) України, парк ГПА якої налічує 692 одиниці (438 - з газотурбінним приводом, 158 - з електроприводом, 96 - газомотокомпресорні).

До складу ГТС входять також 13 ПСГ з загальною облаштованою місткістю 34,5 млрд. м<sup>3</sup>, які призначені для зняття сезонних пікових навантажень у споживанні природного газу і є важливим та невід'ємним технологічним підрозділом ГТС.

Для забезпечення високої надійності функціонування ДКС ПСГ необхідно забезпечити стійку роботу системи «ВН ГПА - трубопровід» (ВН ГПА - ТП) кожного ГПА при виникненні таких явищ, як обертальний зрив і помпаж. Проте існуючі методи й системи АПР, що побудовані на основі використання газодинамічних характеристик ВН ГПА, або динамічних процесів в них, мають недостатню швидкодію і не завжди забезпечують надійну роботу ГПА. Сучасні тенденції переходу до ресурсощадних екологічних технологій при транспортуванні природного газу і закачуванні його в ПСГ, як правило, пов'язані із створенням функціонально складних систем автоматичного керування, ефективність роботи яких спирається на жорстку стабілізацію таких режимних параметрів, як тиск, продуктивність, ступінь підвищення тиску газу та ін. Згідно з цим підходом суттєво зростають вимоги до якості систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами (САК ГПА), до підсистеми АПР і рівня використання в них обчислювального інтелекту.

Розвиток систем, що функціонують в умовах апріорної та поточної невизначеності під впливом зовнішніх збурень, обумовлює нові вимоги до більш адекватного опису математичними моделями (ММ) систем «ВН ГПА - ТП», розроблення регуляторів з більшими функціональними можливостями, ніж типові ПІД - регулятори, і необхідність врахування факторів апріорної та поточної невизначеності в моделі об'єкта керування (ОК). Ефективне вирішення даної науково-прикладної задачі може бути здійснено шляхом комплексного використання класичних та динамічних методів АПР, що ґрунтуються на виявленні обертального зриву у проточній частині нагнітача, застосуванні швидкодіючих регуляторів з тюнером, які враховують зміни в часі статичних газодинамічних і динамічних характеристик ОК, а також швидкодіючих антипомпажних клапанів (АПК).

Тому задача удосконалення підсистеми АПР САК ГПА є актуальною, а її вирішення дозволить підвищити точність і швидкодію АПР, ступінь захисту ГПА від помпажу, надійність роботи ДКС ПСГ, розширити можливі межі експлуатації ВН.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у відповідності з основним науковим напрямком кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та відповідно до пріоритетних напрямків науково-дослідних робіт Івано-Франківського національ-

ного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) згідно координаційних планів Міністерства освіти і науки України, зокрема, в рамках наукових досліджень за держбюджетними темами «Автоматизоване управління технологічними процесами буріння, видобування, транспортування, зберігання і переробки нафти і газу» (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 04.10.04р., пр. №8) та «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР №01110005890). В межах зазначених тем здобувач був безпосередньо виконавцем розділів робіт стосовно удосконалення та розробки нових методичних підходів, ММ, встановлення нових зв'язків щодо автоматичного АПР ВН ГПА.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка та удосконалення ММ та методів для підвищення швидкодії підсистем АПР ВН ГПА, що функціонують в умовах апріорної та поточної невизначеності за наявності різного типу завод, та подальшого використання їх для пошуку раціональних параметрів і структур регуляторів, що забезпечують підвищення ефективності АПР. Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням наступних основних задач:

- комплексний аналіз та узагальнення існуючих методів та засобів, призначених для синтезу підсистем автоматичного АПР ГПА, визначення основних напрямків їх розвитку й удосконалення;

- розробка динамічної ММ явища помпажу в ВН ГПА з врахуванням перепуску газу через АПК;

- розробка узагальненої статичної ММ ВН ГПА Ц-16 як ОК для сукупності газодинамічних характеристик;

- подальший розвиток і дослідження методу структурно-параметричного синтезу багатопараметричних регуляторів, регуляторів, які використовуватимуть оператор обернення, та фази-регуляторів;

- розробка імітаційної моделі ВН ГПА з урахуванням АПК та проведення моделювання розроблених методів і моделей, здійснення порівняльного аналізу отриманих результатів.

*Об'єктом дослідження* є процеси функціонування підсистем автоматичного АПР ВН ГПА ДКС, що відбуваються за умов невизначеності структури і параметрів ОК.

*Предмет дослідження* складають методи забезпечення високих показників швидкодії автоматичного АПР в системі «ВН ГПА - ТП» на засадах обчислювального інтелекту.

*Методи дослідження:* систематизація існуючих підходів і методів автоматичного АПР для обґрунтування актуальності, мети і задач дослідження; фундаментальні положення теорії автоматичного керування, методи простору станів, функцій передач для синтезу структури параметричної оптимізації регуляторів, ефективних законів керування підсистеми АПР ВН ГПА, а також розробки рекомендацій щодо підвищення їх швидкодії; методи імітаційного моделювання використані з метою ефективного дослідження законів керування, що підвищило вірогідність отриманих теоретичних результатів; теорія нечітких множин застосована для синтезу моделі регуляторів на засадах Fuzzy Logic; комп'ютерні

інформаційні технології - для реалізації розроблених регуляторів з метою підвищення швидкодії системи автоматичного АПР.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в розвитку й поглибленні методів оптимального за швидкістю автоматичного АПР ГПА ДКС ПСГ в умовах невизначеності. Новими науковими результатами досліджень є наступні положення:

вперше:

- розроблено динамічну ММ явища помпажу в ВН ГПА з врахуванням перепуску газу через АПК, яка дозволяє моделювати процес компримування газу у системі «ВН ГПА - ТП» у зривній області робочих режимів;

- розроблено узагальнену статичну ММ ВН ГПА Ц-16 як ОК для сукупності газодинамічних характеристик, яка створює передумови для розроблення імітаційної моделі ВН;

- на основі рівняння динаміки нагнітача та рівняння газодинамічної характеристики розроблено імітаційну модель ВН ГПА з урахуванням АПК, що дало змогу досліджувати методи і моделі та здійснювати порівняльний аналіз;

отримав подальший розвиток:

- метод синтезу законів керування в системі АПР, а саме: на основі загальних методів автоматичного керування та інтелектуальних технологій керування розроблено метод структурного і параметричного синтезу ефективних багатопараметричних регуляторів та регуляторів, що, на відміну від відомих, ґрунтуються на використанні оператора обернення по відношенню до ММ ОК або адекватної йому моделі і враховують при параметричній оптимізації регулятора суттєву нелінійність газодинамічної характеристики ВН. Це дає змогу визначати реальні оптимальні параметри регуляторів в системі АПР;

- метод вибору оптимальної за швидкістю структури фазі-регуляторів, а саме: для синтезу фазі-регулятора використана ідея дуального керування, яка поєднує ідентифікацію та автоматичне керування в один процес, що значно спрощує процедуру налагодження фазі-регулятора. Розроблений за цим методом фазі-регулятор є інваріантним щодо зміни параметрів системи «ВН ГПА - ТП» в межах визначених робочих діапазонів процесу компримування газу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційної роботи призначені для використання в практичних інженерних розробках підсистем АПР ВН ГПА із високими показниками швидкодії на ДКС ПСГ.

Імітаційна модель, що розроблена в дисертаційній роботі, призначена для розв'язання реальних практичних задач щодо автоматичного АПР, зокрема, проведення імітаційних випробувань розроблених алгоритмів та структур регуляторів.

На основі наукових і практичних результатів роботи створено ряд структур швидкодіючих багатопараметричних та фазі-регуляторів для імітаційних випробувань. Розроблені у роботі методики аналізу і синтезу багатопараметричних регуляторів, закони оптимальних за швидкістю АПР, структури, параметри і методики налагодження регуляторів впроваджені у філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» (акт про впровадження від 11.11.2015р.) та ТзОВ «МІКРОЛЬ» (акт про впровадження від 16.11.2015р.).

Наукові положення, висновки й рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використані у навчальному процесі в ІФНТУНГ на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій при викладанні дисципліни «Автоматизація технологічних процесів нафтової і газової промисловості» для студентів спеціальності 8.05020201 - автоматизоване управління технологічними процесами (акт про впровадження від 9.11.2015р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У роботах, написаних із співавторами, дисертанту належать такі результати: [1] - розроблено імітаційну модель ВН ГПА; [2] - розроблено та проведено моделювання, на основі функції передачі ВН ГПА по каналу «продуктивність відцентрового нагнітача - ступінь підвищення тиску газу», ПІ-фазі-регулятора та ПІД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів; [3] - синтезовано оптимальний за швидкодією алгоритм антипомпажного керування; [5] - визначено оптимальний перехідний процес в підсистемі АПР ГПА; [6] - запропоновані структури та способи налаштування багатопараметричних регуляторів та регуляторів, які ґрунтуються на використанні оператора обернення; [7] - здійснено порівняльний аналіз багатопараметричних регуляторів та регуляторів, які ґрунтуються на використанні оператора обернення; [9] - на основі експериментальних даних визначено функцію передачі ВН ГПА по каналу «продуктивність відцентрового нагнітача - ступінь підвищення тиску газу»; [10] - запропоновано структуру ПІД-регулятора з фазі-блоком (тюнером) автоматичного налаштування коефіцієнтів; [14] - здійснено порівняльний аналіз ПІД-регулятора з багатопараметричним ПІДД2-регулятором та ПІДД2-регулятором, який ґрунтується на використанні оператора обернення.

**Основні положення, що виносяться на захист:** результати досліджень властивостей технологічного процесу компримування природного газу та явища помпажу в ГПА; постановка задачі оптимізації системи автоматичного АПР; комплекс ММ багатопараметричних та фазі-регуляторів для розв'язання підзадач оптимального регулювання; імітаційна модель для дослідження АПР з використанням регулятора, який включений у контур зворотнього зв'язку системи стабілізації витрати газу через нагнітач.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та одержали позитивну оцінку на: розширеному науковому семінарі кафедри автоматизації технологічних процесів та моніторингу в екології (Івано-Франківськ, 2015); II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ, 2015); XXI Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика 2014» (Київ, 2014); I Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології - 2014» (Київ, 2014); II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Інтелектуальні технології в системному програмуванні» (Хмельницький, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції аспірантів, молодих учених і студентів «Інформаційні

технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2013» (Івано-Франківськ, 2013); 4-їй науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2013).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладені у 16 друкованих працях, з яких 9 входять до переліку наукових фахових видань України (серед них 5 видань, які входять до міжнародних наукометричних баз) та 7 видань розміщені у збірниках праць науково-технічних конференцій, з яких у Міжнародних - 3 (серед них 2 - без співавторів), у Всеукраїнських - 4 (серед них 3 - без співавторів).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Повний обсяг дисертації становить 161 сторінку: обсяг основного тексту - 134 сторінки, 80 рисунків, 20 таблиць; список використаних джерел, що включає 137 найменувань та займає 15 сторінок; 5 додатків на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику роботи, яка підкреслює її актуальність, відповідність державним науковим програмам, планам, темам, наукову новизну, апробацію основних положень роботи та практичне значення отриманих результатів.

**Перший розділ** охоплює питання аналізу існуючих підходів до проблеми автоматичного АПР ВН ГПА за умов невизначеності та постановку задачі дослідження. Наведено характеристику ОК, детально розглянуті різні методи АПР, що викладені в роботах таких вітчизняних і іноземних вчених, як: М.В. Беккер, В.Ю. Бобков, Ю.С. Бляут, С.Г. Гіренко, В.П. Герасименко, М.О. Петеш, Ю.М. Спіченков, А.Ф. Репета, О.В. Сукач, Т.Е. Крутіков, В.М. Гуріненко, Р.А. Ізмайлов, В.В. Казакевич, Л.Г. Волянська, М.В. Цебенко, Ф.К. Moor, E.M. Greitzer, I.R. Veher, T. Dawner, E.O. King, H. Pearson та ін.

Розглянуто і проаналізовано сутність явища помпажу та автоматичного АПР ВН ГПА; проаналізовано сучасний стан, тенденції та перспективи підвищення швидкодії і точності системи АПР. Встановлено, що в сучасних умовах впровадження нових автоматичних систем керування технологічними процесами компримування газу, зокрема АПР, їх вдосконалення та розширення функціональних можливостей є важливою науково-практичною задачею.

З урахуванням особливостей ОК для вирішення задач АПР обрано об'єднання обох методів - класичного та динамічного - в єдину потужну універсальну систему, що ґрунтується на використанні багатопараметричних та фазі-регуляторів, які є суперкомпонентами системи АПР і визначають якість вирішення поставленої задачі. Це дає змогу без додаткових налаштувань застосовувати такі системи для будь-якого типу ГПА на ДКС і лінійних КС. На основі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дослідження.

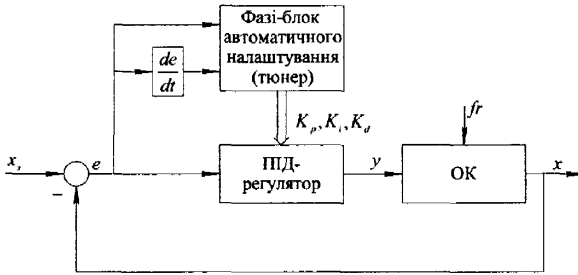


Рис. 1. Структура ПІД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів:  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  - пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти ПІД-регулятора

Мура-Грейтцера розроблено динамічну ММ явища помпажу в ВН ГПА з врахуванням перепуску газу через АПК:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{\Phi}}{d\tau} = \frac{1}{l_c} (\dot{\Psi}_*(\dot{\Phi}) - \dot{\Psi}); \\ \frac{d\dot{\Psi}}{d\tau} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\dot{\Phi} - \dot{\Phi}_\tau - \dot{\Phi}_{\text{АПК}}), \end{cases} \quad (1)$$

де  $\dot{\Phi}$  - відносна масова витрата газу через нагнітач;  $\dot{\Psi}$  - відносна ступінь стиснення газового потоку в нагнітачі;  $\dot{\Phi}_\tau$  - відносна масова витрата в магістраль газогону;  $B$  - параметр Грейтцера;  $\tau = \frac{Ut}{R}$  - відносний час;  $U$  - тангенціальна швидкість в середньому діаметрі;  $R$  - середній радіус нагнітача;  $t$  - реальний час;  $\dot{\Psi}_*(\dot{\Phi})$  - газодинамічна характеристика нагнітача на номінальному режимі;  $\dot{\Phi}_{\text{АПК}}$  - відносна масова витрата газу через АПК;  $l_c = l_b + l_k + l_n$ ;  $l_b$  - довжина труби на всмоктування;  $l_k$  - довжина нагнітача;  $l_n$  - довжина труби на нагнітання.

Розроблено алгоритм моделювання процесу синтезування системи АПР, а також сформульовано вимоги до неї, що дало змогу обґрунтовано підійти до вибору регулятора і методів оптимізації його параметрів.

Розроблено узагальнену статичну ММ  $E = f(Q)$  ВН ГПА Ц-16 як ОК для сукупності газодинамічних характеристик, що дозволило адекватно описувати їх поліномами 5-го порядку з коефіцієнтами кореляції  $r = 0,993 \div 0,997$  і стандартними похибками  $S = 0,005 \div 0,006$ .

Апроксимація здійснена методом комп'ютерного моделювання з використанням програмного пакету Curve Expert 1.3.

Порівняльний аналіз стандартних похибок та коефіцієнтів кореляції, для однієї з характеристик, наведено в таблиці 1.

Розроблено основні принципи побудови і функціонування ПІ-фазі-регулятора та багато-параметричного ПІД-фазі-регулятора в складі підсистеми автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП» і базу правил, що дало змогу синтезувати структуру системи (рис. 1) з тунером, яка забезпечує необхідну швидкість і точність АПР.

У другому розділі з використанням моделі



## Порівняльний аналіз стандартних похибок та коефіцієнтів кореляції

№	Тип моделі	Коефіцієнт кореляції, r	Стандартна похибка, S
1	5th Degree Polynomial Fit	0.994	0.0060
2	6th Degree Polynomial Fit	0.994	0.0061
3	8th Degree Polynomial Fit	0.999	0.0008
4	9th Degree Polynomial Fit	0.999	0.0008
5	10th Degree Polynomial Fit	0.999	0.0006

Встановлено, що ВН ГПА слід розглядати як динамічний об'єкт з нелінійними статичними характеристиками. Особливістю його є те, що ММ його не є стійкою, а є деякою нелінійною функцією продуктивності ВН, яка спричиняє появу явищ обертового зриву і помпажу у процесі компримування газу.

Виходячи з цього, обгрунтовано принципово новий підхід до автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП», який ґрунтується на засадах інтелектуальних технологій керування і враховує нелінійний характер залежності ступеня підвищення тиску газу  $E$  від продуктивності нагнітача  $Q$ , що супроводжується невизначеністю та нерівноважністю, наявністю фазових і структурних переходів.

Теоретично обгрунтовано метод дослідження динамічних властивостей ВН ГПА, що оснований на аналізі взаємозв'язків таких статистичних характеристик параметрів нагнітача, як оцінки кореляційних функцій і функцій спектральної щільності. Це дало змогу визначити функцію передачі ВН Ц-16 (2) та отримати його перехідну (рис. 2) і імпульсну перехідну (рис. 3) характеристики:

$$W(s) = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} = \frac{7,688 \cdot 10^{-4} \cdot s + 0,619}{4,099 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} \cdot s + 1,358} \quad (2)$$

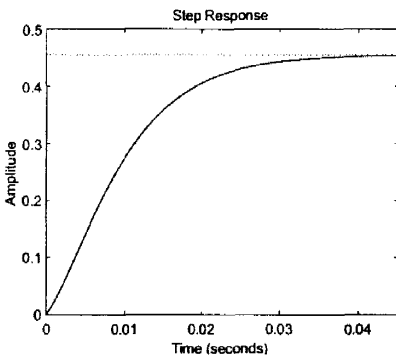


Рис. 2. Перехідна характеристика ВН ГПА як ОК

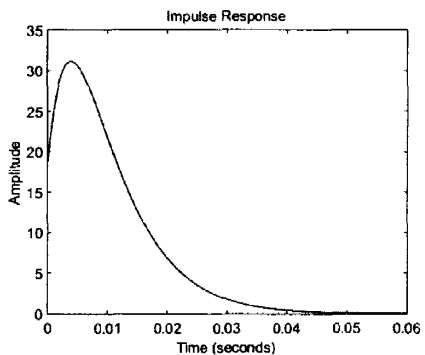


Рис. 3. Імпульсна перехідна характеристика ВН ГПА як ОК

Для синтезу оптимальних за швидкодією регуляторів, що ґрунтуються на засадах Fuzzy Logic, проаналізовано методи представлення стратегії АПР, існуючі алгоритми функціонування та можливі шляхи підвищення швидкодії. Обгрунтовано, що удосконалення системи АПР можливе шляхом синтезу алгоритмів

функціонування багатопараметричних регуляторів на основі апріорної інформації про статичні і динамічні властивості системи «ВН ГПА - ТП» з метою підвищення швидкодії і точності АПР та оптимізації структур обчислювальних алгоритмів з метою виключення проміжних етапів перетворення нечіткої інформації синтезу.

Сформульовано постановку задачі синтезу оптимальної за швидкістю підсистеми автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП», а також синтезу регулятора підсистеми автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП» на основі використання оператора обернення Rev відповідно до функції передачі  $W_{ок}(s)$  ОК (3):

$$W_{Rev}(s) = [W_{ок}(s)]^{-1} = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{b_0 s + b_1} = \frac{4,099 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} \cdot s + 1,358}{7,688 \cdot 10^{-4} \cdot s + 0,619} \quad (3)$$

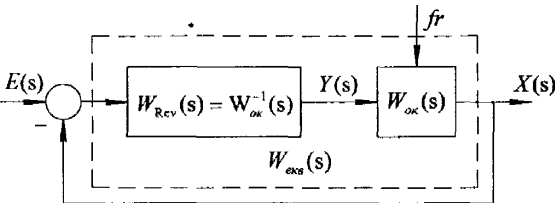


Рис. 4. Еквівалентна функція передачі об'єкта з Rev - регулятором:  $E(s)$  - задане значення;  $W_{ок}^{-1}(s)$  - обернена функція передачі об'єкта керування;  $Y(s)$  - керувальна дія;  $W_{ок}(s)$  - функція передачі об'єкта керування;  $X(s)$  - керована величина, перетворені за Лапласом;  $fr$  - збурення;  $W_{ок}(s)$  - еквівалентна функція передачі

Це дозволило сформулювати структуру системи автоматичного АПР і визначити еквівалентну функцію передачі об'єкта з оберненим регулятором (рис. 4).

Третій розділ присвячено теоретичним дослідженням запропонованого методу автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП».

На основі функції передачі ВН Ц-16 (2) розроблено моделі багатопараметричних регуляторів (рис. 5, 6) і метод синтезу таких регуляторів, що підвищило швидкістю досліджуваної системи.

Встановлено, що якісні показники перехідного процесу в порівнянні з ПІД-регулятором значно покращились (табл. 3).

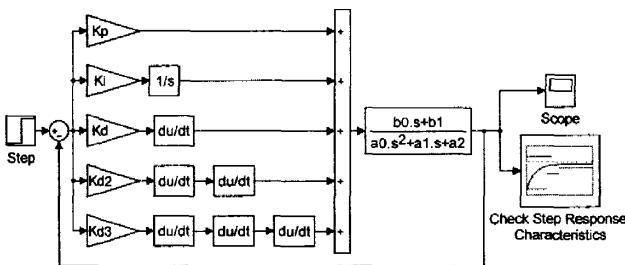


Рис. 5. Структура ПІД2Д3-регулятора в середовищі Matlab

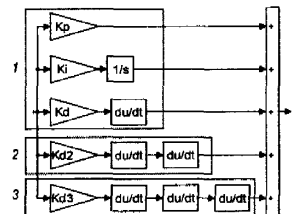


Рис. 6. Структура ПІД(1), ПІД2(1+2), ПІД2Д3 (1+2+3) регуляторів

Таблиця 2

Параметри налаштування регуляторів після оптимізації					
Регулятор	Параметри налаштування				
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K_{d2}$	$K_{d3}$
ПД	29.7958	867.4924	0.0579	-	-
ПДД2	29.7958	830	0.0579	9.7480e-10	-
ПДД2Д3	33.3	950	0.0528	5.9480e-9	3.7480e-22

Таблиця 3

Показники якості перехідних процесів		
Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час, с	перерегулювання
ПД	0.01125	0%
ПДД2	0.01075	0%
ПДД2Д3	0.0087	0%

На основі досліджуваної функції передачі (2) розроблено структури ПДД2-регулятора (рис. 7) та ПДПД-регулятора (рис. 8), функція передачі яких обернена до функції передачі ОК. Якісні показники перехідних процесів наведені в табл. 4 та табл. 5.

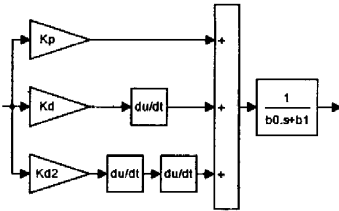


Рис. 7. Структура ПДД2-регулятора

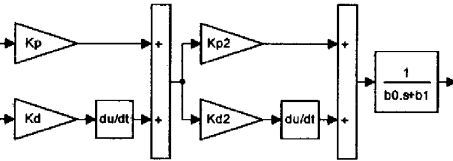


Рис. 8. Структура ПДПД-регулятора

Таблиця 4

### Параметри налаштування регуляторів після оптимізації

Регулятор	Параметри налаштування			
	$K_p$	$K_{p2}$	$K_d$	$K_{d2}$
ПДД2	1.0324e+3	-	0.3311	6.5990e-6
ПДПД	478	250	0.0065	0.0100

Таблиця 5

Показники якості перехідних процесів		
Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час, с	перерегулювання
ПДД2	0.0012	0%
ПДПД	0.0002	0%

Після введення в структуру ПДД2-фазі-регулятора (рис. 9) показники якості перехідного процесу (табл. 6) покращилися в порівнянні з іншими багатопараметричними регуляторами.

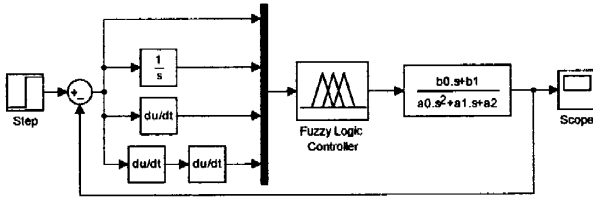


Рис. 9. Структура системи керування з ПІДІ2-фазі-регулятором

Таблиця 6

## Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час, с	перерегулювання
ПІД	0.01125	0%
ПІДІ2	0.01075	0%
ПІДІ2ДЗ	0.0087	0%
ПІДІ2-фазі	0.0085	0%

Здійснено синтез оптимального за швидкодією закону керування ВН ГПА з газотурбінним приводом.

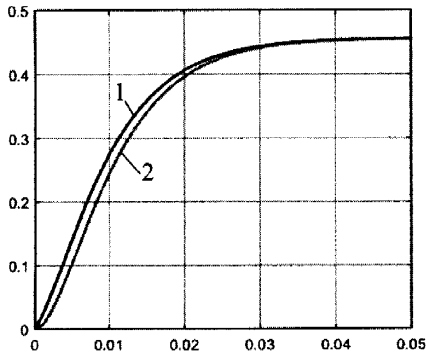


Рис. 10. Перехідні характеристики ВН ГПА як ОК: 1 - з врахуванням складової  $b_0$  в чисельнику; 2 - без врахування складової  $b_0$  в чисельнику

Оцінено вплив складової  $b_0$  в чисельнику (2) на похибку апроксимації перехідної характеристики (рис. 10).

Порівняння перехідних характеристик ВН, довело, що цією складовою можна знехтувати. Якщо скористатися моделлю «вхід-вихід» одномірного ОК, тоді ВН як ОК у загальному вигляді можна описати диференціальним рівнянням:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 E}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dE}{dt} + E = k Q_{av}, \quad (4)$$

де  $T_1 T_2 = 4,099 \cdot 10^{-5}$ ,  $T_1 + T_2 = 1,526 \cdot 10^{-2}$ .

Звідси  $T_1 = 0,0034795$ ,  $T_2 = 0,011781$ .

Знайдено моменти перемикання  $t_1$ ,  $t_2$ , що визначаються функцією оптимального керування:

$$t_i = f_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \bar{E}_0, \bar{E}_n, Q_{max}), \quad (5)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  - корені характеристичного

рівняння  $T_1 T_2 \frac{d^2 E}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dE}{dt} + E = 0$ .

Побудовано графіки залежностей  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_2 = f_2(t_1)$  (рис. 11), точка перетину яких дає момент перемикання  $t_1 = 0,00044$ с,  $t_2 = 0,00081$ с.

Визначена оптимальна перехідна функція (6) підсистеми АПР ГПА з

газотурбінним приводом і побудовано графіки оптимального перехідного процесу (рис. 12) з урахуванням початкових умов  $t=0$ ,  $E=0$ ,  $E'=0$ .

$$E(t) = -309,5 - 0,004938 \cdot (310,197 \cdot (-287,4e^{-84,88t} + 84,88e^{-287,4t}) + 3071,285(e^{-287,4t} - e^{-84,88t})). \quad (6)$$

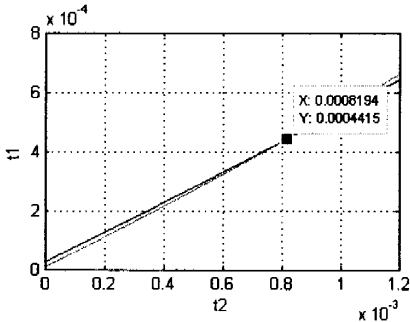


Рис. 11. Графік залежностей  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_1 = f_2(t_2)$

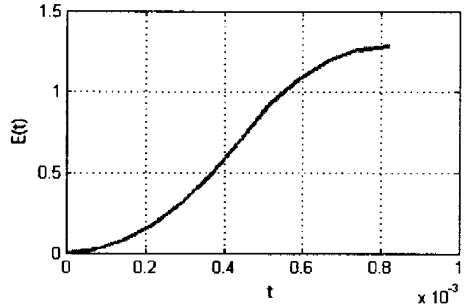


Рис. 12. Оптимальна крива перехідного процесу в підсистемі АІП ГПА з газотурбінним приводом

Отже, запропонована система керування має високу швидкість (тривалість перехідного процесу  $t = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ ).

На основі досліджуваної системи розроблено ПІ-фазі-регулятор, структура якого в середовищі Matlab наведена на рисунку 13.

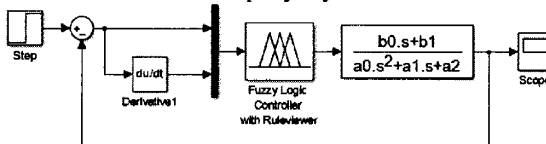


Рис. 13. Структура системи керування з ПІ-фазі-регулятором

Процес налаштування ПІ-фазі-регулятора наведений на рисунках 14 та 15.

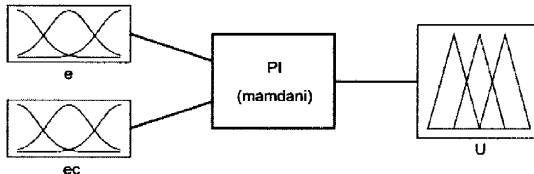


Рис. 14. Структура входів-виходів ПІ-фазі-регулятора

Розроблено ПІД-регулятор з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів. Процес автоматичного налаштування ПІД-регулятора за допомогою фазі-блока починається з пошуку початкових наближених значень коефіцієнтів регулятора  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  (табл. 2).

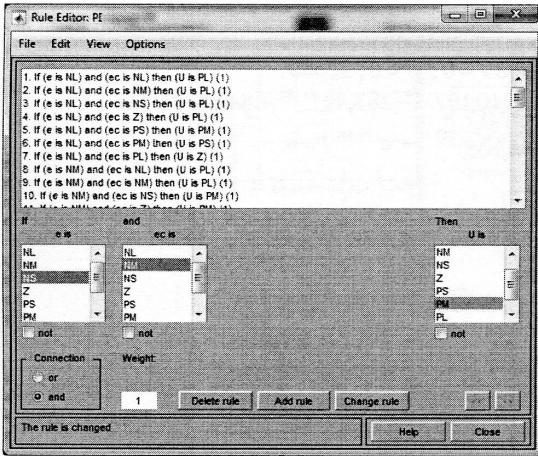


Рис. 15. База правил ПІ-фазі-регулятора

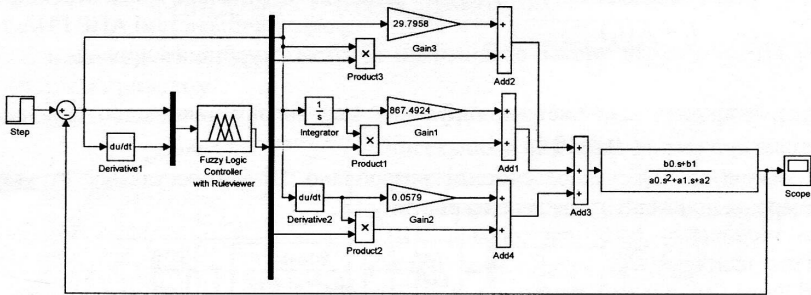


Рис. 16. Структура ПІД-регулятора з фазі-блоком

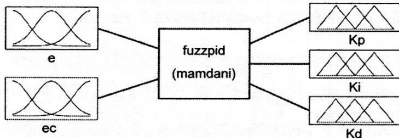


Рис. 17. Структура входів-виходів ПІД-регулятора з фазі-блоком

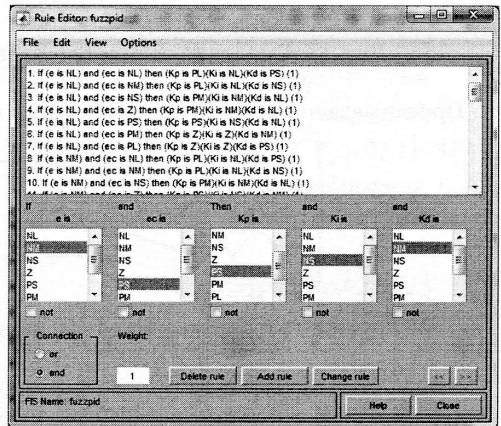


Рис. 18. База правил ПІД-регулятора з фазі-блоком

В процесі налаштування регулятора вибрано діапазони вхідних і вихідних сигналів тюнера (блока автоматичного налаштування), форму функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виведення, метод дефазифікації і діапазони масштабних множників, необхідних для перерахунку чітких змінних в нечіткі. Процедуру синтезу регулятора наведено на рисунках 16-18, а результати досліджень фазі-регуляторів зведені в таблиці 7.

Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час, с	перерегулювання
ПІ-фазі	0.00122	0%
ПІД з фазі-блоком	0.000198	0%

**Четвертий розділ** присвячено аналізу та узагальненню результатів дослідження системи автоматичного АПР ВН ГПА, вирішенню практичних задач та імітаційному моделюванню.

Розроблено імітаційну модель ВН ГПА з урахуванням АПК, досліджено графік залежності витрати від кута повороту решітки.

Характеристика отриманої залежності апроксимована поліномом 5-го степеня і з врахуванням переходу до відносної витрати з приведенням до входу нагнітача має вигляд:

$$\dot{\Phi}_{\text{АПК}} = \sum_{i=0}^5 b_i \cdot \dot{\alpha}^i, \quad (6)$$

де  $\dot{\Phi}_{\text{АПК}} = \frac{Q}{Q_0}$  - відносна витрата через АПК за умов всмоктування;  $Q_0$  - масова витрата

через нагнітач за умов всмоктування на номінальному режимі;  $\dot{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{max}}}$  - відносний хід регулюючого органу (РО) (кут повороту);  $\alpha_{\text{max}}$  - максимальний хід РО;  $b_i$  - коефіцієнти полінома ( $b_0 = 0,22996$ ;  $b_1 = 0,1589$ ;  $b_2 = -4,1187$ ;  $b_3 = 11,4529$ ;  $b_4 = -12,735$ ;  $b_5 = 5,144$ ).

Для оцінки динамічних властивостей приводу проведений активний експеримент, після обробки результатів якого отримано функцію передачі виконавчого механізму у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, яка з врахуванням переходу до безрозмірного часу матиме такий вигляд:

$$W(s) = \frac{1}{100,56s + 1}. \quad (7)$$

Апроксимація розширеної газодинамічної характеристики для першого та другого квадрантів здійснена регресійною моделлю у вигляді полінома 5-го порядку:

$$\dot{\Psi}_s(\dot{\Phi}) = \sum_{i=0}^5 c_i \cdot \dot{\Phi}^i, \quad (8)$$

де  $c_i$  - коефіцієнти полінома ( $c_0 = 0,8849$ ;  $c_1 = -0,226$ ;  $c_2 = 2,6258$ ;  $c_3 = -4,898$ ;  $c_4 = 3,6826$ ;  $c_5 = -1,0674$ ).

На основі системи рівнянь (1), рівнянь (6), (7) та (8) в пакеті Simulink розроблено імітаційну модель ВН ГПА (рис. 19). Результати дослідження роботи АПК наведені на рисунку 20, а результати імітаційного моделювання з розробленими в третьому розділі структурами регуляторів подано в таблиці 8.

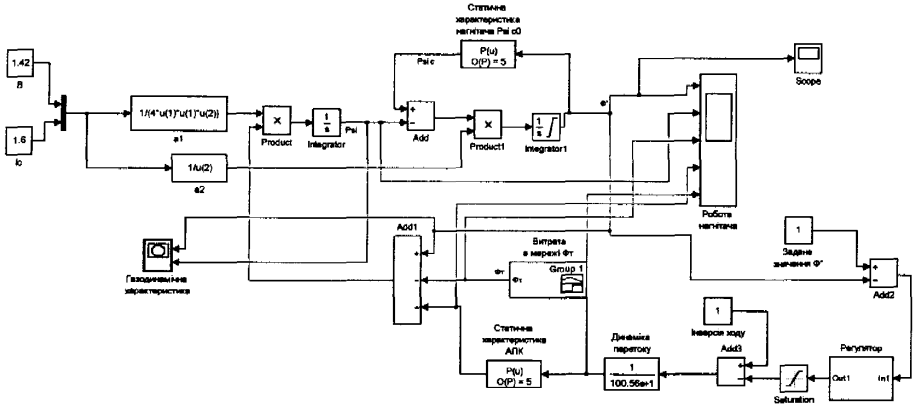


Рис. 19. Імітаційна модель ВН ГПА з урахуванням АПК

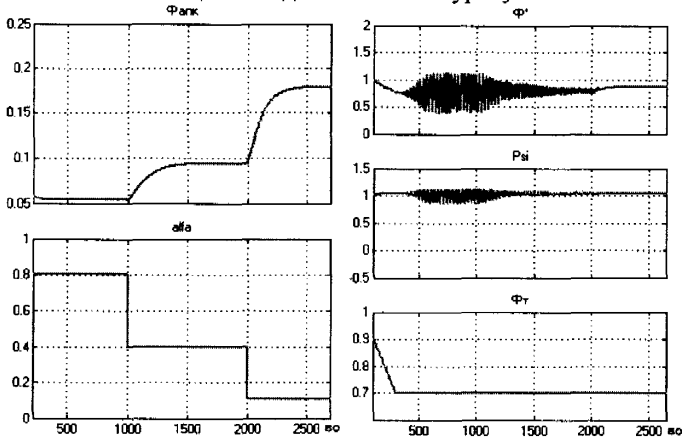


Рис. 20. Дослідження роботи АПК

Таблиця 8

**Показники якості перехідних процесів**

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час, с	перерегулювання
ПД	2,35	0%
ПДД2	2	0%
ПДД2Д3	1,8	0%
ПДД2-фазі	1,75	0%
ПД-фазі	1,68	0%
ПДД2	1,6	0%
ПДПД	1,3	0%
ПД з фазі-блоком	1,06	0%



Отже, результати імітаційного моделювання підтвердили високу швидкодію розроблених регуляторів та показали, що у порівнянні з ПІД-регулятором швидкодія збільшиться на: ПІДД2 - 14,89%; ПІДД2ДЗ - 23,4%; ПІДД2-фазі - 25,53%; ПІ-фазі - 28,51%; ПІДД2 - 31,92%; ПІДПД - 44,68%; ПІД з фазі-блоком - 54,89%.

У **висновках** сформульовано наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено результати дослідження програмним продуктом CurveExpert та акти щодо впровадження отриманих результатів дисертаційних досліджень.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-практичної задачі в галузі автоматизації процесів керування - удосконалено метод і підсистему автоматичного АПР системи «ВН ГПА - ТП» ДКС ПСГ, що функціонує за умов невизначеності щодо своїх параметрів і структури і при цьому демонструє стохастичну поведінку, що викликана наявністю зовнішніх збурень. Проведені дослідження і отримані наукові та практичні результати дозволяють сформулювати наступні основні висновки:

1. В результаті комплексного аналізу поточного стану проблеми побудови швидкодіючих підсистем автоматичного АПР ВН ГПА як ОК, що функціонують за умов невизначеності, відзначено недоліки існуючих методів АПР та використовуваних регуляторів, які мають недостатню швидкодію, що обмежує їх застосування в реальному часі на ДКС ПСГ, а також виявлено тенденції їх розвитку і удосконалення. Внаслідок аналізу виявлено, що швидкодія системи автоматичного АПР значною мірою залежить від властивостей регулятора, тому зроблено висновок щодо необхідності подальшого розвитку систем даного класу та розробки гібридного методу АПР, який використовує газодинамічні характеристики ВН і його динамічні властивості з метою підвищення швидкодії системи АПР.

2. Розроблено динамічну ММ явища помпажу в ВН ГПА з врахуванням перепуску газу через АПК, яка дозволяє моделювати процес компримування газу у системі «ВН ГПА - ТП» у зрівняній області робочих режимів.

3. На основі сукупності газодинамічних характеристик розроблено узагальнену статичну ММ ВН ГПА Ц-16 як ОК, яка створює передумови для розроблення імітаційної моделі ВН.

4. На основі загальних методів автоматичного керування і інтелектуальних технологій керування отримав подальший розвиток метод структурного і параметричного синтезу ефективних багатопараметричних регуляторів та регуляторів, що, на відміну від відомих, ґрунтуються на використанні оператора обернення по відношенню до ММ ОК і враховують при параметричній оптимізації регулятора суттєву нелінійність газодинамічних характеристик ВН. Це дає змогу визначати реальні оптимальні параметри регуляторів і запобігати появі автоколивальних режимів в системі АПР, викликаних обертальним зривом або явищем помпажу.

5. Отримав подальший розвиток метод вибору оптимальної за швидкодією структури фазі-регуляторів, який ґрунтується на результатах теоретичних і

експериментальних досліджень впливу різних факторів на швидкодію системи АПР: для синтезу фазі-регулятора використано ідею дуального керування, яка поєднує ідентифікацію та автоматичне керування в один процес, що значно спрощує процедуру налаштування фазі-регулятора; встановлено, що розроблений за цим методом фазі-регулятор є інваріантним щодо змін параметрів системи «ВН ГПА - ТП» в межах визначених робочих діапазонів, що сприяє підвищенню швидкодії підсистеми АПР.

6. Розроблено імітаційну модель ВН ГПА з урахуванням АПК, на основі якої проведено моделювання розроблених методів і моделей, здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів, який показав, що використання ПД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів збільшить швидкодію системи АПР в порівнянні з ПД-регулятором на 54,89%.

7. Запропоновані в дисертаційній роботі методи підвищення швидкодії підсистеми АПР ВН ГПА прийняті до впровадження на УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» та ТзОВ «МІКРОЛ».

Основні положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використовуються також в навчальному процесі на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ при підготовці фахівців з спеціальності 8.05020201 - автоматизоване управління технологічними процесами.

Результати випробувань і впровадження системи АПР свідчать про їх високу ефективність, що дозволяє рекомендувати розроблені науково-технічні рішення для широкого використання на компресорних станціях підприємствами ДК «Укртрансгаз», НАК «Нафтогаз України».

Результати досліджень є внеском у подальший розвиток та удосконалення існуючих методів автоматичного АПР ГПА для підвищення їх швидкодії.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Семенцов Г. Н. Розробка імітаційної моделі відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату з врахуванням байпасу / Г. Н. Семенцов, А. І. Лагойда, М. І. Когутяк // Технологический аудит и резервы производства. - 2016. - №5/2(31). - С. 4-9. (входить до міжнародних наукометричних баз: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, RISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJI), Sherpa/Romeo).

2. Семенцов Г. Н. Удосконалення оптимального керування газоперекачувальним агрегатом на основі багатопараметричних регуляторів / Г. Н. Семенцов, А. І. Лагойда // Нафтогазова енергетика. - 2015. - №1(23). - С. 61-68.

3. Семенцов Г. Н. Синтез оптимального за швидкодією закону керування відцентровим нагнітачем газоперекачувального агрегату / Г. Н. Семенцов, А. І. Лагойда // Технологічні комплекси. - 2014. - №2(10). - С. 50-55. (входить до міжнародних наукометричних баз: Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, RISC, Directory Indexing of International Research Journals).

4. Лагойда А. І. Застосування багатопараметричних регуляторів для керування

газоперекачувальним агрегатом / А. І. Лагойда // Технологический аудит и резервы производства. - 2014. - № 6/4(20). - С. 39-41. (входить до міжнародних наукометричних баз: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, RISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Joournals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJ), Sherpa/Romeo).

5. Лагойда А. І. Визначення оптимального перехідного процесу в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом / А. І. Лагойда, Г. Н. Семенов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2014. - № 5/8(71). - С. 26-30. (входить до міжнародних наукометричних баз: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, RISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Joournals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJ), Sherpa/Romeo).

6. Семенов Г. Н. Застосування багатопараметричних регуляторів для підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання газоперекачувального агрегату / Г. Н. Семенов, А. І. Лагойда // Нафтогазова галузь України. - 2014. - № 1. - С. 35-37.

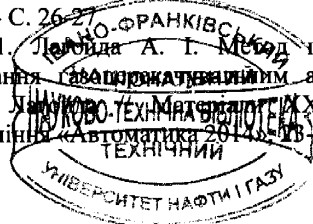
7. Семенов Г. Н. Антипомпажне керування газоперекачувальним агрегатом із застосуванням багатопараметричних регуляторів / Г. Н. Семенов, А. І. Лагойда // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2014. - № 4/8(70). - С. 34-39. (входить до міжнародних наукометричних баз: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, RISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Joournals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJ), Sherpa/Romeo).

8. Лагойда А. І. Використання багатопараметричного регулятора для складних технологічних об'єктів / А. І. Лагойда // Нафтогазова енергетика. - 2014. - № 1(21). - С. 94-100.

9. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування / А. І. Лагойда, Ю. Є. Бляут, Є. М. Лесів, Г. Н. Семенов // Нафтогазова енергетика. - 2012. - № 2(18). - С. 72-85.

10. Семенов Г. Н. ПІД-контролер з фази-блоком (тюнєром) автоматичного налаштування коефіцієнтів / Г. Н. Семенов, А. І. Лагойда // Збірник тез доповідей II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», 6-9 жовтня 2015 р. - 2015. - С. 26-27.

11. Лагойда А. І. Підвищення швидкодії системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом Д336-2 / А. І. Лагойда // Матеріали XI Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2014», 23-27 вересня 2014 р. - 2014. - С. 128-129.



12. Лагойда А. І. Синтез багатопараметричного регулятора для системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом / А. І. Лагойда // *Матеріали І Міжнародної науково - практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології - 2014»*, 16-17 квітня 2014 р. - 2014. - С. 25-26.

13. Лагойда А. І. Модель синтезу багатопараметричного ПДД2-регулятора для підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання / А. І. Лагойда // *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції аспірантів, молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, 8-11 жовтня 2013 р. - 2013. - С. 12-14.

14. Лагойда А. І. Метод підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання / А. І. Лагойда, Г. Н. Семенцов // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2013»*, 7-11 жовтня 2013 р. - 2013. - С. 70-73.

15. Лагойда А. І. Підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання і захисту компресора від помпажу / А. І. Лагойда // *4 та науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання»*, 26-27 листопада 2013 р. - 2013. - С. 95-96.

16. Лагойда А. І. Застосування аналогових та нечітких багатопараметричних регуляторів для керування роботою ГПА / А. І. Лагойда // *Збірник наукових праць ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Інтелектуальні технології в системному програмуванні 2013»*, 18-19 квітня 2013 р. - 2013. - С. 218-225.

### **АНОТАЦІЯ**

**Лагойда А.І. Антипомпажне керування газоперекачувальним агрегатом із застосуванням методів нечіткої логіки.** - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - автоматизація процесів керування. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківськ, 2017.

Дисертація присвячена питанню антипомпажного керування газоперекачувальним агрегатом. Проведено комплексний аналіз та узагальнення існуючих методів та засобів, призначених для синтезу систем автоматичного антипомпажного регулювання газоперекачувальних агрегатів, визначено основні напрямки їх розвитку й удосконалення. Розроблено основні принципи побудови і функціонування ПІ-фазі-регулятора та багатопараметричного ПІД-фазі-регулятора в складі системи автоматичного антипомпажного регулювання. Розроблено динамічну математичну модель явища помпажу в відцентровому нагнітачі газоперекачувального агрегату з врахуванням перепуску газу через антипомпажний клапан. Розроблено алгоритм моделювання процесу синтезування системи антипомпажного регулювання. Розроблено узагальнену статичну математичну модель відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату для сукупності газодинамічних характеристик. На основі функцій спектральних щільностей ступеня підвищення тиску газу та продуктивності нагнітача визначено функцію передачі

відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. Здійснено постановку задачі синтезу оптимальної за швидкодією підсистеми автоматичного антипомпажного регулювання. Сформульовано постановку задачі синтезу регулятора підсистеми автоматичного антипомпажного регулювання на основі використання оператора обернення. На основі функції передачі відцентрового нагнітача розроблено моделі багатопараметричних ПДД2-, ПДД2Д3-регуляторів і метод синтезу таких регуляторів. Розроблено структури ПДД2-, ПДПД-регуляторів, функція передачі яких обернена до функції передачі об'єкта керування. Здійснено синтез оптимального за швидкодією закону керування відцентровим нагнітачем газоперекачувального агрегату з газотурбінним приводом. Розроблено та синтезовано ПДД2-, ПІ-фазі-регулятор та ПД-регулятор з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів. Розроблено імітаційну модель відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату з урахуванням антипомпажного клапану. Проведено імітаційне моделювання з розробленими регуляторами та здійснено їх порівняльний аналіз.

**Ключові слова:** антипомпажне керування, фазі логіка, газоперекачувальний агрегат, математична модель, багатопараметричний регулятор, імітаційне моделювання.

### АННОТАЦИЯ

**Лагойда А.И. Антипомпажное управление газоперекачивающим агрегатом с применением методов нечеткой логики.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Министерство образования и науки Украины, Ивано-Франковск, 2017.

Диссертация посвящена вопросу антипомпажного управления газоперекачивающим агрегатом. Проведен комплексный анализ и обобщение существующих методов и средств, предназначенных для синтеза систем автоматического антипомпажного регулирования газоперекачивающих агрегатов, определены основные направления их развития и совершенствования. Разработаны основные принципы построения и функционирования ПИ-фазы-регулятора и многопараметрического ПИД-фазы-регулятора в составе системы автоматического антипомпажного регулирования. Разработана динамическая математическая модель явления помпажа в центробежном нагнетателе газоперекачивающего агрегата с учетом перепуска газа через антипомпажный клапан. Разработан алгоритм моделирования процесса синтезирования системы антипомпажного регулирования. Разработана обобщенная статическая математическая модель центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата для совокупности газодинамических характеристик. На основе функций спектральных плотностей степени повышения давления газа и производительности нагнетателя определены функции передачи центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата. Осуществлена постановка задачи синтеза оптимальной по быстродействию подсистемы автоматического антипомпажного регулирования. Сформулирована постановка задачи синтеза регулятора подсистемы автоматического антипомпажного регулирования на основе использования оператора обращения. На основе функции передачи центробежного нагнетателя разработаны модели многопараметрических ПДД2-, ПДД2Д3-регуляторов и метод синтеза таких регуляторов. Разработаны

структуры ПДД2-, ПДПД-регуляторов, функция передачи которых обратная к функции передачи объекта управления. Осуществлен синтез оптимального по быстрдействию закона управления центробежным нагнетателем газоперекачивающего агрегата с газотурбинным приводом. Разработан и синтезирован ПИДД2-, ПИ-фази-регулятор и ПИД-регулятор с фази-блоком автоматической настройки коэффициентов. Разработана имитационная модель центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата с учетом антипомпажного клапана. Проведено имитационное моделирование с разработанными регуляторами и осуществлен их сравнительный анализ.

**Ключевые слова:** антипомпажное управление, фази логика, газоперекачивающий агрегат, математическая модель, многопараметрический регулятор, имитационное моделирование.

#### ABSTRACT

**Lahoida A.I. Antisurge Control of Gas Pumping Units Using the Methods of Fuzzy Logic.** - Manuscript.

Dissertation thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 - automation of management processes. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2017.

The thesis is devoted to antisurge control of gas pumping units. A comprehensive analysis and synthesis of existing methods and tools, designed to synthesize subsystems of automatic antisurge regulation of gas compressor units, are conducted and the main directions for their development and improvement are defined. Basic principles of construction and operation of the PI-fuzzy-regulator and multiparametric PID-fuzzy-regulator as a part of the subsystem of automatic antisurge control are developed. The dynamic mathematical model of the surge phenomenon in the centrifugal pumping unit supercharger with the account of the gas bypass through the antisurge valve is designed. The algorithm of the synthesis process modeling of the antisurge regulation subsystem is implemented. The generalized mathematical static model of the centrifugal pumping unit supercharger for a set of gas-dynamic characteristics is designed. On the basis of the spectral density functions of the gas compression ratio and supercharger performance, the transfer function of the centrifugal pumping unit supercharger is determined. The synthesis problem of the time optimal subsystem of automatic antisurge control is stated. The synthesis problem statement of the subsystem regulator of automatic antisurge control, based on the inversion operator usage, is formulated. Based on the transfer function of the centrifugal supercharger, the models of multiparametric PIDD2- and PIDD2D3-regulators, as well as the method for these regulators synthesis, are developed. The structures of the PDD2- and PDPD-regulators, the transfer function of which is inverse to the transfer function of the control object, are designed. The synthesis of the optimal time control law of the centrifugal pumping unit supercharger with the gas turbine drive is conducted. The PIDD2- and PI-fuzzy-regulator, as well as the PID regulator with the fuzzy block of automatic adjustment of coefficients, are developed and synthesized. The simulation model of the centrifugal pumping unit supercharger with the account of the antisurge valve is designed. The simulation modeling of the developed regulators is conducted and their comparative analysis is carried out.

**Keywords:** antisurge control, fuzzy logic, gas pumping units, mathematical model, multiparametric regulator, simulation modeling

