

*На правах рукописи*



**КРЮКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
УЗЛАМИ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ГАЗОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА  
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Оренбург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет»

Научный руководитель - **Тугов Виталий Валерьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный  
университет», заведующий кафедрой  
вычислительной техники и защиты информации

Официальные оппоненты: **Симонова Лариса Анатольевна**,  
доктор технических наук, профессор,  
Набережночелнинский институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет», заведующая  
кафедрой автоматизации и управления

**Медведева Оксана Николаевна**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
профессор кафедры теплогазоснабжения и  
нефтегазового дела

Ведущая организация - **ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени  
И.М. Губкина»**, г. Москва

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.352.01 на базе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд.170215.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ([www.osu.ru](http://www.osu.ru)) ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент

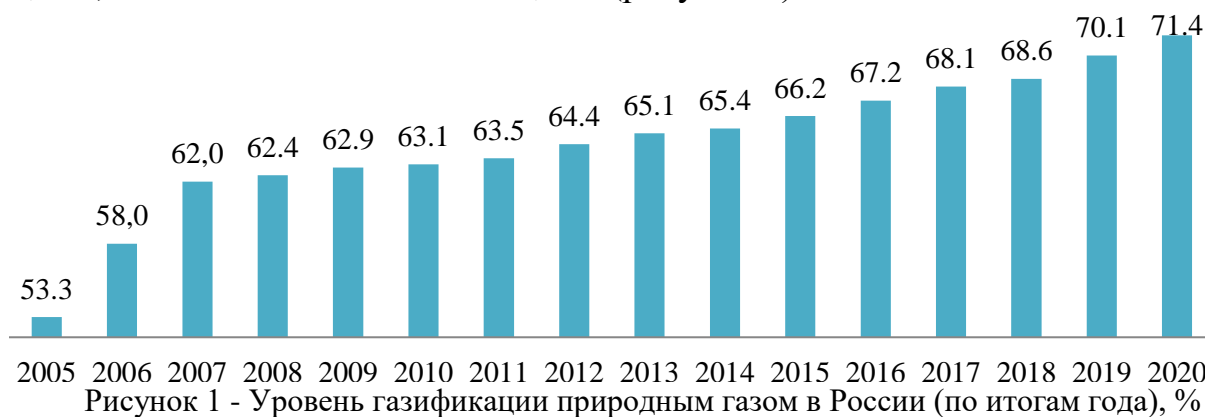


Хасанов Ильгиз Халилович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Газификация регионов России – одно из самых амбициозных и социально значимых направлений работы ПАО «ГАЗПРОМ» на внутреннем рынке страны. Это способствует социально-экономическому развитию регионов Российской Федерации и повышению качества жизни населения. В период с 2005 по 2020 годы построено более 2,5 тысяч газопроводов, в результате чего уровень газификации природного газа в РФ к 1 января 2021 года достиг в городах – 73,7 %, в сельской местности – 64,8 % (рисунок 1).



В 2021-2025 годах компания планирует инвестировать на газификацию регионов РФ 526,1 миллиарда рублей – больше, чем за предыдущие 15 лет. Программы на 2021-2025 годы заключены с 67 субъектами РФ. Строится более 24 тысяч километров газопроводов. Создаются условия для газификации 3,6 тысячи населённых пунктов, что обеспечит рост в 2,7 раза.

Особенности развития газопроводной системы страны, исходя из важной роли природного газа, требуют повышения эффективности при транспортировке газа за счет совершенствования автоматизированных систем управления (АСУ).

Разветвленная сеть газопроводов представляет сложную структуру, состоящую из множества узлов, основным из которых является узел редуцирования газа (УРГ). Он служит для перепуска газа между трубопроводами различной пропускной способности и максимально разрешенным давлением, осуществляя функцию автоматического поддержания заданного давления.

В ходе эксплуатации УРГ обнаружены негативные факторы, которые связаны с его работой: сложность в настройке автоматического режима стабилизации давления и плохие динамические свойства (длительные переходные процессы, автоколебания и др.). Это приводит к превышению выходного давления в газопроводе относительно максимально разрешенного, а также заклиниванию сбросного пружинно-предохранительного клапана (СППК), что ведет к аварийной разгерметизации магистрального газопровода и отключению газового снабжения целых регионов. Рассмотренные факторы негативно отражаются не только на процессе регулирования, но и приводят к выходу из строя механических частей, таких как рейка, шток, сепаратор, уплотнения и другие. Средние потери газа на одну аварию варьируются в диапазоне от 2,5 до 3 млн м<sup>3</sup>.

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что классический закон ПИД-регулирующего, используемый в УРГ, не способен обеспечить эффективное регулирование параметров транспортируемого газа, поэтому необходимо разработать аппаратно-программный комплекс для управления редуцированием газа.

Весомый вклад в развитие систем автоматизированного управления технологическими процессами транспорта газа внесли ученые Комягин А.Ф., Александров А.В., Жидкова М.А., Озол С.В., Рем Я.Б., Сергованцев В.Т., Темпель Ф.Г., Крюков О.В., Гаврилов Ф.А., Шадрин В.В. и другие ученые.

Основная проблема корректного функционирования УРГ заключается в поиске оптимальных алгоритмов управления регулирующими клапанами, позволяющими исключить влияние дестабилизирующих факторов на качество процесса редуцирования. В настоящее время при разработке систем автоматического регулирования широкое применение нашли модели и алгоритмы управления, основанные на аппарате нечеткой логики. Исследованием систем нечеткого управления занимались такие российские ученые, как Аверкин А.Н., Мелихов А.Н., Муравьева Е.А., Борисов Н.А., Батышин И.З., Красовский А.А., Колмогоров А.Н., Пупков К.А., Тарасов Б.Н., Колесников А.В., Рубанов В.Г., Филатов А.Г., Рыбин И.А. а также зарубежные: Заде Л. А., Винер Р., Сугено М., Эшби У., Такаги Т., Хирота К., Калман Р., Танака К., Месарович М., Изерман Р., Эйкхофф П., Острем К. и др.

Проведенные исследования подтверждают актуальность рассмотренных в диссертационной работе задач, связанных с повышением качества и снижением потерь в процессе редуцирования газа.

**Объект исследования** – автоматизированная система управления редуцированием газа магистральных газопроводов высокого давления.

**Предмет исследования** – математическое, алгоритмическое и программное обеспечение системы управления редуцированием газа.

**Целью работы** является снижение потерь газа и повышение степени безопасности на линейной части магистрального газопровода высокого давления за счет совершенствования системы управления редуцированием с использованием аппарата нечеткой логики.

**Задачи исследования:**

1) провести анализ технологического процесса транспортировки природного газа, способов и режимов редуцирования давления газа;

2) разработать математическое обеспечение интегрированное в структуру АСУ, повышающее точность и снижающее потери газа, за счет равномерного регулирования давления;

3) разработать структурные схемы автоматизированного управления редуцированием газа с применением аппарата нечеткой логики, обеспечивающие минимальное отклонение текущих значений взаимосвязанных параметров от заданных;

4) разработать алгоритм управления регулирующим клапаном и программное обеспечение для гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов;

5) провести экспериментальную проверку работоспособности и эффективности использования гибридного нечеткого ПИД-регулятора.

**Методы исследования.** Исследования в диссертационной работе основывались на методах системного анализа, теории представления и использования знаний, математическом аппарате нечеткой логики, теории автоматического управления, теории имитационного моделирования и программирования.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели для управления редуцированием газа, отличающиеся учетом постоянного возмущающего воздействия на объект управления и повышающие точность за счет разработанных правил.

2. Разработан метод определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления, отличающийся применением классической и нечеткой моделей, что способствует повышению эффективности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов.

3. Разработан алгоритм управления регулирующим клапаном, отличающийся применением каскадного включения блока нечеткой логики с целью корректировки коэффициентов для стабилизации выходного давления узла редуцирования газа.

4. Разработана методика проведения эксперимента с применением гибридного нечеткого ПИД-регулятора, отличающаяся учетом автоподстройки коэффициентов, что способствует снижению перерегулирования при достижении заданной уставки давления, а также продлению срока службы оборудования, за счет минимизации механического воздействия на исполнительное устройство.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в:

– разработанном на языке Си программном обеспечении нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов;

– разработанном регуляторе на базе микроконтроллера AVR ATmega32 и внедренным в существующие комплексы СЛТМ (на примере Магистраль-2. Интеграция в SCADA-модуль «ZOND»).

**Достоверность научных результатов.** Результаты и выводы диссертации подтверждаются строгими математическими доказательствами, выполненными в ходе исследований и апробирования, путем сравнения результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными путем моделирования и полевыми испытаниями с последующим внедрением разработанных методик в технологический процесс. Полученные результаты согласуются с современными научными идеями и данными, полученными на основе обзора отечественных и зарубежных источников информации, а также подтверждено оригинальным исследованием автора.

**Реализация результатов диссертационной работы.** Полученные в диссертационной работе результаты исследования приняты к внедрению:

– в Оренбургском ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» (г. Оренбург, Россия).

**Содержание диссертации** соответствует областям исследований паспорта научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами: п. 3; п. 4; п. 14.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели процесса редуцирования газа в виде нечетких уравнений и их имитационная реализация, позволяющие повысить точность и расширить функциональные возможности системы за счет разработанных правил нечеткого управления.

2. Метод определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления, позволяющий учитывать технологические и конструкционные ограничения, накладываемые на процесс и производить расчет настроечных коэффициентов, что ведет к повышению эффективности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов.

3. Алгоритм управления регулирующим клапаном, обеспечивающий повышение качества регулирования и позволяющий стабилизировать технологический процесс редуцирования газа на линейной части магистральных газопроводов.

4. Методика проведения экспериментальных исследований, подтверждающая достоверность предложенных математических моделей и алгоритма управления процессом редуцирования давления газа.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались и получили одобрение на международных, всероссийских, отраслевых научно-практических конференциях: «Молодежные инновации повышения эффективности и надежности транспорта газа» (Екатеринбург, 2015, 2016 гг.); «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (Пермь, 2017 г.); «Инновационные молодежные проекты – вектор развития профессиональной культуры» (Екатеринбург, 2017 г.); «Перспективный диалог: решение актуальных задач оптимизации технологических процессов и повышение надежности транспорта газа» (Екатеринбург, 2018 г.); «Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее» (Оренбург, 2019 г.); «Полувековые традиции – современные технологии» (Екатеринбург, 2019 г.); «79-я Международная научно-техническая конференция. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2021 г.); XIII отраслевая научно-техническая конференция молодых руководителей и специалистов (Екатеринбург, 2022 г.).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, из них 3 в журналах из «Перечня ...» ВАК, 1 программное средство, зарегистрированное Роспатентом.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, выводов, списка использованных источников (112 наименований) и четырех приложений. Изложена на 178 страницах и содержит 54 рисунка, 10 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, определены цели и задачи работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Анализ процесса транспортировки природного газа как объекта управления» рассмотрена краткая характеристика газотранспортной системы [5-10; 12; 13]. Произведен анализ основных режимов работы узлов редуцирования газа, а также используемых законов управления регулирующими клапанами. Выявлены основные проблемы корректности функционирования данных устройств в виду сложности их настройки под конкретный режим работы, приводящие к возникновению аварийных ситуаций за счет быстрого износа механических частей регулятора. Причины появления аварийных ситуаций за период 2010-2021 год на УРГ линейной части магистральных газопроводах (ЛЧМГ) представлены на рисунке 2.

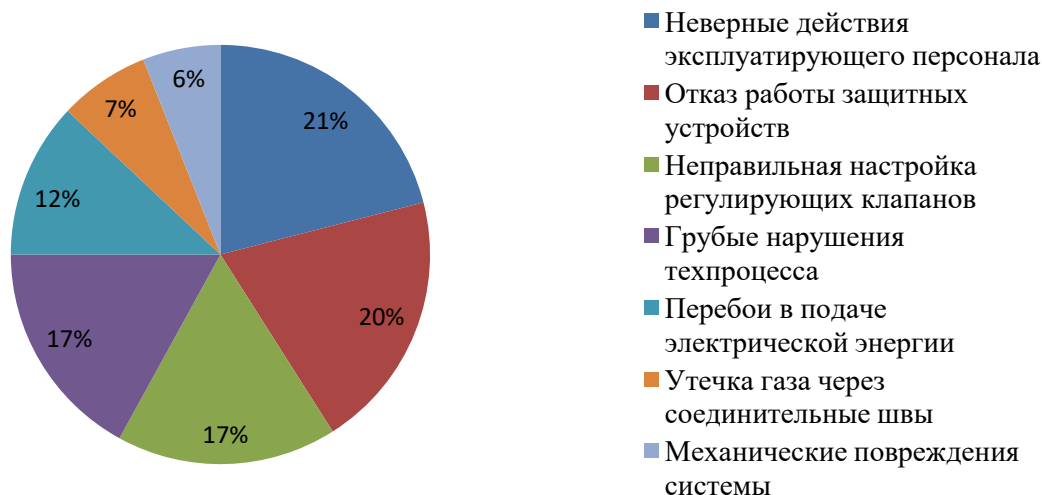


Рисунок 2 - Причины появления аварийных ситуаций на УРГ

Как видно из данных рисунка 2 одним из основополагающих факторов возникновения аварийных ситуаций является неправильная настройка средств автоматизации, а в частности регулирующих клапанов.

Принцип действия АСУ УРГ заключается в обнаружении отклонения заданной величины, которая характеризует работу объекта или протекание процесса от требуемого режима, и воздействовать на объект управления с целью устранения этих отклонений. Объектом управления является участок трубопровода между точкой измерения давления и регулирующим органом. Динамику объекта управления  $W(p)$  можно описать апериодическим звеном первого порядка и звеном запаздывания:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{1}{T_p + 1} e^{-\tau_0 p}, \quad (1)$$

где:

$$T = \frac{2Lfc^2}{q_v} = \frac{2Lfc^2}{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш} K_{п} \varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_c T_K}{\rho_c P_{вх} T_c}\right)^{0,5}}; \quad (2)$$

$$\tau_0 = \frac{Lf}{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш} K_{п} \varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_c T_K}{\rho_c P_{вх} T_c}\right)^{0,5}}; \quad (3)$$

$$c = \frac{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 C E K_{ш} K_{п} \varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_c T K}{\rho_c P_{вх} T_c}\right)^{0,5}}{f} \sqrt{\frac{\rho_c}{2\Delta P}}; \quad (4)$$

$$f = \frac{\pi d_{20}^2}{4}; \quad (5)$$

$T$  – постоянная времени;  $\tau_0$  – запаздывание;  $p$  – оператор Лапласа;  $L$  – длина участка трубопровода между точкой измерения и точкой регулирования;  $f$  – площадь сечения трубы;  $q_v$  – объемный расход среды при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с;  $d_T$  – диаметр трубопровода, м;  $h$  – величина открытия клапана, %;  $K_{cy}$  – коэффициент, учитывающий изменение диаметра отверстия СУ, вызванное отклонением температуры среды от 20 °С;  $C$  – коэффициент истечения;  $E$  – коэффициент скорости входа;  $K_{ш}$  – поправочный коэффициент, учитывающий шероховатость внутренней поверхности;  $K_{п}$  – поправочный коэффициент, учитывающий притупление входной кромки;  $\varepsilon$  – коэффициент расширения;  $P_c$  – давление при стандартных условиях, Па;  $T$  – абсолютная (термодинамическая) температура среды, К;  $K$  – коэффициент сжимаемости газа;  $\rho_c$  – плотность среды, приведенное к стандартным условиям, кг/м<sup>3</sup>;  $T_c$  – температура при стандартных условиях, К.

В связи с отсутствием возможности измерения части параметров, участвующих в настройке, наиболее часто для управления УРГ применяют ПИД-регуляторы. На практике широкое распространение получила методика настройки ПИД-регулятора, использующая выражение для определения выходного сигнала, в которой на пропорциональный коэффициент умножена интегрирующая и дифференцирующая составляющая. Однако ее применение часто приводит к возникновению длительных переходных характеристик процесса, автоколебанию и др.

**Во втором разделе «Математическое описание процесса редуцирования газа как объекта управления»** произведено математическое описание процесса автоподстройки коэффициентов на координационном уровне гибридного нечеткого регулятора с использованием алгоритма Мамдани [1-3; 7; 11].

Рассматриваемый в работе процесс редуцирования давления газа относится к сложным объектам автоматизации, это связано со сложностью построения математической модели, полностью описывающей состояние объекта и учета всех влияющих на него параметров внешней среды. В связи с отсутствием полноты информации об объекте управления, невозможно обеспечить устойчивую работу системы управления. Поэтому для данных объектов в работе предложено использовать гибридные нечеткие автоматизированные системы управления (ГН АСУ), которые адаптируются к изменениям свойств объекта управления и изменяют закон управления по заданным правилам, основанных на знаниях. Они обеспечивают статичность в работе системы под влиянием динамических воздействий на объект управления. Функциональная схема ГН САУ ТП УРГ представлена на рисунке 3.

Гибридная нечеткая АСУ УРГ строиться из двух уровней иерархии, включающих исполнительный и координационный уровень. Исполнительный уровень синтезирует воздействие  $u$  на объект управления при помощи классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления  $K_{п}$ ,  $K_{и}$ ,  $K_{д}$ .

На координационном уровне с помощью системы нечеткого вывода с разработанной базой продукционных правил на основе показателей отклонения за-



данной уставки давления  $y_{зад}$  от значения на выходе объекта управления с интервалом времени  $T$ , происходит интеллектуальная настройка ПИД-регулятора с формированием поправочных коэффициентов  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$ .

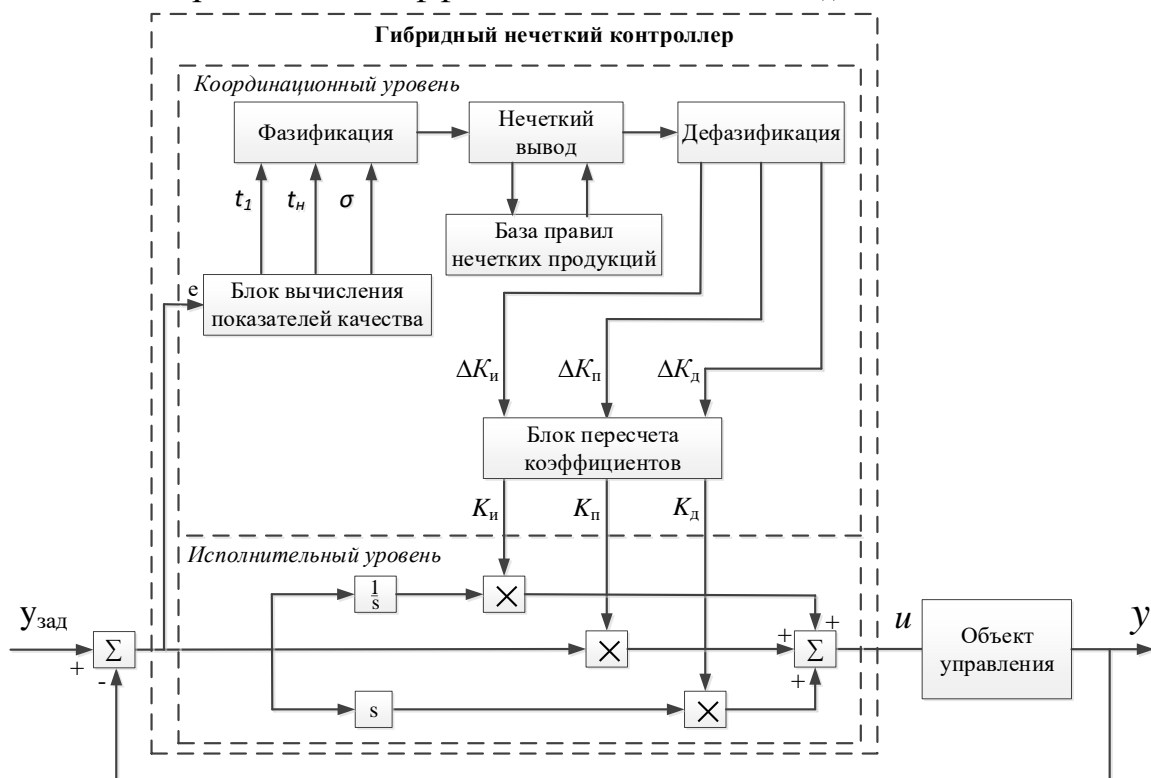


Рисунок 3 - Функциональная схема гибридной нечеткой АСУ ТП УРГ

Достоинство данного решения состоит в его универсальности и позволяет учитывать влияние динамических воздействий на объект управления, тем самым повысить эффективность и безопасность эксплуатации магистральных трубопроводов.

Процесс настройки регулятора начинается с поиска начальных приближенных коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  методом Зиглера-Никольса. Далее происходит его настройка с использованием блока нечеткого логического вывода. Создается база правил для подстройки коэффициентов ПИД-регулятора, основанная на опыте эксперта, выбираются три показателя:  $t_1$ ,  $t_n$ ,  $\sigma$ . Цель, которая стоит перед нечетким регулятором, это обеспечить требуемые показатели качества системы управления, т.е.  $t_1^*$ ,  $t_n^*$ ,  $\sigma^*$  за счет подстройки коэффициентов ПИД-регулятора. При этом необходимо учитывать правила, основанные на знаниях и опыте эксперта, например: если время достижения 10 % от заданного значения  $t_1$  и время нарастания  $t_n$  увеличивается и перерегулирование  $\sigma$  возрастает, то увеличиваем интегральный коэффициент  $K_i$ , немного уменьшаем пропорциональный коэффициент  $K_p$  и не изменяем дифференциальный коэффициент  $K_d$ .

Аналогично составляются остальные совокупности правил настройки ПИД-регулятора (таблица 1).

Вычисление поправочных коэффициентов  $S_i$ ,  $S_p$ ,  $S_d$  формируется по алгоритму нечеткого вывода Мамдани. Взаимосвязь параметров более подробно раскрывается в структурной схеме блока нечеткой автоподстройки, представленной на рисунке 4.

Таблица 1 – Совокупность условий управления

№ п/п	$t_1$	$t_n$	$\sigma$	$K_{И}$	$K_{П}$	$K_{Д}$
1	В↑	В↑	В↑	В↑	М↓	Н
2	...	...	...	...	...	...
13	Н	Н	М↓	М↓	В↑	Н

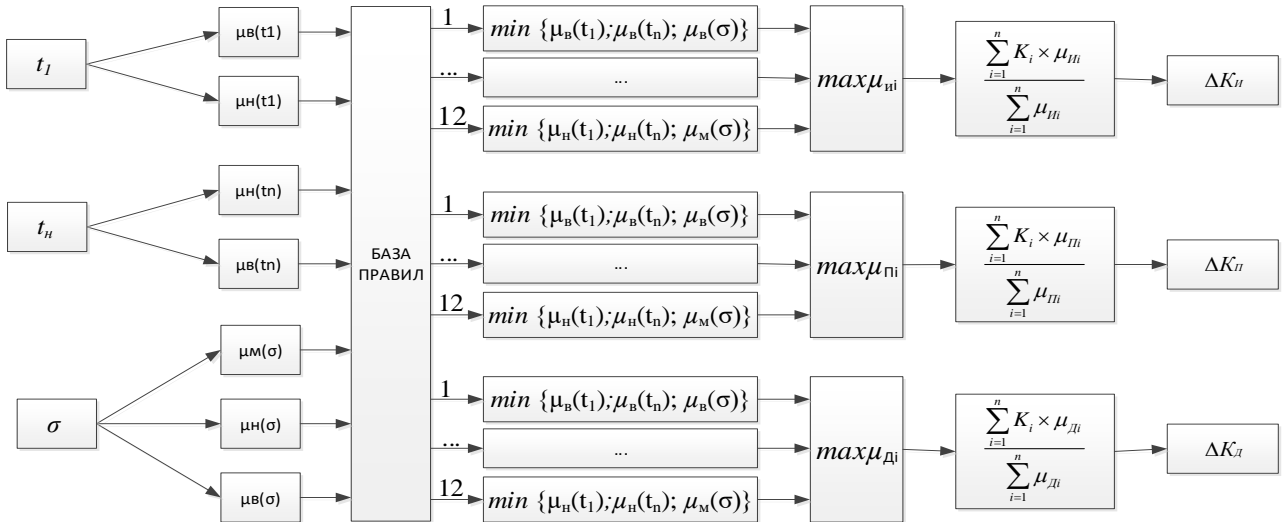


Рисунок 4 – Структурная схема нечеткого блока автоподстройки коэффициентов ПИД-регулятора

Пусть время достижения 10 % от заданного значения  $t_1 = 3$  сек; время нарастания, т.е. достижения 90 % от уставки  $t_n = 90$  сек; перерегулирование составляет  $\sigma = 3$  %. Составим функции принадлежности термов лингвистических переменных (рисунок 5).

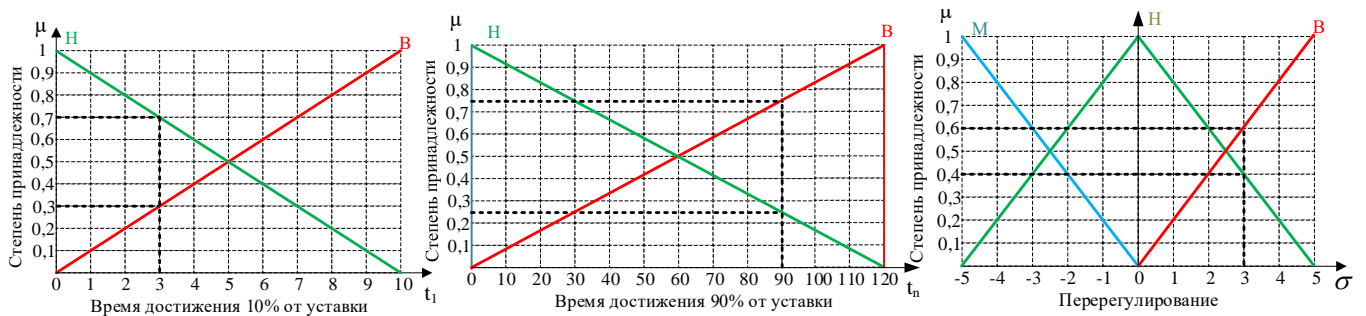


Рисунок 5 – Функции принадлежности термов лингвистических переменных

В лингвистических переменных нечеткой логики управляющие воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора могут быть представлены пятью термами (для коэффициентов  $K_{П}$ ,  $K_{И}$ ,  $K_{Д}$ : сильно уменьшить, уменьшить, не изменять, увеличить, сильно увеличить).

На первом этапе формирования нечеткого вывода, согласно правилам, определяется степень принадлежности термов выходной переменной по минимальному значению.

Для интегрального звена  $K_{И}$ :

$$\mu_{К_{ИВ}} = \min \{ \mu_{В}(t_1); \mu_{В}(t_n); \mu_{В}(\sigma) \}$$

.....  
 Для пропорционального звена  $K_p$ :

$$\mu_{кпм} = \min \{ \mu_v(t_1); \mu_v(t_n); \mu_v(\sigma) \}$$

.....  
 Для дифференциального  $K_d$  звена соответственно:

$$\mu_{кдн} = \min \{ \mu_v(t_1); \mu_v(t_n); \mu_v(\sigma) \}$$

.....  
 На втором этапе формирования определяется степень принадлежности термов выходных переменных по максимальному значению. Например, в выражения подставляют разные значения степени принадлежности для терма  $\mu_{кин}$ , но выбирается максимальное из них.

$$\mu_{кин} = \max \{ \mu_{кин} \}$$

.....  
 Таким образом, степени принадлежности термов выходных переменных имеют следующие значения

$$\{ \mu_{кисм}, \mu_{ким}, \mu_{кин}, \mu_{кив}, \mu_{кисв}, \}$$

.....  
 Денацификация поправочных коэффициентов  $S_i S_p S_d$  производится методом центра масс:

$$S_i = \frac{K_{исм} \times \mu_{кисм} + K_{им} \times \mu_{ким} + K_{ин} \times \mu_{кин} + K_{ив} \times \mu_{кив} + K_{исв} \times \mu_{кисв}}{\mu_{кисм} + \mu_{ким} + \mu_{кин} + \mu_{кив} + \mu_{кисв}} \quad (6)$$

$$S_p = \frac{K_{псм} \times \mu_{кпсм} + K_{пм} \times \mu_{кпм} + K_{пн} \times \mu_{кпн} + K_{пв} \times \mu_{кпв} + K_{псв} \times \mu_{кпсв}}{\mu_{кпсм} + \mu_{кпм} + \mu_{кпн} + \mu_{кпв} + \mu_{кпсв}} \quad (7)$$

$$S_d = \frac{K_{дсм} \times \mu_{кдсм} + K_{дм} \times \mu_{кдм} + K_{дн} \times \mu_{кдн} + K_{дв} \times \mu_{кдв} + K_{дсв} \times \mu_{кдсв}}{\mu_{кдсм} + \mu_{кдм} + \mu_{кдн} + \mu_{кдв} + \mu_{кдсв}} \quad (8)$$

Далее при помощи значений поправочных коэффициентов  $S_i, S_p, S_d$  вычисляется величина изменения коэффициентов ПИД-регулятора в процентах:

$$\Delta K_i = S_i \times K_i \times 100 \% = 35,29 \% \times K_i;$$

$$\Delta K_p = S_p \times K_p \times 100 \% = 8 \% \times K_p;$$

$$\Delta K_d = S_d \times K_d \times 100 \% = 18,52 \% \times K_d.$$

Таким образом, для достижения требуемого качества переходного процесса  $y(t)$  необходимо на 8 % уменьшить пропорциональный коэффициент усиления  $K_p$ , на 35 % увеличить значение интегрального коэффициента  $K_i$  и на 18,5 % дифференциального  $K_d$ .

**Третий раздел «Исследование различных видов разработанных логических регуляторов в задачах управления процессом редуцирования газа»** посвящен исследованию разработанных регуляторов и разработке метода определения параметров гибридного нечеткого управления редуцированием газа [1-3;11; 12].

В работе предложено использовать разработанный метод управления процессом редуцирования газа, основанный на сочетании классической и нечеткой модели. Метод позволяет получить желаемое качество управление объектом за счет определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления, включающей в себя исполнительный и координационный уровень. На координационном уровне автоматически анализируются

показатели переходного процесса, полученные в результате работы классического ПИД-регулятора (исполнительный уровень) и производится интеллектуальная коррекция настроечных параметров регулятора по алгоритму нечеткого вывода Мамдани (Mamdani). Реализация метода представлена на разработанной функциональной схеме управления (рисунок 7).

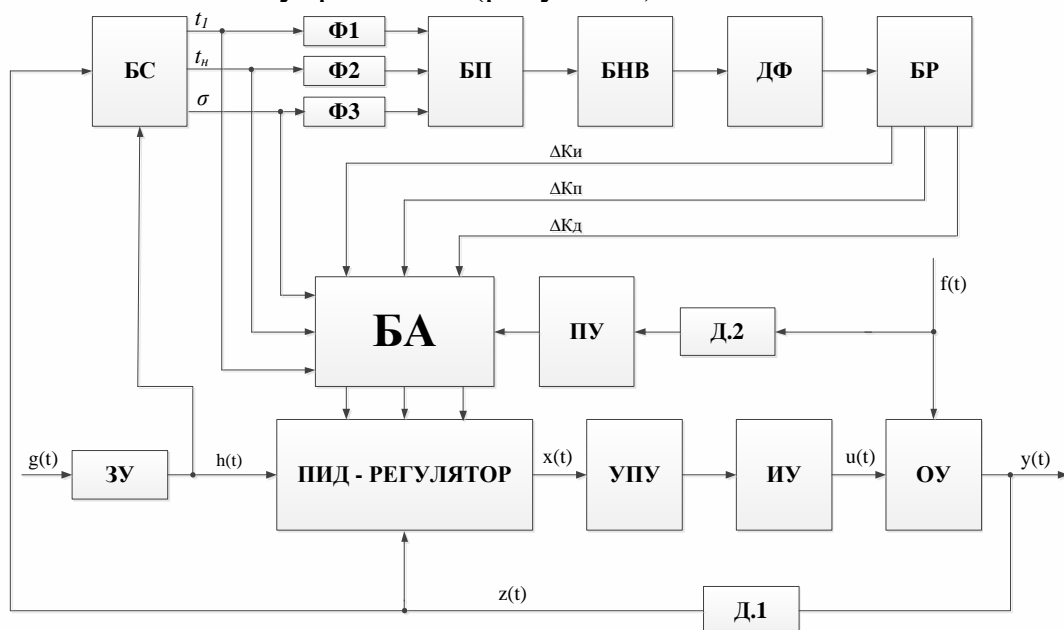


Рисунок 7 – Функциональная схема нечеткого гибридного ПИД-регулятора

Уставка давления  $g(t)$  поступает на задающее устройство (ЗУ). Затем сигнал передается на блок сравнения (БС). БС сопоставляет показания сигналов обратной связи  $z(t)$  с датчика давления Д.1, установленного на выходе объекта управления (ОУ) и сигнала  $h(t)$  поданного с задающего устройства. Блок анализа (БА) зондирует соответствия параметров  $t_1$ ,  $t_n$ ,  $\sigma$  заданным  $t_1^*$ ,  $t_n^*$ ,  $\sigma^*$ , и выдает коэффициенты  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  на ПИД-регулятор. Сигнал рассогласования  $x(t)$  с ПИД-регулятора поступает на усилительно-преобразовательное устройство (УПУ), представленное связкой IP-преобразователя и позиционера. Преобразованный сигнал подается на исполнительное устройство (ИУ), клапан осевого типа, который задает управляющее воздействие  $u(t)$  на ОУ.

В случае изменения величины возмущающего воздействия  $f(t)$  на ОУ, датчик измерения давления Д.2 передает сигнал в блок анализа через преобразовательное устройство (ПУ). В случае несоответствия заданным критериям процесса, БА передает параметры в блок нечеткой логики, для вычисления поправочных коэффициентов с целью улучшения качества процесса регулирования. Затем измеренные параметры подвергаются процедуре приведения к «нечеткости», с использованием фазификаторов Ф1, Ф2, Ф3 и поступают в сформированную базу правил (БП). После этого блок нечеткого вывода (БНВ), согласно заданного алгоритма, дефазифицирует поправочные коэффициенты и направляет их в блок расчета (БР), функцией которого является пересчет вычисленных коэффициентов и передачи их в блок анализа, для принятия дальнейшего решения по ПИД-регулированию.

Разработанный алгоритм гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов представлен на рисунке 8.

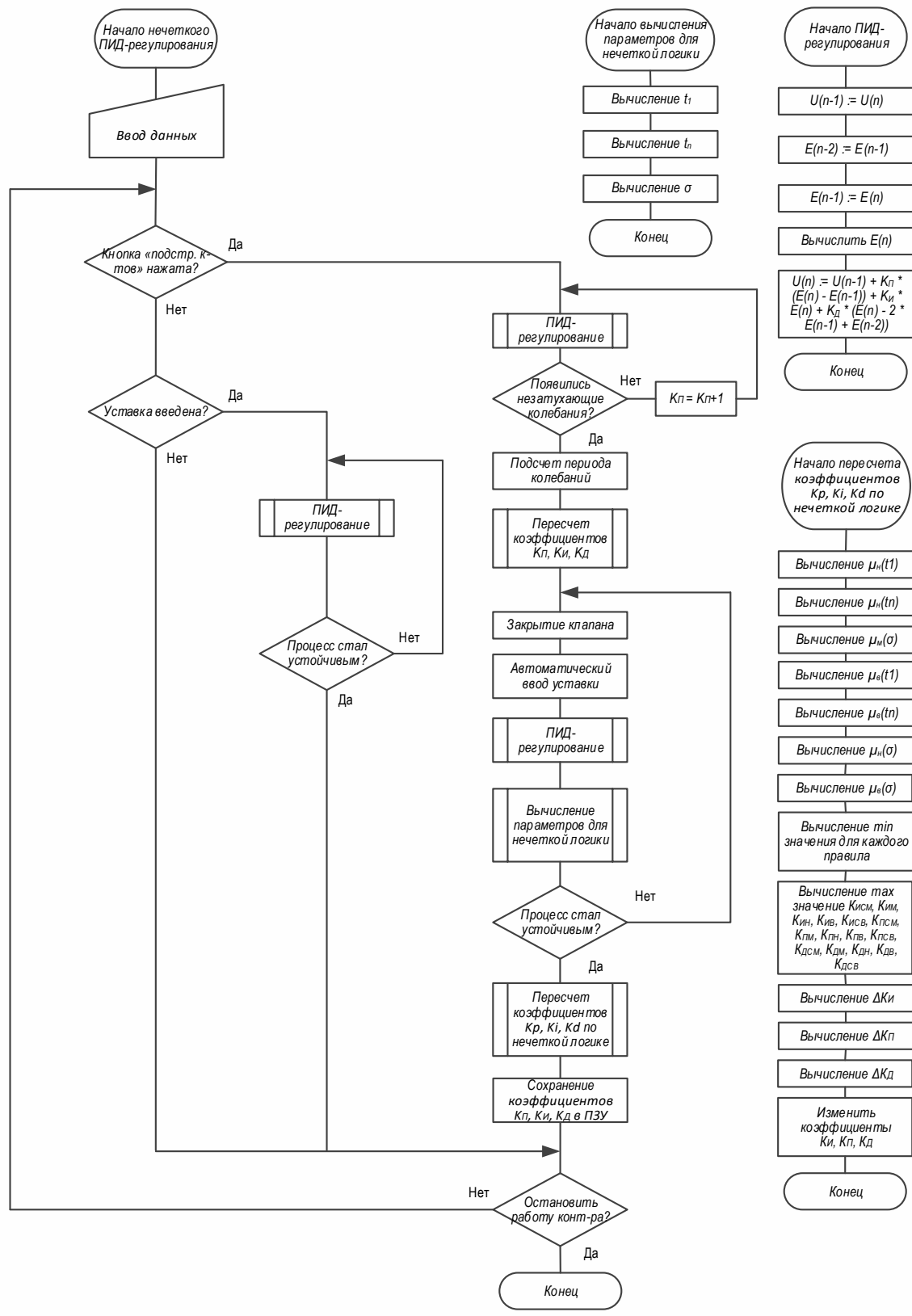


Рисунок 8 – Алгоритм управления гибридным нечетким ПИД-регулятором

**Четвертая глава** «Аппаратная и программная реализация разработанного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов» посвящена аппаратной и программной реализации нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов [3; 4; 11; 12], а также проведению экспериментальных исследований.

Основу узла управления нечетким ПИД-регулятором представляет микроконтроллер ATMEL ATMEGA32. Микроконтроллер принимает аналоговый сигнал с датчика выходного давления и задает процент открытия клапана-регулятора. Запуск процесса автонастройки коэффициентов ПИД-регулятора с применением аппарата нечеткой логики и задание уставки давления выхода осуществляется при помощи интерфейса RS-485 по протоколу Modbus RTU.

Используя математическое описание нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов, произведена оценка качества процесса регулирования давления. Для наглядного представления произведен эксперимент по поддержанию заданной уставки при изменении входного давления узла редуцирования с 30 кг/см<sup>2</sup> до 70 кг/см<sup>2</sup>. Основным критерием, предъявляемым к данным САР, являлось минимальное время достижения заданной уставки, а также минимальное значение перерегулирования при изменяющемся входном давлении (рисунки 9, 10).

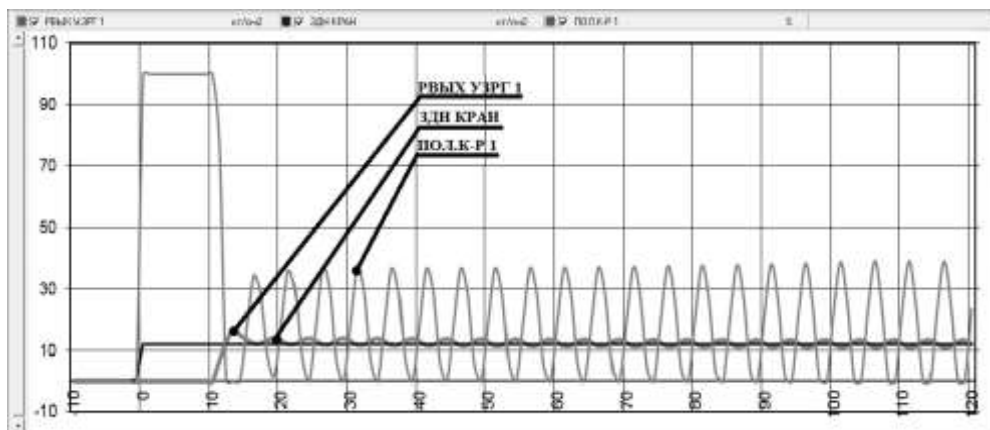


Рисунок 9 - Графики переходных процессов классического ПИД-регулятора после изменения входного давления с 30 кг/см<sup>2</sup> до 70 кг/см<sup>2</sup>

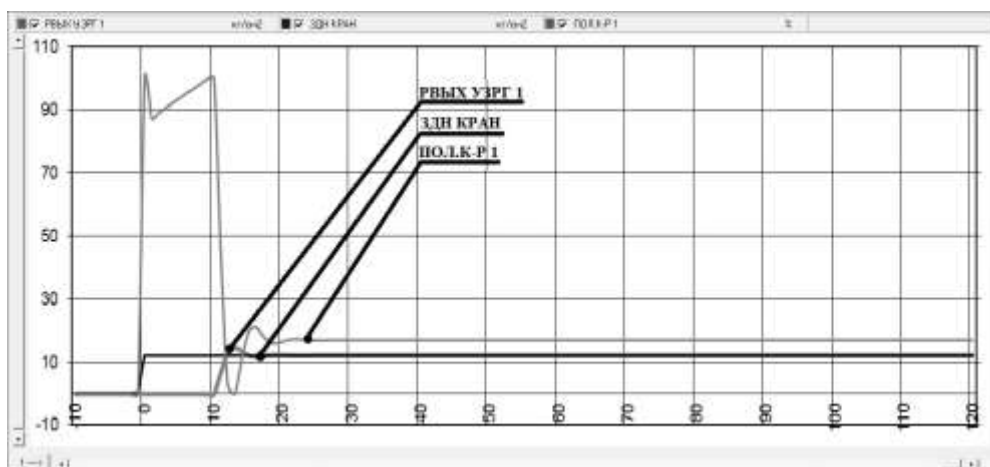


Рисунок 10 – Графики переходных процессов нечеткого ПИД-регулятора после изменения входного давления с 30 кг/см<sup>2</sup> до 70 кг/см<sup>2</sup>

Из сравнительного анализа графиков переходных процессов на рисунках 9 и 10 видно, что полученные результаты позволили сократить время достижения заданной уставки в 12,9 раз, уменьшить перерегулирование на 24,5 %. Также стоит отметить, что суммарное время перемещения регулирующего органа эквивалентно 16,83 циклов «открытие – закрытие» для классического ПИД – регулятора и 1,53 для нечеткого ПИД – регулятора с автоподстройкой коэффициентов.

## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Произведен анализ процесса транспортировки природного газа как объекта автоматизированного управления, традиционных способов и режимов редуцирования давления газа. Определены проблемы корректности настройки клапанов-регуляторов, обусловленные нелинейностью модели УРГ и недостаточной полнотой информации об объекте управления. Обоснована необходимость разработки АСУ, позволяющей обеспечить требуемую стабильность параметров технологического процесса.

2. Разработано математическое обеспечение для описания процесса гибридного управления редуцированием газа в структуре АСУ, отличающееся учетом постоянного возмущающего воздействия на объект управления и повышающее точность за счет разработанных правил. Разработаны базы правил для подстройки коэффициентов ПИД – регулятора с применением аппарата нечеткой логики, использующей следующие критерии: время достижения 10 % от заданного значения; время нарастания (достижения 90 % от уставки); превышение заданного значения (перерегулирование).

3. Разработаны структурные схемы автоматизированного управления редуцирования газа с использованием четырех типов регуляторов. В результате произведенного сравнительного анализа переходных характеристик различных принципов нечеткого управления выявлено, что оптимальным выбором является применение гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов. Данный тип регулятора позволяет сократить время переходного процесса, уменьшить перерегулирование, устранить автоколебания, а также повышает робастность ПИД-регулятора во всех диапазонах регулируемой величины.

4. Разработан метод определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления, позволяющий учитывать технологические и конструкционные ограничения, накладываемые на процесс и производить расчет настроечных коэффициентов, что ведет к повышению эффективности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов

5. Разработаны алгоритмы управления регулирующими клапанами и программное обеспечение для управления гибридным нечетким ПИД-регулятором с автоподстройкой коэффициентов, которые позволили реализовать предложенные структурные схемы принципов нечеткого управления и обеспечить практическое использование результатов, полученных в диссертационной работе.

6. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанных математических моделей и алгоритмов автоматизированного управления процессом редуцирования давления газа. Разработанный гибридный нечеткий ПИД-регулятор с автоподстройкой коэффициентов позволяет снизить перерегулирование на 24,5 %, добиться поддержания заданного давления на выходе УРГ, а также уменьшить количество циклов «открытие-закрытие» клапана при выходе на уставку в 11 раз.

## **Список работ, опубликованных автором**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Крюков, В.В.** Управление редуцированием газа в магистральных газопроводах высокого давления с применением аппарата нечеткой логики / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 55-65.

2. **Крюков, В.В.** Управление процессом редуцирования газа в магистральных газопроводах / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2019. – №3 (63). – С. 35-46.

3. **Крюков, В.В.** Редуцирования давления газа на линейной части магистральных газопроводов / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 6. – С. 37-43.

### **Свидетельства о регистрации программ:**

4. **Крюков, В.В.** Программа управления нечетким ПИД-регулятором давления / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021614238, 22.03.2021. Заявка № 2021613429 от 19.03.2021.

### **Публикации в других изданиях:**

5. **Крюков, В.В.** Внедрение автоматической системы контроля уровня жидкости в термоконтейнере / В.В. Крюков // Молодежные инновации повышения эффективности и надежности транспорта газа. Материалы XVI отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2015 – С.36-39.

6. **Крюков, В.В.** Повышение надежности и функциональности системы линейной телемеханики за счет реструктуризации направлений опроса контроллеров КП / В.В. Крюков // Молодежные инновации повышения эффективности и надежности транспорта газа. Материалы XVII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2016. – С.47-49.

7. **Крюков, В.В.** Применение нечеткой логики в процессе управления редуцированием газа в магистральных трубопроводах / В.В. Крюков // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. Материалы IX Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов. – Пермь: Издательство Пермского национального политехнического университета, 2017. – С. 122-126.

8. **Крюков, В.В.** Повышение надежности и функциональности САУ ГРС за счёт интеграции ПО САУ подогревателя газа БПГ-10 / В.В. Крюков // Инновационные молодежные проекты – вектор развития профессиональной культуры. Материалы XVIII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2017. – С.17-20.

9. **Крюков, В.В.** Реализация информационного взаимодействия SCADA модулей SIMATIC WINCC и ZOND 2006, как средство резервирования передачи данных САУ ГИС НА ДП ЛПУМГ / В.В. Крюков // Перспективный диалог: решение актуальных задач оптимизации технологических процессов и повышение надежности транспорта газа. Материалы XIX отраслевой научно-технической



конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2018. – С.28-29.

10. **Крюков, В.В.** Внедрение интеллектуальной системы контроля прохождения ОУ (очистного устройства) на ЛЧ МГ / В.В. Крюков // Полувековые традиции – современные технологии. Материалы XX отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2019. – С.29-31.

11. **Крюков, В.В.** Применение аппарата нечеткой логики для управления процессом редуцирования газа на магистральных газопроводах / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 275-летию Оренбургской губернии и 85-летию Оренбургской области. – Оренбург: ООО «Фронтир», 2019. – С. 137-141.

12. **Крюков, В.В.** Применение аппарата нечеткой логики для подстройки коэффициентов ПИД-регулятора давления газа / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – 2021. – С. 323-324.

13. **Крюков, В.В.** Внедрение программного модуля автоматизированного отключения участка газопровода в случае возникновения аварийных ситуаций / В.В. Крюков // Материалы XIII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2022. – С.29-31.