

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

*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)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
**Тугов Виталий Валерьевич**

Оренбург 2024

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 6  |
| 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА КАК<br>ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ .....  | 13 |
| 1.1 Характеристика схем газотранспортной системы .....   | 13 |
| 1.2 Особенности работы узлов редуцирования давления газа .....   | 23 |
| 1.3 Современное состояние автоматизации процесса транспортировки<br>природного газа .....  | 29 |
| 1.4 Основные недостатки конструкций, типов и законов регуляторов,<br>применяемых на узле редуцирования газа линейной части магистрального<br>газопровода ..... | 33 |
| 1.5 Постановка задачи управления процессом транспортировки газа .....  | 35 |
| 1.6 Применение систем гибридного управления на основе объединения<br>классической и нечеткой моделей объекта управления .....                                  | 42 |
| Выводы по первой главе .....   | 52 |
| 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА<br>КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ .....  | 54 |
| 2.1 Разработка математического описания процесса управления<br>редуцированием газа с применением нечеткой логики .....   | 54 |
| 2.2 Описание процесса управления редуцированием газа ПИД-регулятором с<br>табличной автонастройкой .....   | 60 |
| 2.3 Математическое описание процесса ПИД-регулирования редуцирования<br>газа с применением аппарата нечеткой логики .....                                      | 63 |
| 2.4 Математическое описание гибридного нечеткого управления процессом<br>редуцированием газа .....   | 69 |
| Выводы по второй главе .....   | 77 |
| 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАЗРАБОТАННЫХ<br>ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ<br>РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА .....                              | 79 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.1 Исследование регулятора на нечеткой логике .....  | 79         |
| 3.2 Исследование адаптивного регулятора с табличной автонастройкой.....   | 84         |
| 3.3 Исследование процесса ПИД-регулирования с применением аппарата<br>нечеткой логики .....                         | 85         |
| 3.4 Исследование нечеткого гибридного регулятора .....  | 89         |
| 3.5 Имитационная апробация различных типов регуляторов .....  | 95         |
| 3.6 Метод определения параметров гибридного нечеткого управления<br>редуцированием газа.....                        | 96         |
| Выводы по третьей главе.....  | 100        |
| <b>4 АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКОГО ПИД-<br/>РЕГУЛЯТОРА С АВТОПОДСТРОЙКОЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ.....</b>     | <b>102</b> |
| 4.1 Разработка и расчет принципиальной схемы программируемого<br>логического контроллера на базе AVR ATMEGA32 ..... | 102        |
| 4.2 Интеграция гибридного нечеткого ПИД-регулятора в систему<br>линейной телемеханики «Магистраль-21» .....         | 107        |
| 4.3 Апробирование результатов на узле редуцирования газа .....  | 109        |
| Выводы по четвертой главе.....  | 117        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>118</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>   | <b>120</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А БЛАГОДАРСТВЕННЫЕ ПИСЬМА, ДИПЛОМЫ .....</b>  | <b>133</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ<br/>РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....</b>                          | <b>143</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИМ ПИД-<br/>РЕГУЛЯТОРОМ ДАВЛЕНИЯ.....</b>                                | <b>144</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ<br/>ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>                             | <b>178</b> |

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место

АПД – аппаратура передачи данных

АСУ – автоматизированная система управления

АСР – автоматическая система регулирования

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

ВАК – высшая аттестационная комиссия

ГИС – газоизмерительная станция

ГКС – головная компрессорная станция

ГНАСУ – гибридная нечеткая система автоматизированного управления

ГРС – газораспределительная станция

Д – датчик

ДП – диспетчерский пункт

ЕСГ – единая система газоснабжения

ЖД – железная дорога

З – задатчик

ИМ – исполнительный механизм

КЗОУ – камера запуска очистных устройств

КП – контролируемый пункт

КПОУ – камера приема очистных устройств

КС – компрессорная станция

ЛЧМГ – линейная часть магистрального газопровода

ЛПУ – линейно-производственное управление

МГ – магистральный газопровод

ОГУ – Оренбургский государственный университет

ООО – общество с ограниченной ответственностью

ОУ – очистное устройство

П – регулятор – пропорциональный регулятор

ПАО – публичное акционерное общество

ПИ – регулятор – пропорционально-интегральный регулятор

ПИД – регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

ПЛК – программируемый логический контроллер

ПО – программное обеспечение

ППУ – промежуточный пункт управления

ПУ – пункт управления

ПХГ – подземное хранилище газа

P – регулятор

РО – регулирующий орган

РФ – Российская Федерация

САУ – система автоматизированного управления

СКП – спутниковый контролируемый пункт

СЛТМ – система линейной телемеханики

СППК – сбросной пружинно-предохранительный клапан

СТО – стандарт организации

ТАУ – теория автоматического управления

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

ТП – технологический процесс

УРГ – узел редуцирования газа

УСО – устройство сопряжения с объектом

ST (Structured Text) – структурированный текст

SCADA – supervisory control and data acquisition (система диспетчерского управления и сбора данных)

HMI (human-machine interface) – человеко-машинный интерфейс

## Введение

**Актуальность темы диссертационной работы.** 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 %.

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 допустимого, 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-регулирования, 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 по ПИД-закону, 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.

#### **Содержание работы.**

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

**В первой разделе** дана характеристика газотранспортной системы, а также выполнен анализ современного состояния автоматизации процесса транспортировки природного газа. Выявлены основные недостатки АСУ, применяемые на УРГ линейной части магистрального газопровода. Установлено, что УРГ имеет нелинейную модель и как следствие возникает проблема корректности настройки клапанов-регуляторов, обеспечивающих функцию поддержания заданного давления. Применяемый ПИД регулятор не всегда может обеспечить необходимую точность управления редуцированием газа, а поэтому, с целью снижения перерегулирования, необходимо вводить дополнительные изменения в настройки коэффициентов регулятора зависящие от изменения давления на входе.

**Во втором разделе** на основе технологической схемы редуцирования давления газа произведено математическое описание процесса с использованием нечеткого алгоритма Мамдани (Mamdani). На основе анализа функционирования автоматизированной системы управления УРГ предложено применить метод адаптации «табличная автонастройка». Представлена разработанная функциональная

схема данного регулятора давления газа и алгоритм функционирования. Описан метод регулирования с применением аппарата нечеткой логики и процесс функционирования нечеткой экспертной системы, определяющей оптимальные настройки ПИД-регулятора для его адаптации к объекту управления, используя ошибку регулирования, а также ее интегральную и дифференциальную составляющую по времени.

**В третьем разделе** произведен сравнительный анализ апробации работы системы по трем законам регулирования, который показал, что при наличии в системе дестабилизирующих факторов, таких, как динамическое входное давление узла редуцирования, применение классического закона ПИД-регулирования является нецелесообразным. Представлено описание разработанного гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов, который при подаче задающего воздействия (уставки) оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качества.

**В четвертом разделе** представлена разработанная принципиальная схема ПЛК на базе микроконтроллера AVR ATMEGA32. Описан алгоритм и программное обеспечение на языке Си, предназначенное для управления клапанами – регуляторами высокого давления. Приведены результаты экспериментальных исследований на реальном объекте. Выполнена сравнительная оценка качества регулирования.

**В заключении** представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования.

# **1 Анализ процесса транспортировки природного газа как объекта управления**

В данном разделе приводятся результаты аналитических исследований, совместно с научным руководителем, доктором технических наук В.В. Туговым [39]. Личное участие соискателя заключается в анализе процесса транспортировки природного газа как объекта автоматизированного управления, способов и режимов редуцирования давления газа и выявлении основных недостатков в функционировании АСУ УРГ, использующих классические законы управления с целью постановки задач улучшения качества производственного процесса. Доля личного вклада автора составляет 80 %.

## **1.1 Характеристика схем газотранспортной системы**

В России сконцентрировано около 30 % доказанных и более 40 % прогнозируемых общемировых запасов природного газа. Но имея такие запасы Российская Федерация все же отстает от некоторых стран по уровню газификации населения. Оценивая мировой опыт газификации можно сделать вывод, что она является одним из главных средств способствующей повышению эффективности экономики, что в свою очередь ведет к решению различных социальных проблем. Вообще общемировая тенденция связана с постоянно возрастающим потреблением газа. Так же, с учетом сегодняшних реалий, прогнозируется значительное увеличение спроса на природный газ Азиатских странах и Китая. Учитывая эти факторы, эксперты советуют о необходимости доведения добычи газа в стране к концу 2023 года до цифры в 900 млрд м<sup>3</sup>. Только такие объемы добычи могут способствовать повышению уровня газификации, развитию газовой промышленности страны, а также модернизации смежных отраслей промышленности [28].

Газификация регионов России – одно из самых амбициозных и социально значимых направлений работы ПАО «ГАЗПРОМ» на внутреннем рынке страны. Это способствует социально-экономическому развитию регионов РФ и повыше-

нию 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 % [59] (рисунок 1.1).

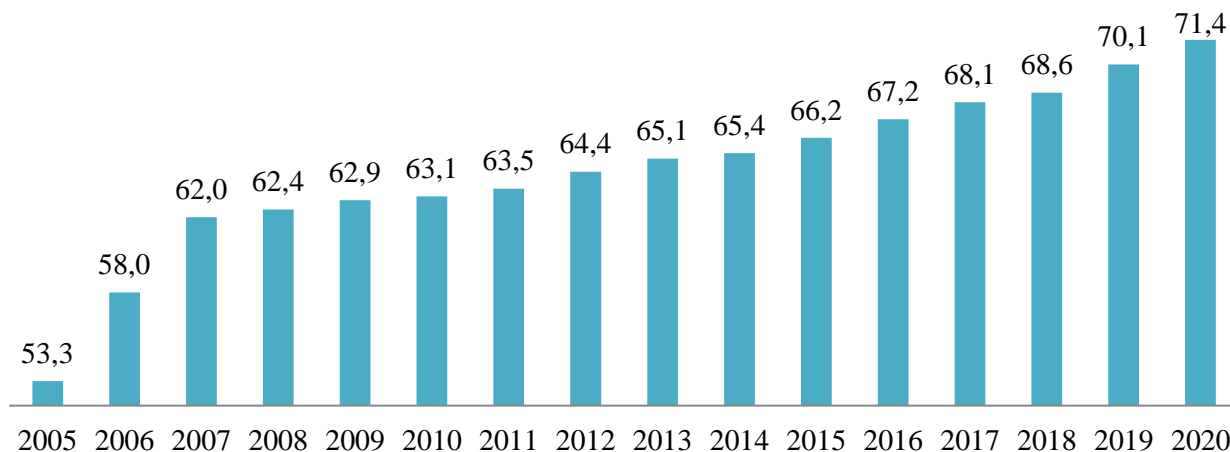


Рисунок 1.1 – Уровень газификации природным газом в России (по итогам года), %

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 тысяч населённых пунктов, что обеспечит рост в 2,7 раза [103].

Как известно достаточно большие запасы газа и нефти сосредоточены на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири. Однако, из-за того, что в этих районах газ содержит большое количество различных химических элементов, его можно использовать в качестве топлива только после глубокой переработки на газохимических комплексах. Поэтому там создаются мощные комплексы по производству и переработке природного газа и нефти, что способствует значительному увеличению поставок газа и газохимической продукции в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, и ведет к пополнению доходов государственного бюджета [61].

Газ, добытый из скважин, прежде чем транспортировать к потребителю (химзаводы, ТЭЦ, население и другие объекты) необходимо подготовить, то есть

очистить [17]. Очистка газа связана с тем, что в нём кроме целевых компонентов (так как может быть наличие разных компонентов в газе, которые предназначены разным потребителям), имеются примеси вызывающие значительные трудности, связанные с транспортировкой и использованием. Например, при наличии водяного пара в газе образуются гидраты, они конденсируются при определенных условиях, скапливаются и образуют заторы (например, в изгибах трубопроводной арматуры), что препятствует транспортировке газа [28].

Транспортировка газа – ответственная процедура, поскольку это вещество горючее и взрывоопасное. Требуется соблюдение определенных правил для его выполнения. Существует несколько способов транспортировки природного газа (рисунок 1.2) [6]:



Рисунок 1.2 – Способы транспортировки природного газа

- транспортировка при помощи трубопроводов;
- транспортировка при помощи автомобильных и железнодорожных цистерн;

– транспортировка морскими судами (танкерами).

Они имеют свои преимущества и недостатки.

Трубопроводный транспорт газа имеет главное преимущество – невысокую стоимость. Кроме того, есть и другие его достоинства [32]:

- газ движется внутри трубы с большой скоростью, поэтому вовремя доставляется в самые отдаленные участки;
- система трубопроводов обеспечивает бесперебойную работу;
- газ теряется в минимальном количестве при транспортировке;
- вещество движется в автоматическом режиме;
- система достаточно проста в использовании;
- остальные виды транспорта разгружаются.

Недостатки:

- осуществляется потеря энергии, которая расходуется на преодоление трения о стенки трубопровода;
- огромные средства тратятся не только на строительство трубопроводов, но и на их эксплуатацию;
- отсутствует возможность транспортировки сжиженного газа по таким трубопроводам;
- после продолжительного использования системы, ее эффективность снижается;
- изначально спроектированный и построенный маршрут очень сложно изменить, поэтому в случае поломки трубопровода придется вложить большие средства в его ремонт.

При транспортировке газа с помощью цистерн, его необходимо перевести в сжиженное состояние, при этом максимально соблюдаются требования технической безопасности [7, 66]. Так как любая, даже не значительная на первый взгляд, аварийная ситуация, например, связанная с неисправностью транспорта может привести к большой катастрофе из-за того, что газ легко воспламеняется.

Прежде чем подать в цистерну газ подвергают сжатию. Затем его транспортируют с учетом строгих регламентов. Но эта транспортировка имеет ряд существенных недостатков, связанных с:

- повышенной опасностью для авто водителей цистерн;



- возможностью транспортировки только небольшого, строго ограниченно-го объема газа;
- необходимостью поддержания транспортного средства в идеальном состоянии;
- дороговизной перевозок.

Такой способ лучше всего использовать при транспортировке газа на небольшие расстояния.

Способ перевозки топлива танкерами считается одним из самых распространенных. Танкер – это специальное судно, которое перевозит сжиженный газ. При этом его температура находится в пределах - 160 °С, для достижения таких показателей требуются устройства с воздушным охлаждением. Сжатие вещества может превосходить более чем в 600 раз его первоначальный объем [17].

Данный способ имеет следующие преимущества:

- газ в сжиженном состоянии менее опасен, а также удобен в хранении;
- транспортировка имеет минимальную стоимость;
- огромная пропускная способность моря. Нет ограничения по диаметру, как у трубопроводов;
- морская поверхность может легко выдержать сотни танкеров, объемы которых насчитывают миллионы кубометров газа;
- возможна доставка газа в регионы, в которых трубопроводов не имеется, а автомобильный транспорт слишком дорог или вообще невозможен.

Однако у этого способа также есть определенные недостатки:

- сырье движется достаточно медленно, что может привести с существенным издержкам связанных с опозданием;
- при доставке небольшого количества сжиженного газа, тоннаж судна используется частично, что ведет дополнительным расходам;
- чаще всего в обратном направлении танкеры идут пустыми.

Поэтому основным способом транспортировки природного газа на данный момент остается трубопроводный транспорт. Общая схема трубопроводной газотранспортной системы показана на рисунке 1.3.

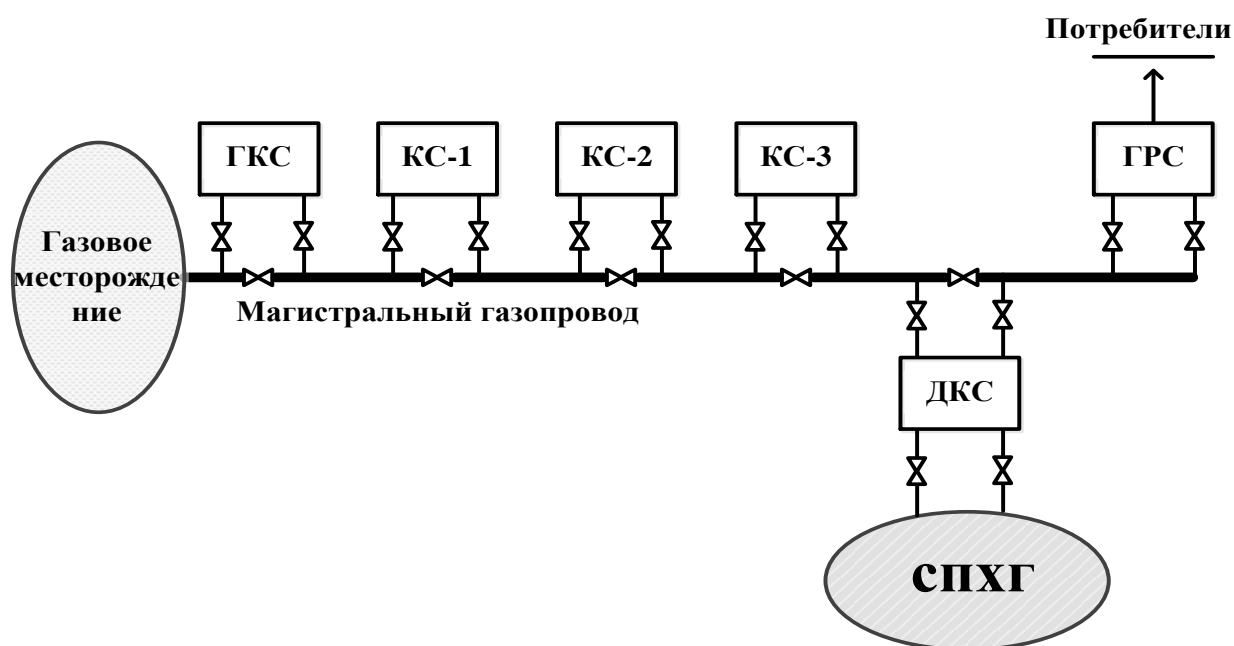


Рисунок 1.3 – Общая схема трубопроводной газотранспортной системы

Из скважины газ проходит в начале фильтр-сепараторы с целью отделения из него жидких и твердых механических примесей. Далее он движется по газопроводу в коллекторы, а затем на промышленную газораспределительную станцию (ГРС). В ГРС газ претерпевает более тонкую очистку с применением пылеуловителей, осушителей, подвергается одорированию, его давление снижают до требуемого значения, которое установлено в магистральном газопроводе. Пластового давления достаточно для начального периода транспортировки газа [6]. После снижения давления в пласте необходимо строить головную компрессорную станцию (ГКС). Также применяются промежуточные компрессорные станции (ПКС), которые располагаются примерно через 150 км. При ремонте используется линейная запорная арматура, она устанавливается через каждые 25 км [8, 28].

На конце линейной части газопровода всегда располагается ГРС (или несколько ГРС), которая подает газ потребителю (например, в город или в промышленный узел). Система магистральной транспортировки газа от месторождений к потребителям достаточно жесткая, в связи с тем, что ее аккумулирующая способность небольшая и лишь частично покрывает суточное неравномерное потребление. Для покрытия сезонной неравномерности потребления газа сооружаются подземные хранилища. Конструкция магистральных газопроводов представляет

собой стальные трубы диаметром до 1420 мм, соединенных сваркой. Трубы производятся из высококачественных углеродистых и легированных сталей. Эксплуатация труб большого диаметра увеличивает эффективность газотранспортной системы. Газопроводы рассчитаны на максимально разрешенное давление в 7,5 МПа, которое получается на выходе компрессорной станции [67].

В состав единой системы газоснабжения (ЕСГ) РФ входят:

- 160,4 тыс. км – это магистральные газопроводы и газопроводы-отводы;
- 215 шт. – это линейные компрессорные станции с общей мощностью газоперекачивающих агрегатов в 42 тыс. мВт;
- 6 шт. – это комплексы, связанные с переработкой газа и газо-конденсата;
- 25 шт. – это объекты подземного хранения газа (ПХГ).

Линейная часть магистрального газопровода (ЛЧМГ) – это соединенные между собой в газопровод трубы, служащие для объединения компрессорных станций (КС) для транспортировки газа от промысловых месторождений к потребителям.

Структура линейной части магистрального газопровода состоит из:

- газопровод с ответвлениями, перемычками и лупингами, запорной и регулирующей арматурой, переходами через естественные и искусственные преграды;
- узлы редуцирования давления газа (УРГ);
- камеры запуска и приёма очистного устройства (КЗОУ, КПОУ);
- газораспределительные и газоизмерительные станции (ГИС).

В состав магистрального газопровода входят непосредственно трубопроводы, а также все ответвления, лупинги и т.д. Крановые узлы, установленные на ЛЧМГ необходимы для отсечения конкретных участков трассы при выводе их в ремонт. Их устанавливают каждые 25 км вместе с обвязкой, состоящей из байпасных и свечных крановых узлов [67]. Крановые узлы также устанавливаются на газопроводах-отводах, перед различными преградами, воздушных или подводных переходах и т.д. (рисунок 1.4).

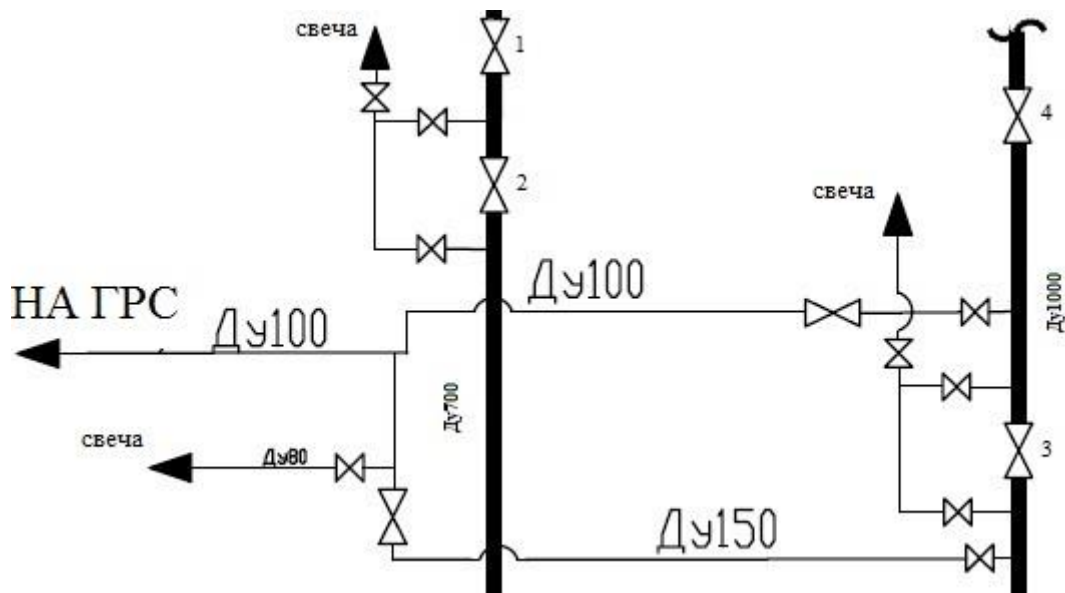


Рисунок 1.4 – Технологическая схема обвязки линейной части магистрального газопровода

Крановые узлы имеют ручной, пневматический или пневмогидравлический привод. Рядом с ними устанавливаются продувочные свечи. Свечные краны необходимы для стравливания отключённого участка во время проведения регламентных работ.

Также на ЛЧМГ устанавливаются камеры запуска (приема) очистных устройств (ОУ) [39]. Очистные устройства служат для очистки внутренней полости трубопровода. В состав данных устройств входят: узлы запуска и приема очистных и диагностических поршней, система линейной телемеханики, для автоматизированного управления и контроля процесса [67]. Технологическая схема узла приема очистного устройства изображена на рисунке 1.5

На начальном участке магистрального трубопровода монтируется камера запуска очистного устройства, а в конце участка – камера приема, в промежуточных точках газопровода – комбинированные камеры приема и запуска.

ГИС входят в состав линейной части магистральных газопроводов и обеспечивают коммерческий учет газа потребителями. ГИС устанавливается на линейной части магистрального газопровода (на обводной линии) на максимально возможном удалении от компрессорных станций с целью уменьшения влияния

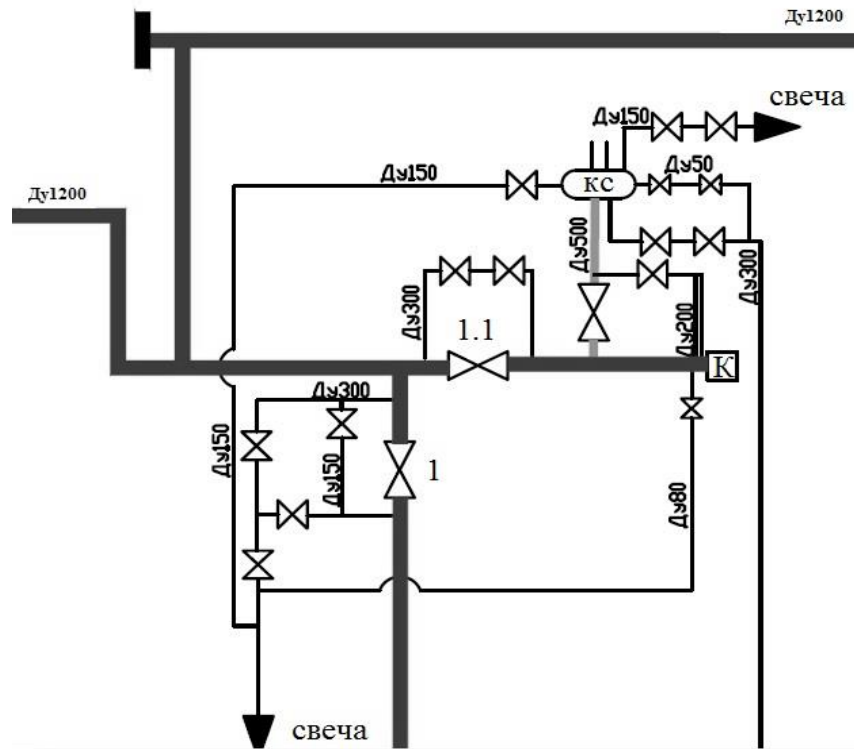


Рисунок 1.5 – Технологическая схема камеры приема очистного устройства

возмущений и пульсаций, вызванных работой газоперекачивающих агрегатов (ГПА) установленных на компрессорной станции [67,81]. Узел учета газа, как правило, состоит из ниток учета с установленными на них счетчиками газа (рисунок 1.6).

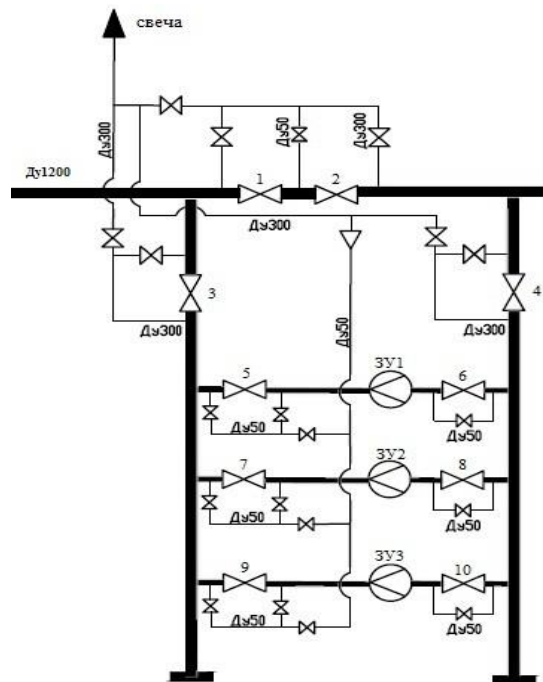


Рисунок 1.6 – Технологическая схема ГИС

Также в состав основных составных частей магистрального газопровода входят УРГ [19]. Они необходимы для поддержания заданного давления, в основном при перепуске газа между газопроводами с различным максимально разрешенным давлением. Обычно УРГ высокого давления включает в свой состав основные и резервные (обводные) линии (рисунок 1.7).

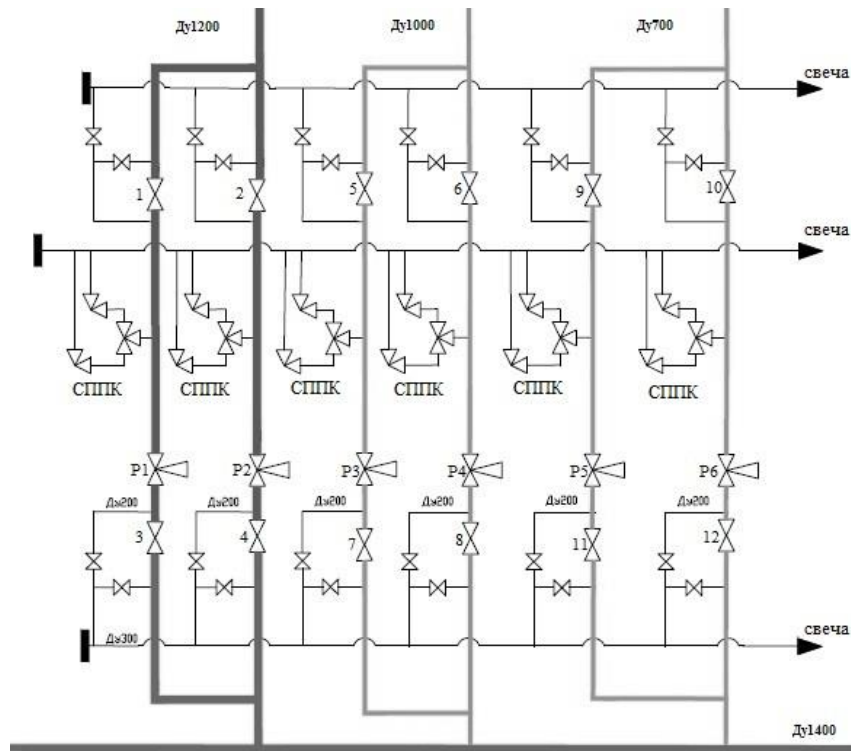


Рисунок 1.7 – Технологическая схема УРГ

На линиях устанавливаются отсечные шаровые краны с байпасными и свечными крановыми узлами, служащими для плавного выравнивания давления газа до и после кранового узла, а также непосредственного стравливания газа в атмосферу. Сбросные пружинные предохранительные клапаны (СППК), предназначены для защиты газопровода от превышения допустимого давления и возникновения аварий [26].

Поддерживают заданное давление в трубопроводе регуляторы. Именно от функционирования данных устройств в целом зависит качество процесса редуцирования, а также безаварийная работа всей системы.

## 1.2 Особенности работы узлов редуцирования давления газа

Узел редуцирования давления газа – это система для снижения давления транспортируемого газа в газопроводе до заданного. Основной функцией УРГ является перепуск газа из газопровода с высоким давлением в газопровод с более низким [32].

В состав УРГ линейной части магистрального газопровода входят:

- трубопроводы с регуляторами давления газа и узлами управления, смонтированными на основной и обводной нитке;
- система линейной телемеханики;
- линия связи с диспетчерским пунктом;
- электроснабжение.

На основной и обводной нитке с кранами-регуляторами устанавливают:

- краны с электропневмоприводом;
- краны-регуляторы давления газа;
- сбросные пружинные предохранительные клапаны (СППК);
- байпасные и свечные краны с пневмоприводом;
- емкость импульсного газа.

Схема автоматизации УРГ приведена на рисунке 1.8.

Запорные краны имеют местное и дистанционное управление из диспетчерского пункта линейно-производственного управления (компрессорной станции) по каналам телемеханики. Система линейной телемеханики передает диспетчеру следующие показания:

- сигнализация положения конечных выключателей запорных кранов;
- значения давления и температуры до и после узла редуцирования;
- положение регулирующих клапанов, а также возможность дистанционного задания давления на выходе регулятора.

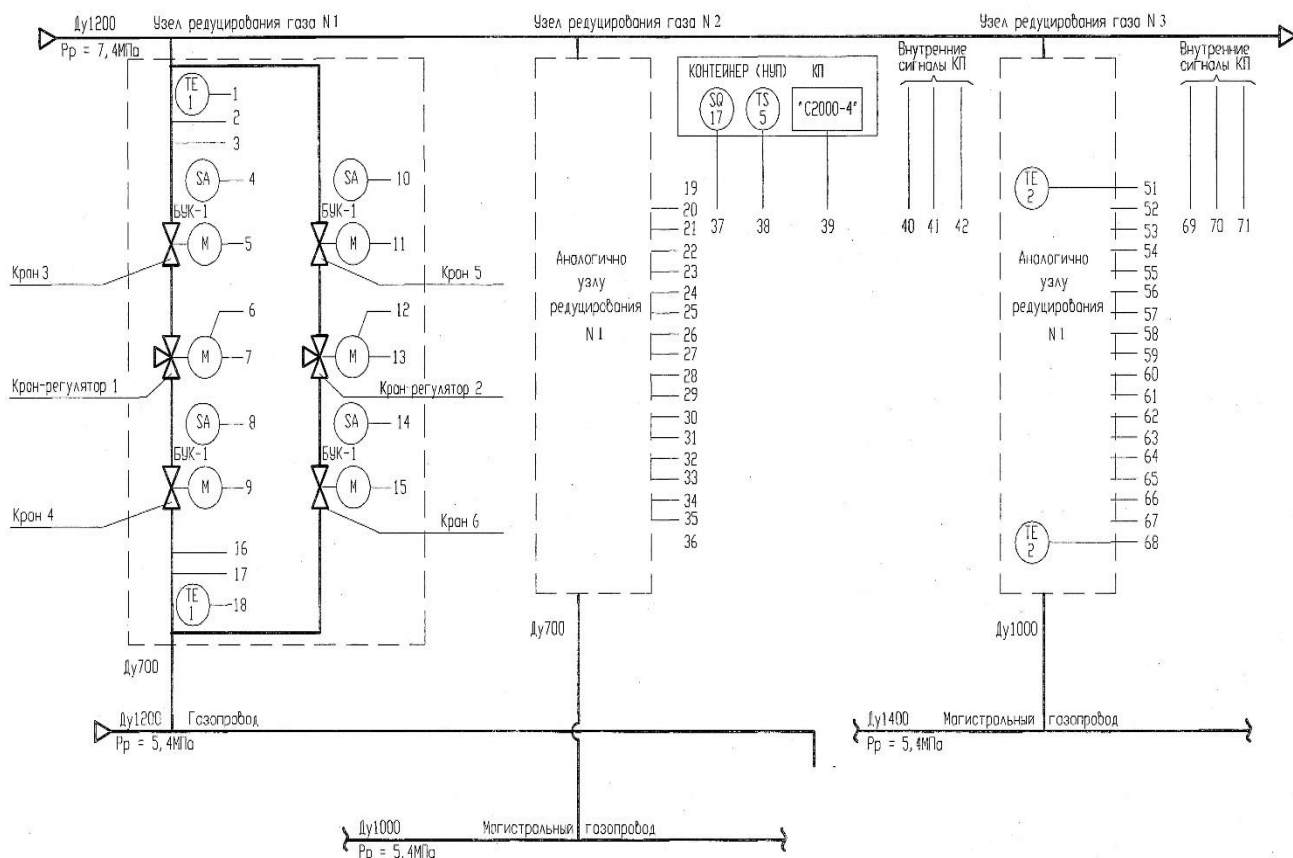


Рисунок 1.8 – Схема автоматизации УРГ

Как уже говорилось выше, основная задача, возложенная на УРГ – это поддержание заданного давления. Данная функция возложена на регуляторы давления газа, от функционирования которых зависит весь технологический процесс в целом [6]. Регулирующий клапан – разновидность линейной трубопроводной арматуры, служащий для непрерывного либо дискретного изменения давления газа посредством уменьшения проходного сечения. На УРГ высокого давления, как правило, применяются запорно-регулирующие клапана, которые позволяют не только регулировать расход подачи газа, но и полностью перекрывать в перемычке циркуляцию среды [19].

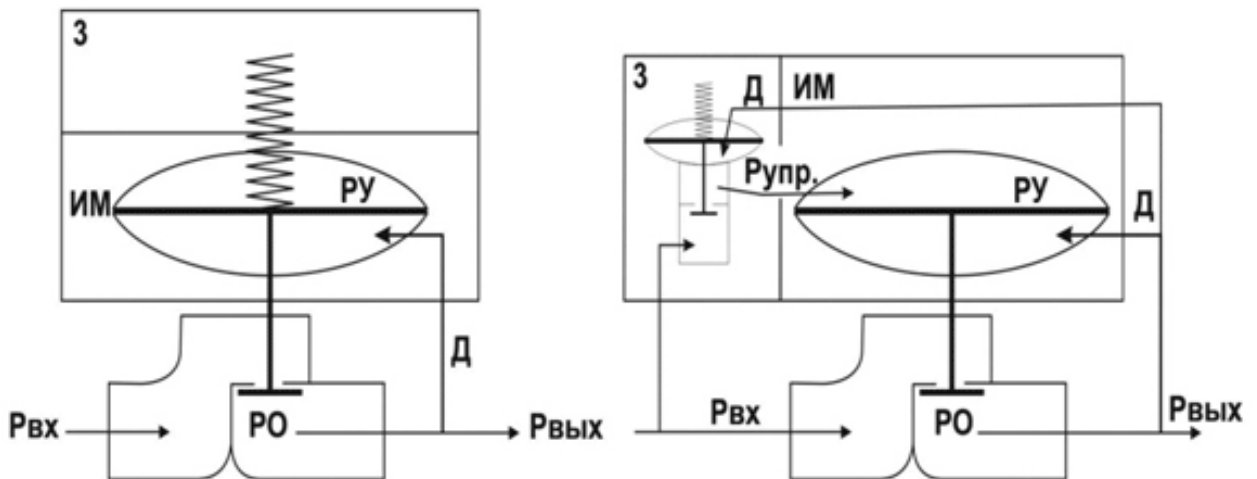
Запорно-регулирующий клапан состоит из совокупности следующих компонентов:

- Д – датчик давления, предназначен для постоянного мониторинга значения регулируемой величины на выходе клапана и подающий сигнал к регулятору;



- З – задатчик давления, предназначен для выработки уставки (заданное значение давления) требуемого выходного давления и передаче ее регулятору;
- Р – регулятор, предназначен для сравнения текущего и заданного значения регулируемой величины по установленному закону регулирования и подачи управляющего сигнала на ИМ;
- ИМ – исполнительный механизм, предназначен для преобразования управляющего сигнала в регулирующее воздействие по перемещению регулирующего органа с использованием энергии рабочей среды [56].

Чаще всего, на практике, в регуляторах в качестве датчика давления газа выступает т.н. «импульс», задатчиком уставки является пружинный механизм или пневмозадатчик, а регулирующее устройство представляет собой мембрану или эластичный затвор [23]. ИМ состоит из части корпуса регулятора и мембраны (эластичного затвора) в качестве разделителя сред, а также регулирующего органа [10]. Схема составных частей регулятора с пружинным и пневматическим задатчиком представлена на рисунке 1.9.



$P_{вх}$  – входное давление;  $P_{вых}$  – выходное давление; Д – датчик; З – задатчик; РУ – регулирующее устройство; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган;  $P_{упр.}$  – управляющее давление

Рисунок 1.9 – Схема составных частей регулятора с пружинным и пневматическим задатчиком

Однако в связи с растущими требованиями к решению проблем регулирования от данного вида клапанов-регуляторов практически отказались. Новаторским решением стало создание конструкции клапанов осевого типа. Эта конструкция обеспечила спрямленное осесимметричное, не встречающее препятствий течение рабочей среды между наружным и внутренним корпусом клапана. За прошедшие десятилетия регулирующие клапаны осевого типа заняли лидирующее положение во всех отраслях промышленности, связанных с добычей, переработкой, транспортировкой, хранением и сбытом продукции газовой промышленности. Регулирующие клапаны фирмы Mokveld на сегодняшний день являются основными клапанами, устанавливаемыми на линейной части магистральных газопроводах [82].

Регулирующий клапан Mokveld, который используется в качестве исполнительного органа системы регулирования давления газа представляет собой клапан, пневмопривод одностороннего действия (нормально открытый или закрытый) с гидродублирующей системой, а также комплект приборов (приборную часть), который обеспечивает работу клапана в автоматическом режиме. Схема регулирующего клапана представлена на рисунке 1.10.

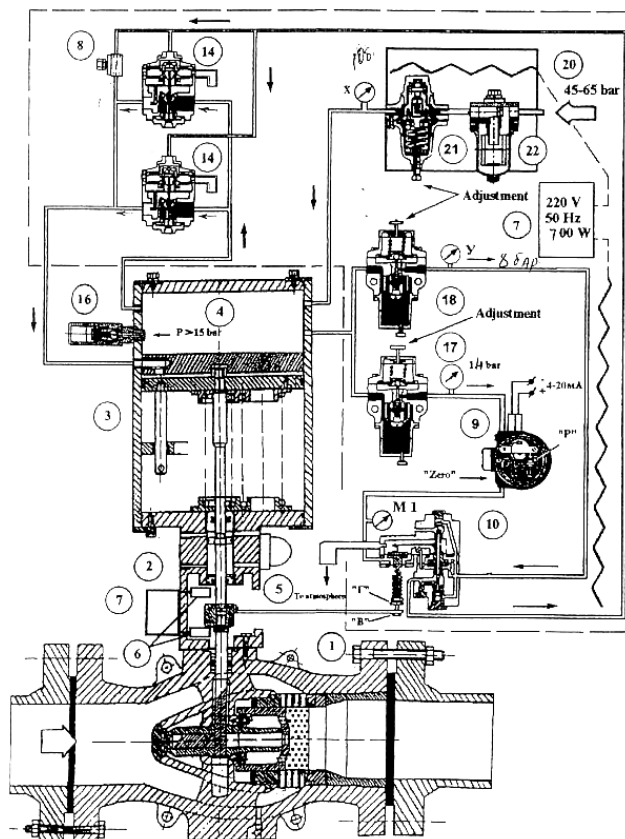


Рисунок 1.10 – Схема регулирующего клапана фирмы Mokveld Valves

При получении управляющего сигнала 20 мА, происходит срабатывание электропневмопреобразователя, который в свою очередь подает пневматический сигнал на позиционер, где он усиливается и попадает на бустер. Бустер, перепуская газ из ресивера на привод пневмопоршня, заставляет его под действием давления газа опускаться вниз, сжимая пружинный механизм. Затем через систему реечного механизма «шток привода – шток клапана» перемещает поршень клапана, уменьшая поток перекачиваемой среды [111]. При снижении уставки управляющего сигнала до 4 мА уменьшается пневматический сигнал и бустеры перекрывают поток рабочей среды из ресивера на привод. Поршень привода, под действием пружинного механизма поднимается вверх, стравливая газ через бустер и позиционер в атмосферу. При подаче электрического сигнала от 4 мА до 20 мА – открытие клапана пропорционально величине сигнала.

Так как регулятор давления газа поддерживает статичное давление в заданной точке газопровода, поэтому система автоматического регулирования рассматривается как «регулятор и объект регулирования (магистральный газопровод)».

Для правильного подбора регулятора давления необходимо обеспечить устойчивость системы «регулятор – газопровод», что связано с способностью системы возвращаться к исходной точке после подачи возмущения.

Регуляторы давления разделяются два типа: «до себя» и «после себя». Как показывает практика в УРГ чаще всего используют регуляторы «после себя» [21].

Также регуляторы давления подразделяются на: астатический И-регулятор (интегральный закон регулирования), статический П-регулятор, (пропорциональный закон регулирования), Д-регулятор (дифференциальный закон регулирования) и сочетании этих законов: ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный закон регулирования), ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный закон регулирования) и издромные ПИД-регуляторы (сочетающий в себе пропорциональный, интегральный и дифференциальный закон регулирования) [25].

Наибольшее применение в УРГ получили ПИД-регуляторы «прямоточные». То есть регуляторы со спрямленным осевым течением, которые составляют 76 % от общего числа регуляторов, установленных на ЛЧМГ. Однако существует про-

блема 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 1.11 [7,18].

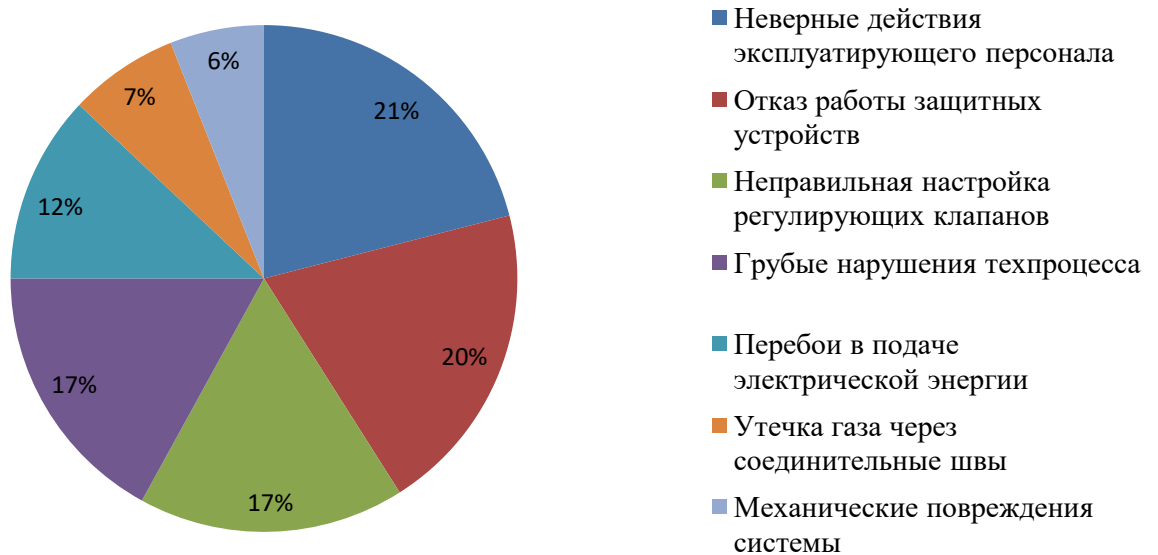


Рисунок 1.11 – Причины появления аварийных ситуаций на УРГ

Как видно из данных одним из основополагающих факторов возникновения аварийных ситуаций является неправильная настройка средств автоматизации, а в частности регулирующих клапанов [18].

Также в процессе эксплуатации выявлены негативные факторы, связанные с работой клапанов-регуляторов, которые заключаются в сложности настройки автоматического режима стабилизации давления и в плохих динамических свойствах (длительные переходные процессы, автоколебания). Все это отрицательно влияет не только на процесс регулирования, но и приводит к поломке механических частей клапанов (рейки, штока, сепаратора, уплотнения) (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Выход из строя механической части клапана

На основании вышеизложенного, можно сделать заключение о том, что применяемый закон управления, не обеспечивает устойчивость работы УРГ и необходимо повысить его эффективность за счет разработки специализированного аппаратно-программного комплекса управления редуцированием газа.

### **1.3 Современное состояние автоматизации процесса транспортировки природного газа**

Магистральные газопроводы проектируют с учетом работы современных средств автоматики и телемеханики, необходимых для обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации оборудования и трубопроводов.

Система линейной телемеханики обеспечивает автоматическое управление технологическим процессом и автоматизированное управление технологическим оборудованием, которое устанавливается на линейной части магистральных газопроводов (ЛЧМГ) и находится на значительном расстоянии от компрессорных станций (КС).

В некоторых случаях, в связи с отсутствием автоматизированной системы управления компрессорной станцией (АСУ КС), системы линейной телемеханики (СЛТМ) могут работать децентрализованно, независимо от основной АСУ КС газотранспортного предприятия [4].

К основным объектам контроля и управления СЛТМ для объектов транспорта и газодобычи относятся:

– крановые узлы: на ЛЧМГ, на перемычках между нитками газопроводов, на газопроводах-отводах, на речных (подводных) переходах, на переходах газопроводов через автомобильные дороги и ЖД пути;

- узлы запуска и приема очистного устройства на ЛЧМГ;
- узлы редуцирования газа (УРГ) на ЛЧМГ;
- газоизмерительные станции (ГИС);
- узлы измерения расхода газа на ЛЧМГ (УЗРГ);
- газораспределительные станции (ГРС);
- станции катодной защиты на ЛЧМГ (СКЗ).

Иногда объектами телемеханизации являются удаленные объекты жизнеобеспечения КС, к которым относятся: водозаборные скважины, очистные сооружения, тепловые сети, различные резервуары, электросети и др.

Все рассмотренные технологические объекты оборудуются средствами локальной автоматики с целью их взаимодействия между собой, а также устройствами сопряжения между объектами управления [3, 4, 54].

Для телемеханизации объектов газовой промышленности, в частности ЛЧМГ, применяют СЛТМ различных фирм производителей. Подавляющее большинство из которых составляют:

- Магистраль-1; Магистраль-2; Магистраль-5; Магистраль-21 (ООО Фирма «Газприборавтоматика») – 37 %;
- СТН-3000 (АО «АтлантикТрансгазСистема») – 33 %;
- ВЫМПЕЛ (НПО «Вымпел») – 12 %;
- УНК-ТМ («НИИИС») – 8 %.

На рисунке 1.13 представлена общая структура СЛТМ на базе «Магистраль-2». Как правило в её состав входят [65]:

- устройства пунктов диспетчерского управления (ПУ ДП);
- аппаратура передачи данных (АПД);
- устройства промежуточных пунктов управления (ППУ);
- устройства контролируемых пунктов: базовые (КП), спутниковые (СКП);

– программное обеспечение (прикладное и системное), предназначенное для поддержания функционирования СЛТМ, так называемые SCADA-модули.

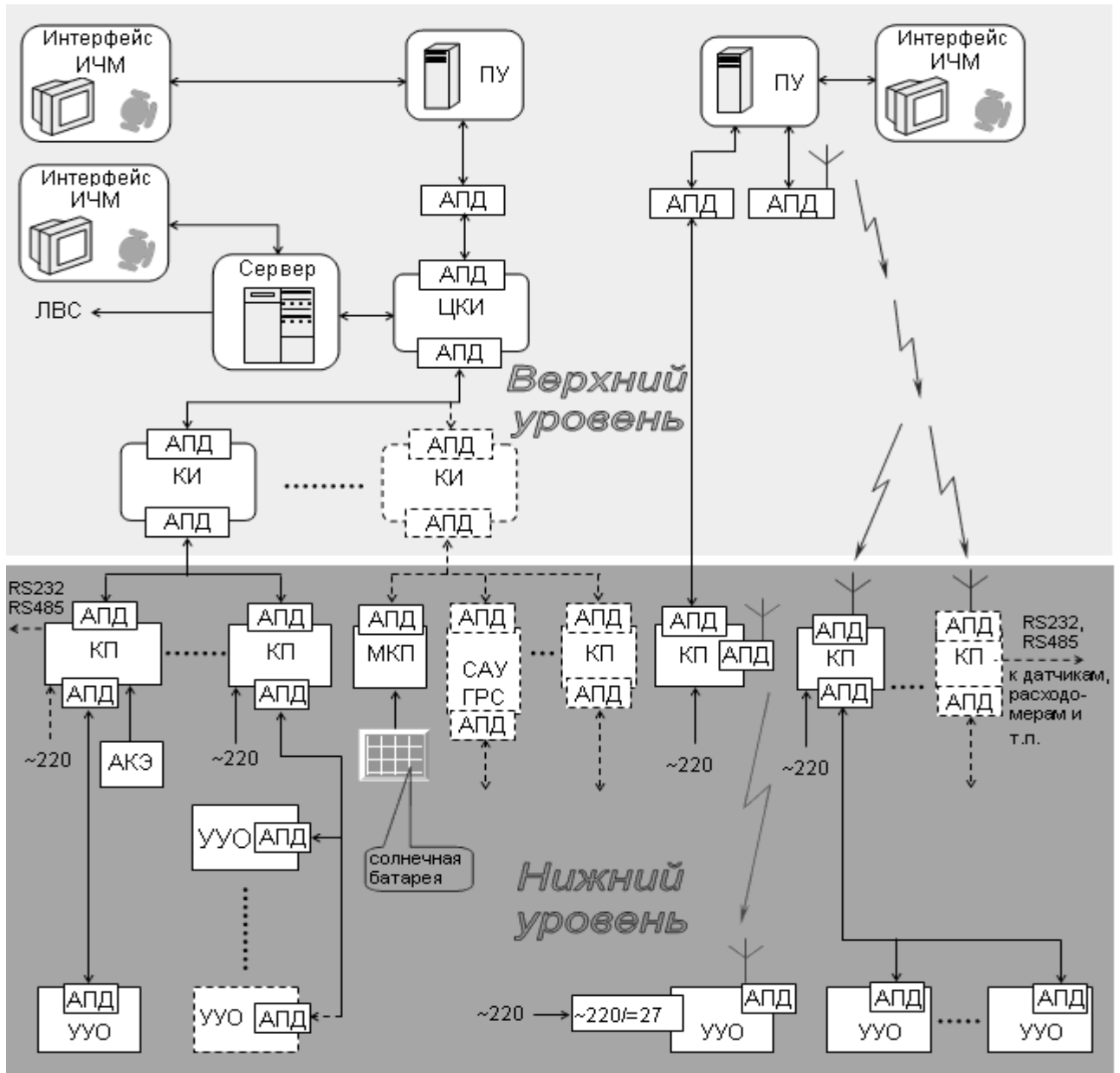


Рисунок 1.13 – Структурная схема СЛТМ «Магистраль-2»

SCADA-система – это хорошо согласованный по функциям и интерфейсам программный продукт [8]. При реализации сетевых систем с применением SCADA используются станции с различным функциональным назначением: серверы, станции-клиенты, станции наблюдения (мониторинга), в основном, для руководящих работников, станции архивирования данных и другие.

В качестве примера на рисунке 1.14 представлена структура задач SCADA модулей семейства «ЗОНД».

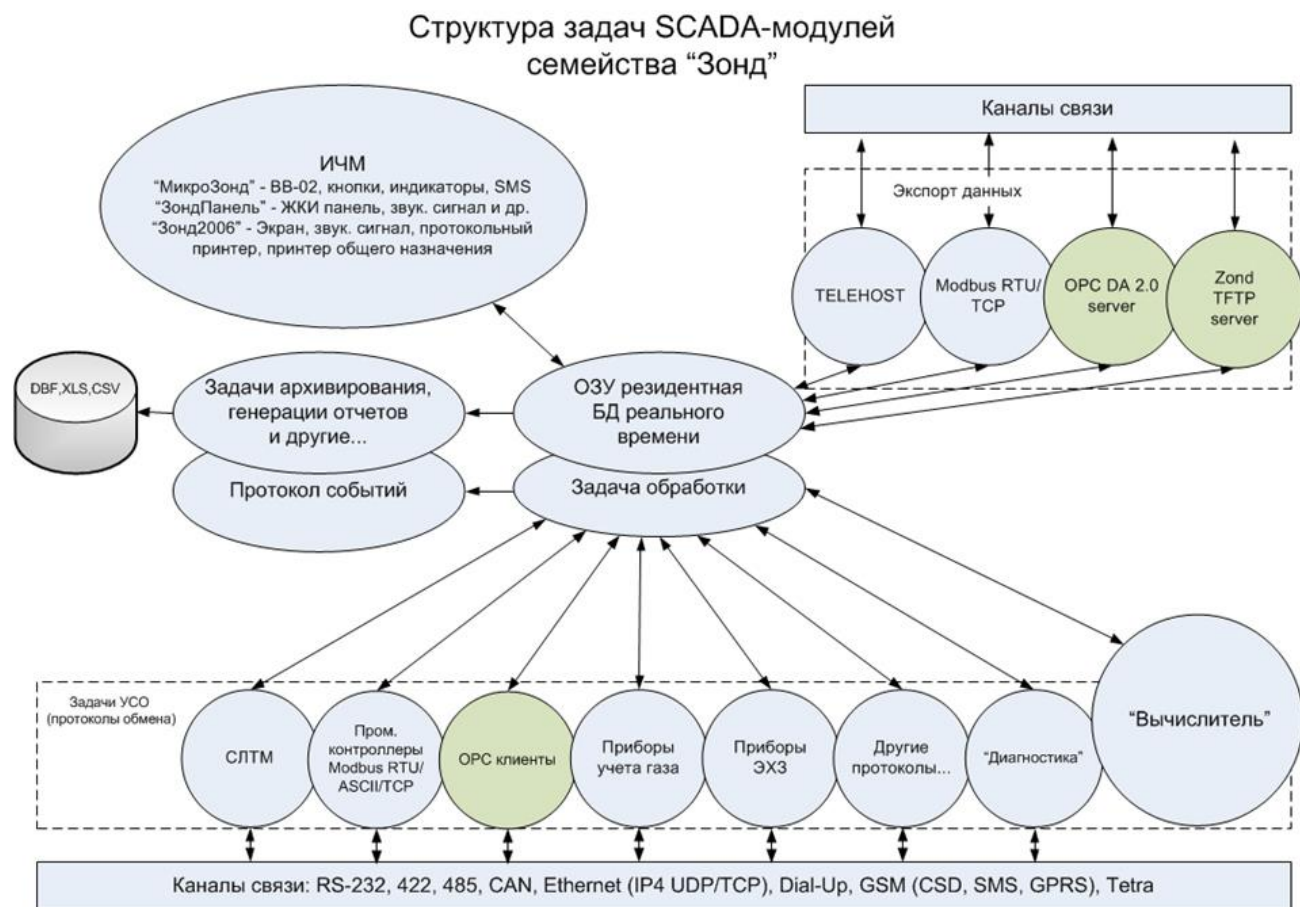


Рисунок 1.14 – Структура задач SCADA модулей семейства «ЗОНД»

Из-за высоких требований, предъявляемых к SCADA-системам, основной перечень их функциональных возможностей достаточно жестко определен и реализуется во многих системах [73] (отличия связаны в основном с техническими особенностями реализации и ценой).

Непосредственное управление технологическими процессами осуществляется с использованием пакетов прикладных программ для РС – совместимых контроллеров:

- 1) ЗОНД (Газприборавтоматика, Россия);
- 2) СПРУТ (Атлантик трансгаз Система, Россия);
- 3) Trace Mode (AdAstrA, Россия);
- 5) Круг2000 (НПФ, Россия) и т.д.



Имея такое многообразие SCADA-систем на рынке возникает проблема, связанная с правильным выбором. Этот выбор относится к сложной задаче, в том случае, когда невозможно предугадать поведение того или иного технологического процесса. Инструментальные средства, заложенные в SCADA-модули производителем [55, 56], не смотря на их многообразие и гибкость, не дают какой-то конкретной, определенной возможности по реализации технологических процессов, протекающих не по заранее смоделированному сценарию. Как правило, в данных ситуациях, требуется применение нестандартного подхода к решению задач по автоматизации.

#### **1.4 Основные недостатки конструкций, типов и законов регуляторов, применяемых на узле редуцирования газа линейной части магистрального газопровода**

В качестве запорно-регулирующих органов на УРГ ЛЧМГ используются клапаны-регуляторы с различным принципом действия. Исходя из практики в их работе отмечаются некоторые негативные факторы, связанные с эксплуатацией данных клапанов, такие как: неисправности механической части привода и системы автоматического управления клапаном-регулятором.

Анализируя их работу, были определены недостатки, связанные с периодическими отказами систем управления, со сложностью настройки режима автоматической стабилизации давления, с отсутствием средств одновременного управления несколькими системами, с неудовлетворительными динамическими свойствами систем (длительные переходные процессы, автоколебания и др.).

Обычно на УРГ в клапанах-регуляторах в качестве системы автоматического поддержания давления применяются неспециализированные электронные регуляторы, например, такие как ТРМ или Минитерм, а также в некоторых случаях электропневматические регуляторы, входящие в средства штатной автоматики регулирующего клапана. Данные системы не могут осуществить полноценное управление процессом редуцирования газа, из-за отсутствия подчиненного конту-

ра для регулирования угла закрытия шарового затвора. Реализованные в них алгоритмы управления, как правило, разрабатываются без учета динамических свойств самого клапана-регулятора. Кроме того, гидравлические и пневмогидравлические приводы не обеспечивают требуемой надежности системы [26].

В целом, на основании вышеизложенного, можно констатировать, несмотря на то, что клапаны-регуляторы имеют высокую надежность, разработанные на их основе средства автоматики не позволяют эффективно управлять параметрами транспортируемого газа, что ведет к необходимости создания специализированного программно-аппаратного комплекса управления процессом редуцирования газа, построенного с учетом специфических свойств самих клапанов-регуляторов.

Для построения адекватной АСУ процессом редуцирования газа на ЛЧ МГ необходимо проведение комплексного исследования проблемы автоматизации клапанов-регуляторов, которое предусматривает разработку математической модели объекта управления (ОУ). Механические процессы в исполнительных механизмах клапанов-регуляторов необходимо моделировать с учетом инерционности данного объекта на основе уравнений динамики, а также газодинамических процессов в трубопроводах и самих регулирующих клапанах [22, 81]. Последние моделировались упрощенным способом, на основе уравнений газовой статики, что допустимо при создании модели, ориентированной непосредственно на реализацию АСУ давления газа с подчиненным управлением. Все процессы, связанные с изменением давления газа, рассматривались без учета изменения такого фактора – как температура, однако несмотря на это, модель доказала свою адекватность при типичных режимах работы УРГ. Для обеспечения правильности результатов моделирования технологических режимов работы УРГ проводилась параметрическая идентификация объекта управления.

После получения адекватной, но нелинейной модели УРГ как объекта управления, имеющего большое число входов и выходов, возникала задача построения эффективной АСУ, которая осложняется из-за отсутствия определенных методов.

Следует отметить, что АСУ УРГ должна обладать следующими функциями:

- иметь возможность совместного автоматического управления положением двух клапанов-регуляторов, работающих параллельно;
- автоматическое управление положением одного клапана-регулятора, если второй клапан находится в «ручном» режиме управления;
- предусмотреть возможность совместного и отдельного ручного управления положением клапанов-регуляторов.

АСУ не только должна регулировать давление на выходе УРГ за счет изменения положения регулирующего органа, но и содержать управляющую логику с использованием сигналов, поступающих от датчиков, отвечающих за реализацию срабатывания противоаварийных защит (ПАЗ) при возникновении внештатных ситуаций. Алгоритмы ПАЗ позволяют распознавать и сигнализировать такие ситуации, как неисправность одного из клапанов-регуляторов, обрыв цепи датчика и другое [51].

В связи с нелинейностью модели УРГ возникает проблема синтеза клапанов-регуляторов. Строгой технологии синтеза таких клапанов в стационарных режимах не существует. Решением поставленной задачи является разработка способа конфигурирования АСУ процессом редуцирования газа, которая включает в себя последовательную настройку каждого блока алгоритма по индивидуальному критерию и под определенный режим работы [71].

В настоящее время ведутся исследования по использованию адаптивных методов управления УРГ с использованием нечеткой логики. Применение таких методов способствует значительному повышению эффективности АСУ УРГ.

## **1.5 Постановка задачи управления процессом транспортировки газа**

Как упоминалось выше, в работе УРГ возникают различные проблемы. Основные связаны с низким качеством длительности переходных процессов и возникновением автоколебательных процессов, из-за чего существенно снижается точность регулирования. Это приводит к преждевременному износу механиче-

ских частей клапана и его отказам, что ведет к возникновению аварийных ситуаций на ЛЧМГ.

На сегодняшний день на рынке промышленной автоматики широко применяются следующие устройства:

- программируемый логический контроллер (ПЛК);
- промышленный компьютер;
- сетевой комплекс (plc, network).

Как было отмечено, контроль и управление технологическими параметрами МГ осуществляется СЛТМ [57]. В её состав входит набор контроллеров, объединённых между собой промышленной сетью для реализации функций телемеханизации узлом редуцирования, узлом приема-запуска очистного устройства, узлом замера расхода газа и т.д.

ПЛК управляет регулирующим клапаном (рисунок 1.15).

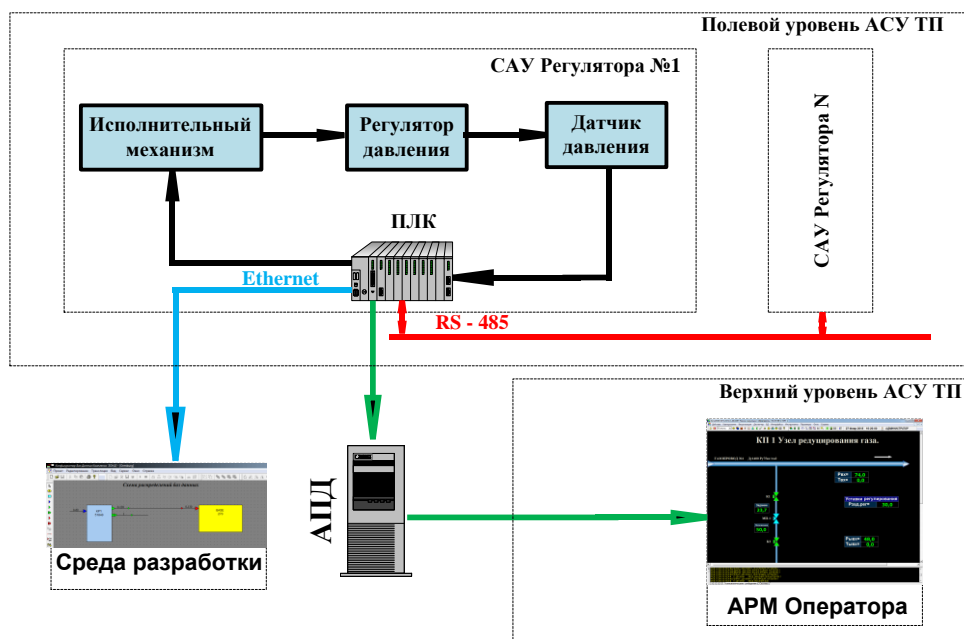


Рисунок 1.15 – Функциональная схема управления с использованием ПЛК

Он является дискретным автоматом с программным управлением, который имеет набор входных и выходных сигналов с подключенными датчиками и ИМ. Это необходимо для контроля состояния текущих входных параметров с целью сопоставления их с заданными условиями (уставкой) и выдачи управляющего сигнала на ИМ [76].

ПЛК широко применяются в газовой промышленности и связано это с их повышенной устойчивостью к воздействию окружающей среды, небольшими габаритами, модульностью и расширяемостью, хорошей ремонтопригодностью, наличием флеш-памяти и сторожевого таймера (защищает алгоритмы системы управления от зависания). Так же к достоинствам ПЛК относится наличие большого числа промышленных интерфейсов, таких как CAN, RS-232, RS-422, RS-485 Ethernet и т.д. [69, 70].

Применение ПЛК в качестве управляющего устройства позволяет разрабатывать системы управления различной сложности, однако их реализация связана с различными проблемами [90,93], при этом к основной относится невозможность поддержания заданного значения давления на выходе узла редуцирования. Все это связано с переменным режимом работы газопровода, который характеризуется динамически изменяющимся входным давлением на УРГ. В связи с этим отсутствует возможность корректного функционирования регулирующих механизмов и системы автоматики в целом.

В работе 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:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{1}{T_p+1} e^{-\tau_0 p} \quad (1.1)$$

Согласно ГОСТ 8.586.5-2005 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств» [13]:

$$q_v = 0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш}K_{п}\varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_cTK}{\rho_c P_{вх}T_c}\right)^{0,5}, \quad (1.2)$$

Подставив значение расхода газа, получим:

$$T = \frac{2Lfc^2}{q_v} = \frac{2Lfc^2}{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш}K_{п}\varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_cTK}{\rho_c P_{вх}T_c}\right)^{0,5}} \quad (1.3)$$

$$\tau_0 = \frac{Lf}{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш}K_{п}\varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_cTK}{\rho_c P_{вх}T_c}\right)^{0,5}} \quad (1.4)$$

$$C = \frac{0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 CEK_{ш}K_{п}\varepsilon \left(2\Delta P \frac{P_cTK}{\rho_c P_{вх}T_c}\right)^{0,5}}{f} \sqrt{\frac{\rho_c}{2\Delta P}} \quad (1.5)$$

$$f = \frac{\pi d_{20}^2}{4} \quad (1.6)$$

где:  $T$  – 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.

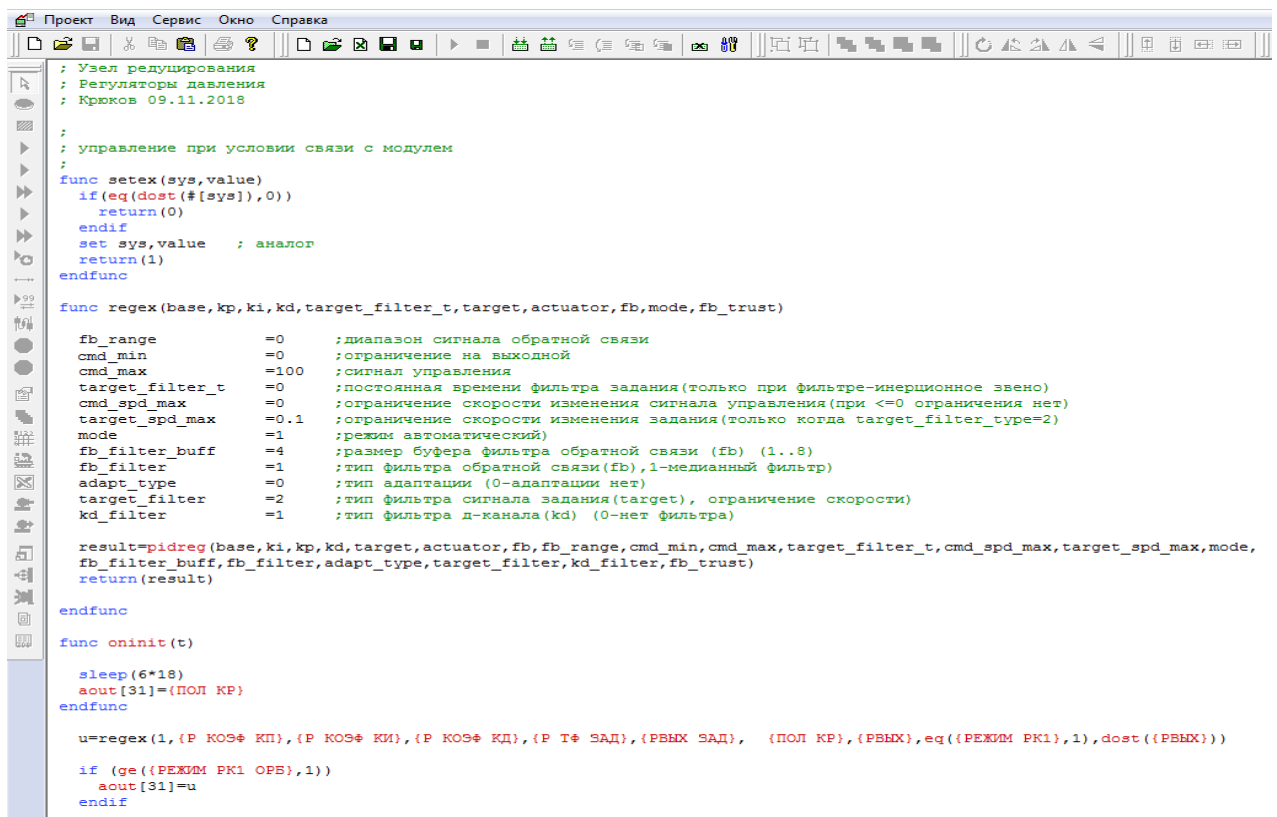
В связи с отсутствием возможности измерения части параметров, участвующих в настройке, наиболее часто для управления УРГ применяют ПИД-регуляторы.

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.

Многие производители ПЛК при использовании SCADA систем включают блок управления, в котором реализовано ПИД – регулирование [86, 99]. ПИД-регулятор является одним из самых применяемых регуляторов [48], однако он не всегда может обеспечить высокую точность управления технологическим процессом. Даже достаточно хорошо смоделированный технологический процесс не может учесть полноту описания параметров, влияющих на качество регулирования [83, 91].

Отечественный рынок производителей автоматизированных систем представлен широким списком таких фирм как ТЭКОН, ОВЕН, МСКУ, СТН-3000 и т.д. ПАО Газпром использует систему телемеханики «Магистраль-2», как наиболее лучше показавшей себя при проведении испытаний на ЛЧМГ и не имеющей аналогов в своем классе. Она строится по модульному принципу, что позволяет её легко перестраивать, развивать гибкость функционирования, что способствовало занятию ведущего места на рынке автоматизации газотранспортных предприятий [95].

Рассматриваемые ПЛК можно запрограммировать в соответствии с ИЕС 61131, используя среду разработки ZondDataBaseConfigurator и модуль УСО «Вычислитель» на встроенном в него языке программирования ST (структурированный текст) [20]. Код данного алгоритма представлен на рисунке 1.16.



```

Проект Вид Сервис Окно Справка
; Узел редуцирования
; Регуляторы давления
; Крюков 09.11.2018

;
; управление при условии связи с модулем
;
func setex(sys,value)
if(eq(dost(#[sys]),0))
return(0)
endif
set sys,value ; аналог
return(1)
endfunc

func regex(base,kp,ki,kd,target_filter_t,target,actuator,fb,mode,fb_trust)

fb_range =0 ;диапазон сигнала обратной связи
cmd_min =0 ;ограничение на выходной
cmd_max =100 ;сигнал управления
target_filter_t =0 ;постоянная времени фильтра задания(только при фильтре-инерционное звено)
cmd_spd_max =0 ;ограничение скорости изменения сигнала управления(при <=0 ограничения нет)
target_spd_max =0.1 ;ограничение скорости изменения задания(только когда target_filter_type=2)
mode =1 ;режим автоматический)
fb_filter_buff =4 ;размер буфера фильтра обратной связи (fb) (1..8)
fb_filter =1 ;тип фильтра обратной связи(fb),1-медианный фильтр)
adapt_type =0 ;тип адаптации (0-адаптации нет)
target_filter =2 ;тип фильтра сигнала задания(target), ограничение скорости)
kd_filter =1 ;тип фильтра д-канала(kd) (0-нет фильтра)

result=pidreg(base,ki,kp,kd,target,actuator,fb,fb_range,cmd_min,cmd_max,target_filter_t,cmd_spd_max,target_spd_max,mode,
fb_filter_buff,fb_filter,adapt_type,target_filter,kd_filter,fb_trust)
return(result)

endfunc

func oninit(t)

sleep(6*18)
aout[31]={ПОЛ КР}
endfunc

u=regex(1,{P КОФ КП},{P КОФ КИ},{P КОФ КД},{P ТФ ЗАД},{РВЫХ ЗАД}, {ПОЛ КР},{РВЫХ},eq({РЕЖИМ РК1},1),dost({РВЫХ}))

if (ge({РЕЖИМ РК1} ОПБ),1))
aout[31]=u
endif

```

Рисунок 1.16 – Код алгоритма редуцирования газа по классическому ПИД-закону

Применяя классическую теорию настройки ПИД-регулятора давления газа используем математическое выражение вида:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1.7)$$

где:  $u(t)$  – управляющее воздействие на регулятор давления;

$e(t)$  – ошибка (рассогласование)

$K_p, K_i, K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления регулятора.

На производственных предприятиях достаточно часто используют методику настройки ПИД-регулятора включающую формулу, в которой выходной сигнал определяется за счет пропорционального коэффициента, умноженного на интегрирующую и дифференцирующую составляющие:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de}{dt} \right). \quad (1.8)$$

Однако чаще всего подбор коэффициентов ПИД-регулятора производится за счет знаний эксперта [2, 58, 77]. Также применяется экспериментальная регулировка [94, 106], когда отсутствует полная информация по характеристикам объекта управления и возможны появления нелинейности и неустойчивости в поведении системы.

График работы ПИД-регулятора изображен на рисунке 1.17. Он показывает, что система регулирования давления газа при статическом входном давлении на УРГ работоспособна.

Однако необходимо отметить, что, хотя управляющий процесс имеет очень малую статическую ошибку (отклонения от заданного давления в установившемся режиме), тем не менее возникает динамическое отклонение (перерегулирование). Кроме того, при переходе на более высокую уставку давления создаются непрерывные автоколебания, которые отрицательно воздействуют на процесс регулирования давления газа [47].



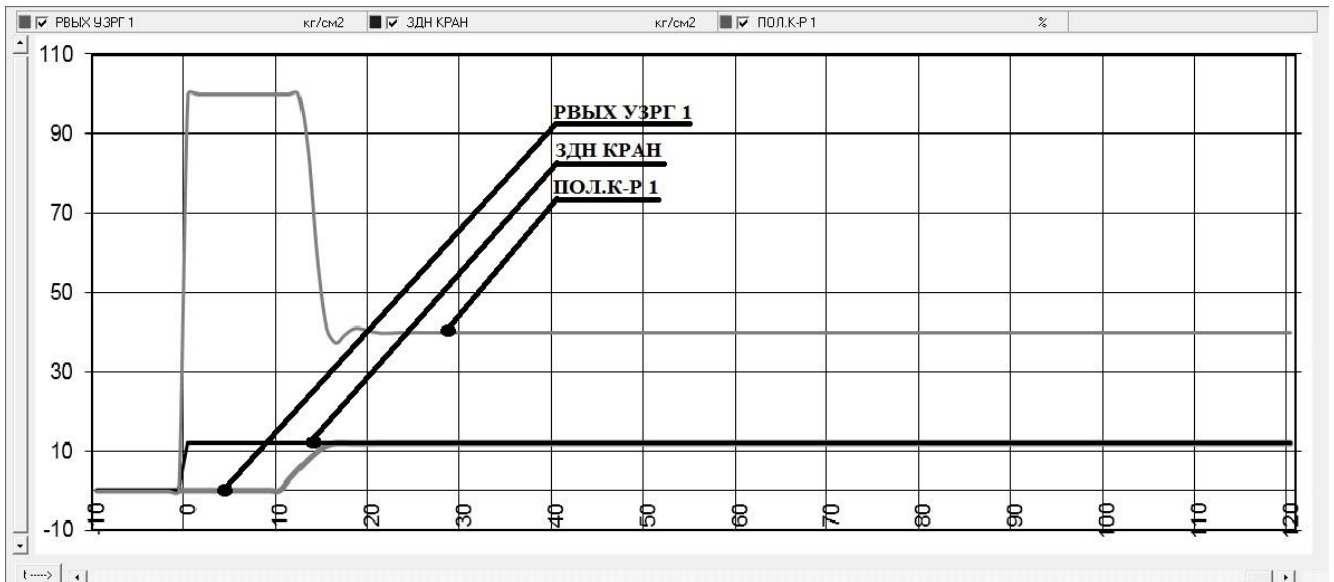


Рисунок 1.17 – Работа ПИД регулятора при статистическом входном давлении

При динамически меняющемся входном давлении на УРГ, в работе ПИД-регулятора возникают автоколебания и отклонение от заданного значения давления, что в свою очередь не позволяет достичь заданной уставки (рисунок 1.18).

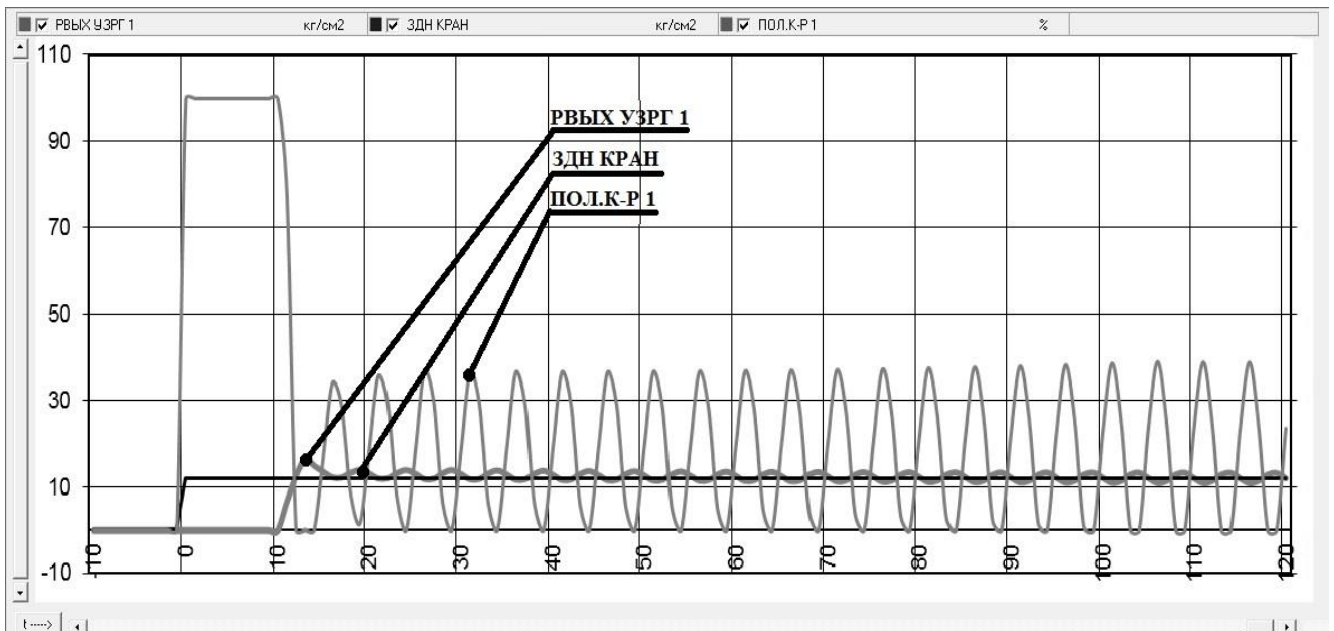


Рисунок 1.18 – Работа ПИД регулятора с динамически изменяющимся входным давлением

Анализируя графики на рисунке 1.18 можно сделать вывод о том, что для достижения заданной уставки (устранения перерегулирования и автоколебаний) необходимо вносить дополнительные изменения в настройки коэффициентов регулятора в зависимости от изменения давления на входе. Таким образом классические ПИД-регуляторы имеют отрицательные показатели качества при управлении нелинейными системами и их сложно настраивать при отсутствии полной информации об управляемом объекте. Настройка таких регуляторов по формулам не оптимальна и требует постоянной корректировки.

Существуют решения, которые на данный момент не используются в процессе настройки регуляторов давления газа на узлах редуцирования, но могут применяться для улучшения характеристик ПИД-регуляторов [107,108]. Подстройку можно выполнить на основании эвристических правил оператором или автоматически, используя блок нечёткой логики или табличной автонастройки. Нечеткая логика используется как для построения регулятора, так и в сочетании с классическими законами ПИД-регулирования.

## **1.6 Применение систем гибридного управления на основе объединения классической и нечеткой моделей объекта управления**

В процессе эксплуатации оборудования в различных отраслях промышленности, в том числе и магистральных газопроводов, изменяются статические, а особенно, динамические характеристики объектов управления, такие как: температура, давление, скорость потока, расход и т.д. неконтролируемым образом. Более того, априорная неопределенность появляется уже на этапе создания физических или технологических моделей автоматизированных объектов и процессов управления. Это объясняется сложностью разработки математических и вычислительных моделей. Поэтому на практике часто используются упрощающие допущения, которые приводят к снижению эффективности расчетной модели системы управления, построенной с использованием традиционных методов.

Необходимость в поиске новых решений с целью максимально эффективно-го управления технологическими процессами является актуальной задачей в различных областях промышленности. В современных условиях для автоматизированного управления процессами и объектами с изменяемыми параметрами все большее применение находят интеллектуальные нечеткие системы управления.

В соответствии с существующими методами интеллектуального управления выделяют следующую классификацию нечетких АСУ [63] (рисунок 1.19)

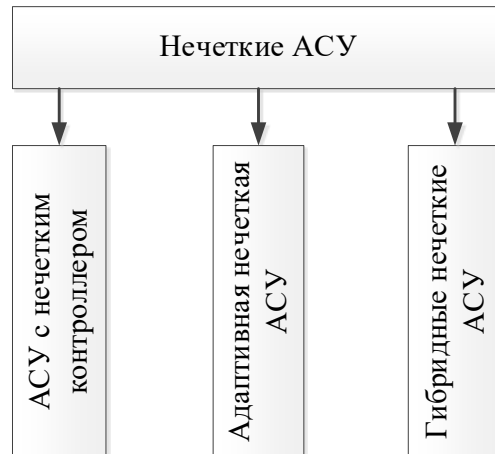


Рисунок 1.19 – Общая классификация нечетких САУ

АСУ с нечетким контроллером относится к замкнутым системам управления, имеющих обратную связь. При этом в прямой цепи применяется нечеткий логический регулятор, который опрашивает датчики о состоянии объекта управления и в случае рассогласования формирует управляющее воздействие через схему нечеткого вывода. Для регулирования процесса он может применять знания, введенные заранее в виде нечеткого логического вывода, но самостоятельно модифицировать их не имеет возможности. Все изменения правил базы выполняет разработчик извне, поэтому такая система управления обладает минимальной степенью интеллектуальности. Для повышения интеллекта системы необходимо применять средства искусственного интеллекта, что и реализовано в адаптивной нечеткой системе управления.

Такая АСУ также относится к замкнутым системам управления с обратной связью, но в прямой цепи используется адаптивный нечеткий регулятор с двумя уровнями иерархии. На первом уровне, с применением схем нечеткого вывода,

происходит опрос состояния объекта управления с использованием информации от датчиков и формируется управляющее воздействие. На втором уровне осуществляется коррекция баз правил системы нечеткого вывода с применением одного из методов вывода нечеткой логики. В результате, если происходят изменения в объекте управления, то срабатывает нечеткий адаптивный регулятор и на верхнем уровне интеллектуально адаптируется система с нечеткими выводами на нижний уровень, который, в свою очередь, представляет собой устройство с автоматическим принятием решения с использованием экспертных знаний.

Гибридные нечеткие АСУ – это замкнутая система управления с обратной связью, применяющая в прямом контуре гибридный нечеткий контроллер [63]. Первый уровень используется для опроса датчиков и генерации управляющих воздействий с использованием линейного или нелинейного закона управления, описываемого классическими методами теории автоматического управления (ПИД-регулятор, релейный регулятор и т.д.). На втором уровне происходит адаптация параметров регулятора с использованием одной из схем нечеткого логического вывода. При этом к входным переменным относятся переменные состояния объекта управления, а к выходным – параметры закона управления, реализуемого на подчиненном уровне, например, коэффициенты ПИД-регулятора. Поэтому, так как данная система достаточно легко адаптируется к изменениям объекта управления и изменяет закон управления по заданным правилам, основанных на знаниях, то она имеет большую степень интеллектуальности.

В настоящее время наибольшую популярность приобретают нечеткие гибридные АСУ, у которых теория хорошо проработана [63]. Она имеет архитектуру, представленную на рисунке 1.20.

Входные переменные, которые характеризуют различия между измеренным и заданным состоянием объекта управления, подвергаются процедуре фаззификации и используются как при формировании управляющего воздействия на исполнительном уровне, так и в нечеткой выходной системе координационного уровня. Система уровня координации нечеткого вывода состоит из базы нечетких продукционных правил обобщенного вида: ЕСЛИ «присутствует отклонение от за-

данного состояния объекта», ТО «произвести корректировку параметров закона управления на исполнительном уровне», в котором знания экспертов по настройке параметров регулятора на исполнительном уровне представлены в нечеткой

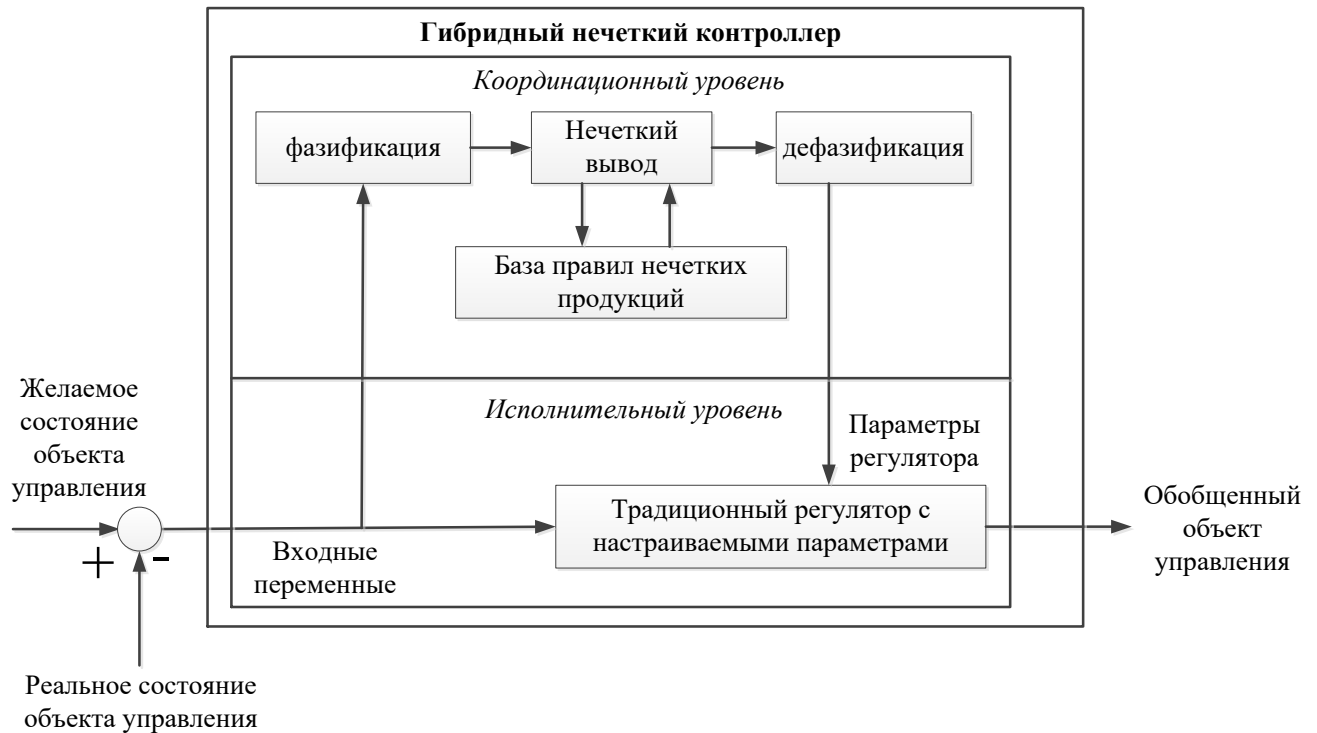


Рисунок 1.20 – Функциональная схема гибридной нечеткой АСУ

форме с целью обеспечения наилучшего, с точки зрения экспертной оценки, движения объекта. В подавляющем большинстве при практической реализации гибридных регуляторов в качестве традиционного регулятора на исполнительном уровне используется классический ПИД-регулятор, так как он одновременно обладает удовлетворительными динамическими характеристиками при управлении различными объектами и возможностью быстрой перенастройки параметров.

Механизм нечеткого логического вывода, как правило, включает в себя следующие этапы: фазификация (введение нечеткости), агрегатирование (нечеткий логический вывод), нахождение степени истинности (активизация) аккумулярование и дефазификация (приведение к четкости). Алгоритмы нечеткого вывода отличаются друг от друга за счет вида применяемых правил, используемых логических операций и разновидностью методов приведения к четкости.

В контексте нечеткой логики фазификация понимается не только как определенный этап формирования нечеткого вывода, но и как процесс определения значений функций принадлежности к определенным термам (нечетким множествам) на основе существующих (нечетких) исходных данных [74]. Фазификацией также называется введение нечеткости [5].

Целью процедуры фазификации является установление соотношения в лингвистических переменных между конкретным (числовым) значением входной переменной и значением функции принадлежности [30,31]. На этапе завершения фазификации происходит определение входных переменных для конкретных значений функций принадлежности термов, которые используются в условиях базы правил системы нечеткого вывода.

Если условием нечеткого правила служит простое нечеткое утверждение, то степень его истинности можно определить значением функции принадлежности определенного терма лингвистической переменной. Если условие – это совокупное высказывание, то степень истинности можно определить с помощью основы известных значений истинности высказываний с помощью ранее введенных нечетких логических операций. Для нахождения результата нечеткой конъюнкции (логического «И») связки используется следующая формула:

$$T(A \cap B) = \min\{T(A) \cap T(B)\}, \quad (1.9)$$

а для нахождения результата нечеткой дизъюнкции (логического «ИЛИ») используется формула:

$$T(A \cup B) = \max\{T(A) \cup T(B)\}. \quad (1.10)$$

Агрегирование – это процедур определения степеней истинности по каждому из условий [13].

Активизацией в системах нечеткого вывода является процедура (процесс) определения степени истинности каждого из логических высказываний [50].

Степеням истинности при активизации соответствуют функции принадлежности ввиду того, что заключения определяются соотношением входных лингвистических переменных.

Если заключение относится к простому нечеткому высказыванию, то степень истинности приравнивается к алгебраическому произведению коэффициента определенности (весового коэффициента) и степени истинности условия данного нечеткого продукционного правила [72].

Если вывод относится к простому нечеткому высказыванию, то степень его истинности приравнивается к алгебраическому произведению коэффициента определенности и степени истинности данного условия [49].

Если вывод – это составное утверждение, то степень истинности каждого из этих утверждений определяется алгебраическим произведением коэффициента определенности и степени истинности условия этого нечеткого продукционного правила.

Если на этапе создания базы правил коэффициенты определенности продукционных правил явно не заданы, то их значение по умолчанию равно единице. Для определения функции принадлежности  $\mu(y)$  применяют один из методов нечеткой композиции:

- $\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(x)\}$  – min-активизация;
- $\mu'(y) = c_i \cdot \mu(x)$  – prod-активизация;
- $\mu'(y) = 0,5(c_i + \mu(x))$  – average-активизация;

где:  $\mu(y)$  – функция принадлежности термов лингвистических переменных;

$c_i$  – степень истинности нечетких высказываний.

Аккумуляция – это процедура определения функции принадлежности входных лингвистических переменных [13].

На этапе аккумуляции осуществляется объединение всех степеней истинности правил с целью получения функции принадлежности каждой выходной лингвистической переменной (ЛП).

Процедура дефазификации является процессом, в системах нечеткого вывода, связанным с переходом от функции принадлежности лингвистических переменных к конкретному числовому значению.

Целью этапа дефазификации является использование аккумуляции выходных лингвистических переменных для нахождения числового значения, которое будет служить управляющим воздействием на исполнительный механизм АСУ.

Этап дефазификации считается завершенным, когда окончательные числовые значения определены для каждой из выходных лингвистических переменных в виде действительного числа и имеет следующую форму:  $y_1, y_2, \dots, y_s$ , где  $s$  – общее число выходных лингвистических переменных базы правил системы нечеткого логического вывода. Вычисления на этапе дефазификации проводятся с применением метода центра масс (или центр тяжести). Он используется для приведения к чёткости и расчеты ведутся по формуле:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}, \quad (1.11)$$

где:  $y$  – результат процедуры дефазификации;

$x$  – выходная лингвистическая переменная, которая может принимать значения от  $x = \min$  до  $x = \max$ ;

$\mu(x)$  – функция принадлежности нечёткого множества  $x$ .

Для нахождения величины в произвольной точке системы методом центра тяжести используется формула:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x_i) dx}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i) dx}, \quad (1.12)$$

где  $n$  – число точек нечётких множеств, которые характеризуют единственное значение выходной лингвистической переменной.

На ряду с методом центра тяжести существует также метод биссектрисы площади, который задается следующим уравнением:



$$\int_{\min}^u \mu(x)dx = \int_u^{\max} \mu(x)dx. \quad (1.13)$$

Существует также метод левого и правого модального значения дефазификации функции принадлежности лингвистической переменной, которые вычисляются по формулам:

$$y = \min \{x_m\}, \quad (1.14)$$

$$y = \max \{x_m\}, \quad (1.15)$$

где  $x_m$  – модальное значение (самое крайнее) значение нечёткого множества [46].

В настоящее время на практике наиболее применяемы алгоритмы нечеткого вывода, созданные Мамдани, Сугено и Такаги, а также Цукамото.

Алгоритм Мамдани (Mamdani) был предложен в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани в качестве метода управления паровым двигателем, который в данный момент наиболее применяем в системах нечёткого логического вывода [15].

Этот алгоритм заключается в следующем: формируют базу правил системы нечёткого логического вывода, а также осуществляют процесс фазификации (введение нечёткости) входных лингвистических переменных. Для каждого отдельного значения входной лингвистической переменной  $x$  должно быть поставлено в соответствие значение функции принадлежности к определенному терму входной лингвистической переменной. Нечёткий логический вывод (агрегатирование) степеней истинности для каждого условия («Условие №1», «Условие №2», «Условие №N») каждого правила определяется по формуле.

$$\mu^1(x), \mu^2(x), \dots, \mu^n(x), \text{ где } \mu^2(x), \dots, \mu^n(x). \quad (1.16)$$

Алгоритм, предложенный Сугено и Такаги, использует следующий набор правил [84]:

1) при выполнении первого этапа происходит формирование базы правил системы нечёткого вывода. Она включает набор продукционных правил в форме: если «Предпосылка №1» и «Предпосылка №2», то «Заключение №1», где выходной переменной выступает определенное действительное число;

2) на втором этапе осуществляется процедура фазификации (приведение к нечёткости) входных переменных. Данная процедура схожа с процедурой фазификации, описанной в алгоритме Мамдани.

Процедура агрегатирования включает в себя нахождения степеней истинности по критерию минимума (*min* – конъюнкции).

При выполнении этапа связанного с процедурой активизации подзаключений происходит вычисления значений степеней истинности всех нечётких правил, рассчитываются обычные (не нечёткие) значения выходных переменных для каждого правила, определяемых множеством  $C = (c_1, c_2, \dots, c_q)$  и множество значений выходных переменных  $W = (w_1, w_2, \dots, w_q)$ , где  $q$  – общее число правил из базы.

На этапе процедуры аккумуляции или композиции получают результирующее нечёткое множество выходной переменной и итоговой функции принадлежности. Данная процедура практически не выполняется, в связи с тем, что при расчётах используют действительные числа.

Процедура дефазификации выходных переменных использует преобразованный вариант в форме:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n A_i c_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (1.17)$$

где:  $c_j$  – четкие (числовые) значения заключений;

$A_i$  – степень истинности для каждого правила.

Алгоритм, предложенный Цукамото (Tsukamoto) состоит из нескольких этапов. Сначала на этапе процедуры фазификации (приведение к нечёткости) входных переменных необходимо создать базу правил системы нечёткого логического вывода [98]. При этом для каждого отдельного значения входной переменной должно ставится в соответствие значение функции принадлежности и терма входной лингвистической переменной. Функцию принадлежности для переменной  $x$  задают в следующем виде:

$$\mu^1(x), \mu^2(x), \dots, \mu^n(x). \quad (1.18)$$

При агрегировании вычисляют степень истинности условий всех правил нечеткого вывода, используя парные нечеткие логические операции. Правила, имеющие степень достоверности отличной от нуля, применяются в последующих вычислениях.

При выполнении процедуры активизации применяют один из видоизмененных существующих методов нечеткой логики.

В этом алгоритме процедура аккумуляции (композиции) не используется так как в расчетах применяются действительные числа.

Процедура дефазификации выходных переменных совпадает с алгоритмом Сугено и Такаги.

Для решения задач нечеткого моделирования на практике, с целью получения наиболее адекватных результатов, одновременно используют несколько алгоритмов нечеткого вывода. В современных условиях, ввиду развития цифровых технологий, требуется нестандартный подход к автоматизации технологических процессов, и поэтому все большей популярностью пользуются системы, построенные на аппарате нечеткой логики. Данные факторы отмечаются многими учеными и имеют подтверждение как с теоретической, так и практической точек зрения. Основателями методов нечеткого логического регулирования являются такие крупные ученые как: Л. Заде, Т. Такаги, М. Сугено, Е. Мамдани, Т. Терано, Р. Ягер, и др. Первыми отечественными исследователями в данной области были М.А. Айзерман, И.И. Гольденблат, А.В. Алексеев, Б.Н. Петров, Г.М. Уланов и др. Также свой вклад в развитие нечеткой логики внесли Д.А. Поспелов, А.Н. Мелихов, А.В. Колесников, И.З. Батьфшин, А.Н. Аверкин, Л.С. Бернштейн, Р.А. Алиев, В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов, И.А. Рыбин, З.Г. Каркищенко, Т.А. Дзюба, Салихов, А.Н., К.А. Пупков, Н.Д. Егупов и другие российские ученые. Тем не менее, в этих работах мало проработаны вопросы, связанные с применением адаптивных нечетких систем в управлении процессом редуцирования газа на ЛЧМГ. Таким образом, в настоящее время является актуальной задача, связанная с совершенствованием методов регулирования, за счет сочетания классических законов и аппарата

нечеткой логики, как для разработки нетиповых систем управления, так и для модернизации существующих.

### **Выводы по первой главе**

1. Транспортировка газа – ответственная процедура, поскольку это вещество горючее и взрывоопасное. Транспортировка газа может осуществляться несколькими способами, хотя приоритетным является трубопроводный транспорт газа, имеющий главное преимущество – невысокую стоимость. Линейная часть газопровода представляет собой сложную структуру, состоящую из множества элементов, одним из которых являются узел редуцирования газа, выполняющий функции поддержания заданного давления.

2. В виду сложности настройки регуляторов давления газа под конкретный режим работы существует проблема корректности функционирования данных УРГ. Некачественная автоматизация и неверная настройка регулирующих клапанов составляют более 17 % от общего числа аварийных ситуаций и инцидентов на ЛЧ МГ, в связи с этим данная проблема остается актуальной.

3. Не смотря на многообразие и гибкость инструментальных средств, заложенных в SCADA системы производителями, они не дают какой-то конкретной, определенной возможности по реализации технологических процессов, протекающих не по заранее смоделированному сценарию. Как правило, в данных ситуациях, требуется применение нестандартного подхода к решению задач по автоматизации.

4. В связи с тем, что УРГ имеет нелинейную модель, возникает проблема корректности настройки клапанов-регуляторов. Строгой технологии настройки таких клапанов в стационарных режимах не существует. Решением данной задачи является разработка способа конфигурирование АСУ УРГ, которая включает в себя последовательную настройку каждого блока алгоритма по индивидуальному критерию и под определенный режим работы.

5. Производители ПЛК обычно включают в свою среду блок управления технологическими параметрами, в котором реализуются классические П, ПИ или ПИД законы управления. Проведенный анализ показал, что чаще всего в УРГ используется ПИД-регулятор, но его применение не всегда обеспечивает достаточно высокую точность управления из-за перерегулирования и большого времени достижения заданной уставки. Для устранения этих проблем необходимо вносить дополнительные изменения в настройки коэффициентов регулятора в зависимости от изменения давления на входе. Поэтому в системе редуцирования давления газа в сочетании с классическим законом управления необходимо применять методы нечеткого управления.

6. Изложенные в специальной литературе методы гибридного управления, основанные на применении аппарата нечеткой логики при управлении нестационарными объектами, недостаточно проработаны применительно к процессу редуцирования давления газа на ЛЧ МГ. В связи с этим вопросы исследования и апробирования данных методов в отношении технологического процесса управления процессом редуцирования газа на УРГ остаются актуальными.

## **2 Математическое описание процесса редуцирования газа как объекта управления**

В данной главе приводятся результаты исследований, совместно с научным руководителем, доктором технических наук В.В. Туговым, опубликованные в [33; 38; 42; 44]. Личное участие соискателя заключается в разработке математического обеспечения для описания процесса управления редуцированием газа с использованием аппарата нечеткой логики. Личный вклад автора составляет 87 %.

### **2.1 Разработка математического описания процесса управления редуцированием газа с применением нечеткой логики**

Обычно в УРГ применяется клапан, регулируемый по ПИД закону. Проведенный анализ работы узла показал, что настройка ПИД-регулятора очень сложная и трудоемкая процедура. Она связана с решением сложных систем дифференциальных уравнений, что не всегда дает положительный результат. Также из-за переменного режима работы газопровода необходима постоянная под настройка коэффициентов ПИД – регулятора, а поэтому на объекте должен находиться обслуживающий персонал [53, 60]. Все это приводит к возникновению автоколебаний и перерегулированию в системе и, как следствие, отклонению давления от заданного значения, а также к быстрому износу механических подвижных деталей регулирующего органа (клапана), таких как, седло клапана, уплотнения, штоки, поршень и т.д. [68].

Такие неисправности ведут к возникновению различных аварийных ситуаций, а при превышении максимально допустимого значения давления и некорректной отработки специального пружинного предохранительного клапана (СППК) возможен разрыв газопровода. Это срывает режимы подачи газа потребителю, возникает необходимость в ремонтно-восстановительных работах и, как следствие, приводит к временным и финансовым затратам [24].

Поэтому происходит постоянный поиск новых решений сформулированных проблем. Одним из таких решений является применение нового принципа построения регуляторов, основанному на базе правил нечеткой логики (fuzzylogic). Он сочетает в себе такие положительные моменты как точность цифрового управления и опыт специалистов. Чтобы реализовать такой регулятор необходимо определить входные лингвистические переменные, лингвистическую переменную, которую необходимо получить, а также правила образования результирующего воздействия из входных переменных. В итоге возможно определять необходимые значения, такие, как например, мощность, обороты, положение заслонки и т.д. [14].

Для управления процессом редуцирования газа применяются клапан-регулятор, понижающий давление из газопровода №1 Ду 1200 мм Ру 75 кг/см<sup>2</sup> в газопровод №2 Ду 1000 мм Ру 50 кг/см<sup>2</sup> и микропроцессорная система (линейная телемеханика с процессорным модулем AMD® Elan™ SC520 и набором плат ввода-вывода) (рисунок 2.1) [38].

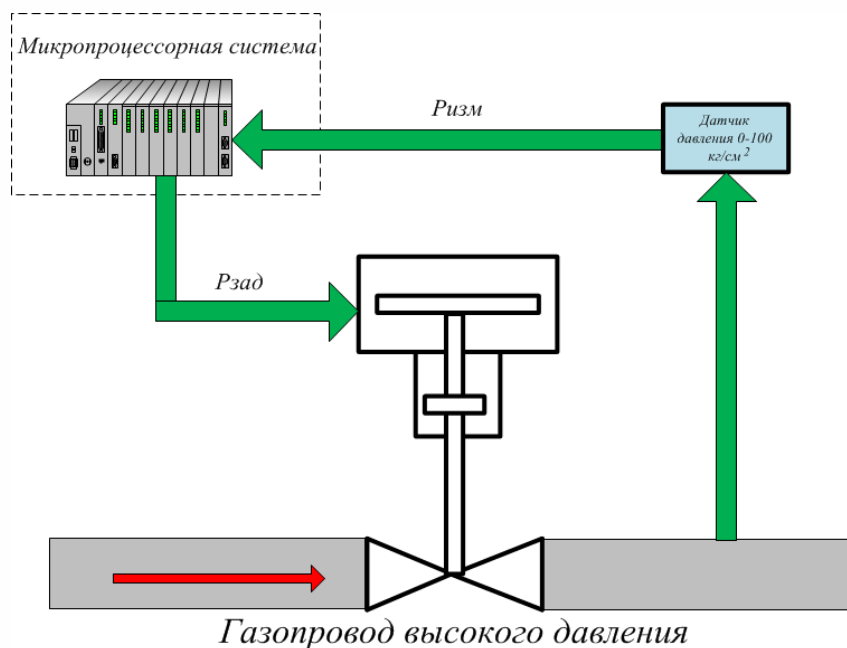


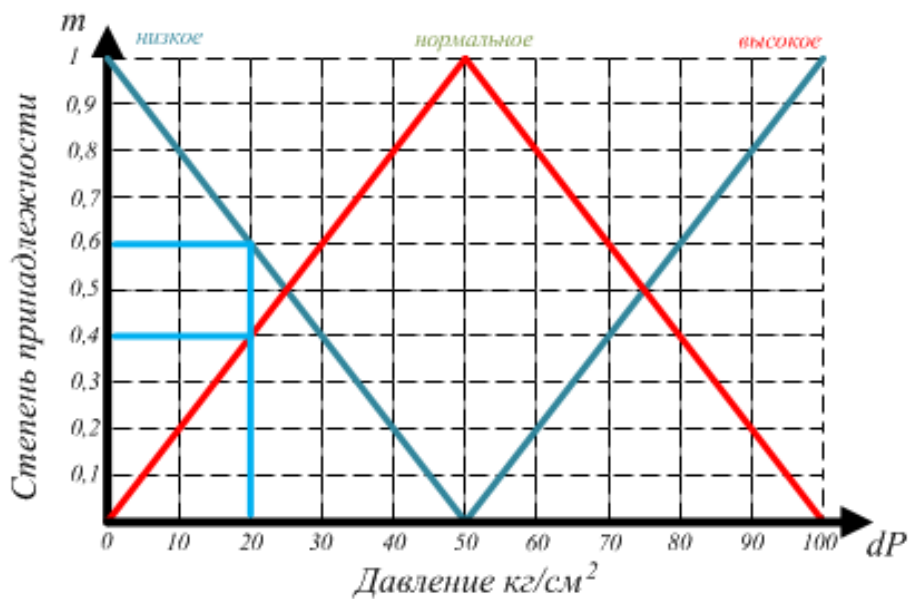
Рисунок 2.1 – Функциональная схема регулирования давления

Разработаем алгоритм и правила нечеткой логики для регулирования давления в газопроводе «после себя», за счет перемещения поршня в сепараторе клапана (рисунок 2.1).

Функции принадлежности сигналов вход-выход, а также правила принятия решений о ходе технологического процесса формируются с использованием опыта диспетчеров и обслуживающего персонала.

Для определения значения давления  $P_{изм}$  применяется датчик, установленный после клапана-регулятора, с диапазоном измерения от 0 до 100 кг/см<sup>2</sup>.

Предположим, что значение текущего давления равно 55 кг/см<sup>2</sup>, а задано давление  $P_{зад}$  в 50 кг/см<sup>2</sup>. Тогда отклонение текущего давления (ошибка регулирования)  $dP$  от заданного значения находится в диапазоне от минус 50 кг/см<sup>2</sup> до плюс 50 кг/см<sup>2</sup>. Для перехода к нечетким переменным по отклонению давления газа в трубопроводе используем стандартную форму функций принадлежности трех термов (рисунок 2.2).

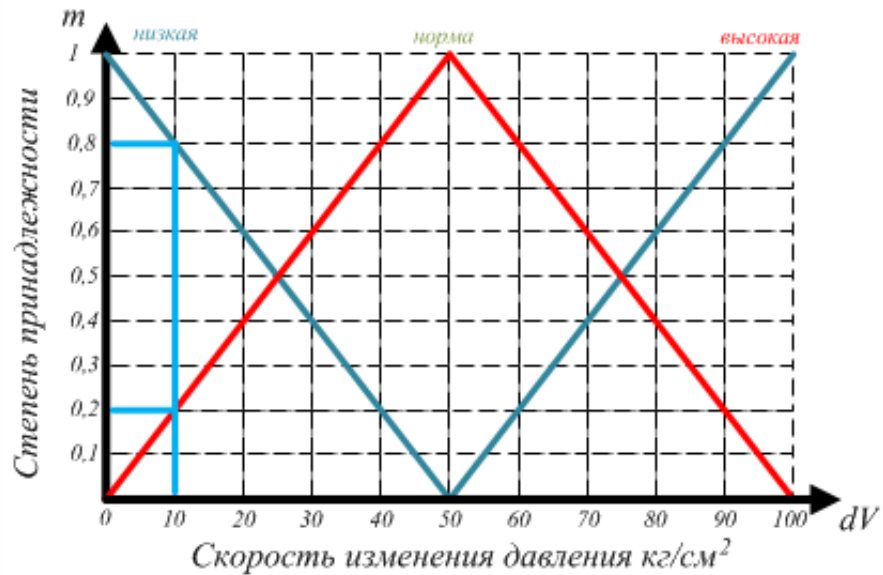


М - давление ниже нормы; Н – давление норма; В - давление выше нормы

Рисунок 2.2 – Форма функции принадлежности изменения давления

Для повышения точности и качества управления процессом, необходимо вычислить скорость изменения давления в газопроводе  $dV$ , которая также может изменяться от минус 50 кг/см<sup>2</sup> до 50 кг/см<sup>2</sup>. Для фазификации скорости изменения давления примем аналогичную форму функций принадлежности (рисунок 2.3).

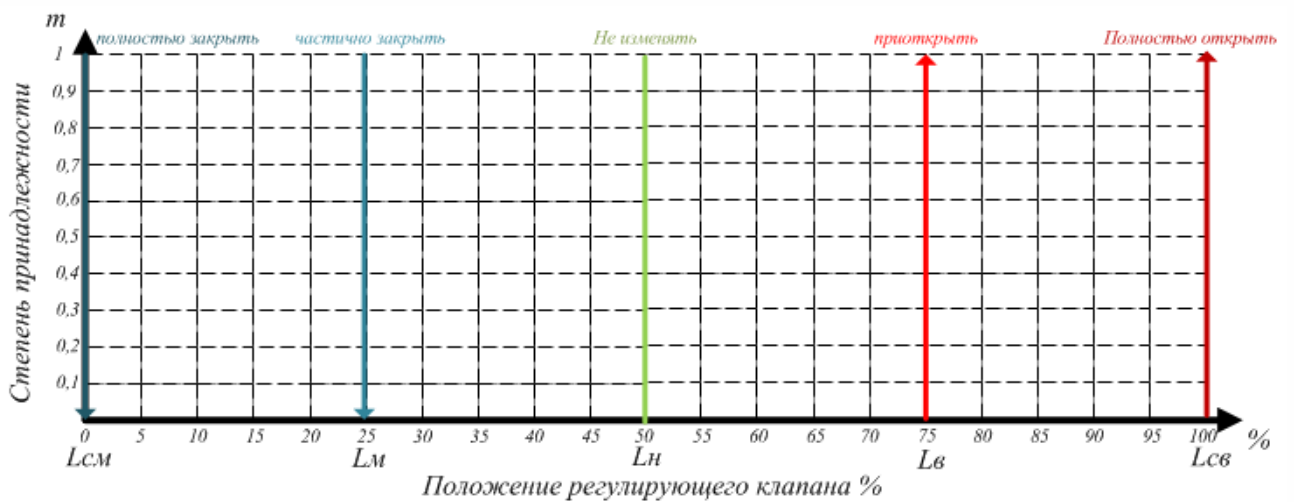




М – скорость ниже нормы; Н – скорость норма; В – скорость выше нормы

Рисунок 2.3 – Функция принадлежности изменения скорости давления

Регулирование осуществляется за счет открытия-закрытия клапана-регулятора, поэтому используем сигнал задания положения клапана  $I_{зад}$ , который приходит с выхода микропроцессорной системы [1]. Формированием управляющего сигнала обеспечивается изменение положения клапана регулятора  $L$ , определяемое диапазоном от 0 до 100 %. В лингвистических переменных нечеткой логики управление положением клапана может быть представлено пятью термами (рисунок 2.4).



СМ – закрыть клапан; М – частично закрыть клапан; Н – не изменять положение; В – частично открыть клапан; СВ – открыть клапан полностью

Рисунок 2.4 – Лингвистические переменные открытия клапана

На рисунке 2.5 представлена разработанная структурная схема регулирования давления газа с использованием нечеткой логики.

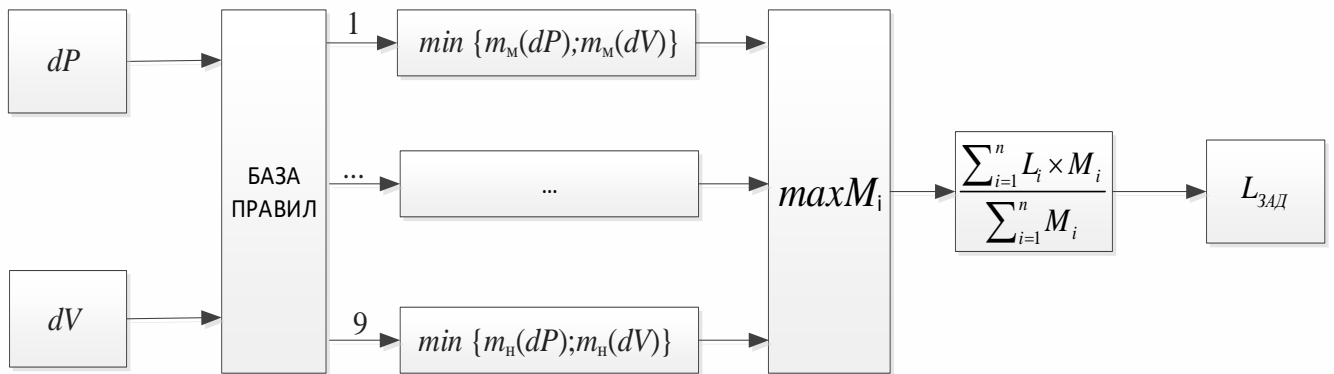


Рисунок 2.5 – Структурная схема регулирования давления газа с использованием нечеткой логики

Если давление меньше уставки и его значение не изменяется, то клапан частично открывается. Через нечеткие переменные такое правило можно записать следующим образом:

если  $dP = M$  и  $dV = H$ , то  $L = B$ .

Если давление меньше уставки и его значение уменьшается, то клапан полностью открывается. Через нечеткие переменные это правило выглядит так:

если  $dP = M$  и  $dV = M$ , то  $L = CB$ .

Если давление больше уставки и его значение не изменяется, то клапан частично закрывается. Через нечеткие переменные это правило имеет следующий вид:

если  $dP = B$  и  $dV = H$ , то  $L = H$ .

Если давление больше уставки и его значение увеличивается, то клапан полностью закрывается. Через нечеткие переменные это правило записывается так:

если  $dP = B$  и  $dV = B$ , то  $L = CB$ .

Аналогичным образом составляются остальные правила. На основе анализа всех возможных состояний условий составили девять правил (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Совокупность условий управления

| Изменение давления | Скорость изменения давления | Возмущающее воздействие на клапан |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| V↑                 | M↓                          | H                                 |
| V↑                 | H                           | M↓                                |
| V↑                 | V↑                          | CM↓↓                              |
| H                  | M↓                          | V↑                                |
| H                  | H                           | H                                 |
| H                  | V↑                          | M↓                                |
| M↓                 | M↓                          | CB↑↑                              |
| M↓                 | H                           | V↑                                |
| M↓                 | V↑                          | H                                 |

На следующем этапе находятся степени принадлежности не равные нулевому значению и определяется свод правил. Далее происходит процесс оценки критерия по минимуму:

- 1)  $M_{CB}(L) = \min \{m_M(dP); m_M(dV)\};$
- 2)  $M_B(L) = \min \{m_M(dP); m_H(dV)\};$
- 3)  $M_B(L) = \min \{m_H(dP); m_M(dV)\};$
- 4)  $M_H(L) = \min \{m_H(dP); m_H(dV)\}.$

Затем производится степень оценки термов входной переменный по максимальному значению  $M_B(L) = \max \{m_B(L); m_B(L)\}$ , в результате получаем совокупность термов входной переменной  $\{m_{CM}, m_M, m_H, m_B, m_{CB}\}$ .

При дефазификации данных применим метод центра тяжести:

$$L_{3AD} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \times M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (2.1)$$

В итоге получаем значение управляющего воздействие на регулирующий клапан в процентном соотношении его открытия.

## 2.2 Описание процесса управления редуцированием газа ПИД-регулятором с табличной автонастройкой

Методы адаптивного управления – это один из выходов, который позволяет свести к минимуму процесс перерегулирования. Однако, на практике отсутствуют простые, надежные и общепринятые методы автоматической настройки ПИД-регулятора. Также необходимо отметить, что контроллер не может выдать требуемого качества регулирования, не смотря на наличие в нем автоматической настройки и алгоритмов управления [16]. Например, объект управления может быть недостаточно хорошо спроектирован (иметь зависимые контуры регулирования, большую задержку или высокий порядок объекта); характеристики объекта могут быть не линейными; датчик иметь большую погрешность измерения; источник воздействия на объект управления иметь гистерезис или слишком большую инерционность. При таких условиях микропроцессорная система не сможет решить сложные и плохо формализованные задачи лучше, чем человек [42]. Исключить подобное возможно за счет применения такой разновидности адаптации, как разомкнутое управление параметрами ПИД-регулятора (табличная автонастройка) [11,78].

Опытный эксперт заранее определяет коэффициенты регулятора для разных условий работы системы и заносит их в таблицу. При возникновении условий адаптации они извлекаются. Табличная автонастройка применяется не только для адаптивного управления, но и для управления нелинейными объектами и динамическими процессами, например, для постоянно изменяющегося давления на входе регулятора [87,110]. Функциональная схема адаптивного ПИД-регулятора давления газа с табличной автонастройкой представлена на рисунке 2.6.

Принцип действия табличного управления регулятором давления газа заключается в следующем. Заданная уставка давления подается на вход адаптивного ПИД-регулятора, с настроенными в нем стартовыми (начальными) коэффици-

ентами. Регулятор в свою очередь, выдает управляющий сигнал на исполнительный механизм, редуцирующий клапан.

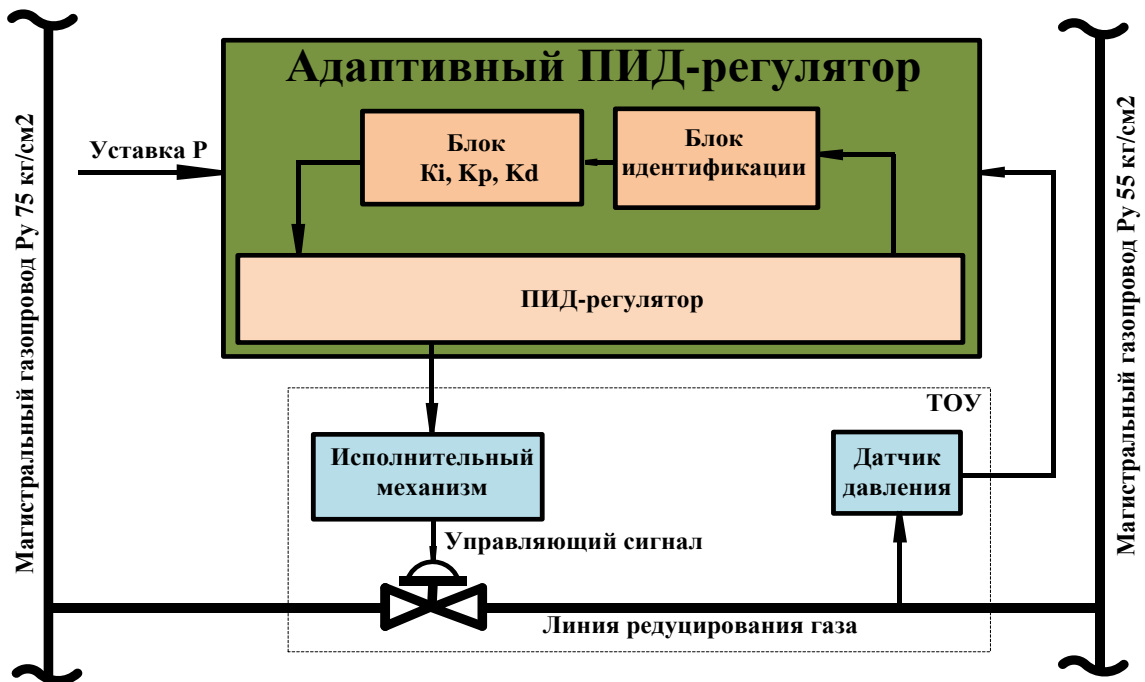


Рисунок 2.6 – Функциональная схема адаптивного ПИД-регулятора давления газа с табличной автонастройкой

Качество регулирования оценивается за счет сопоставления показаний датчика давления и уставкой. При возрастании ошибки регулирования в контур системы включается адаптивное звено регулятора [88], состоящее из блока идентификации и блока коэффициентов регулятора.

В блоке идентификации происходит оценка величины изменения давления за определенный промежуток времени (скорость изменения) по критериям, заложенным экспертом. К примеру:

- давление газа незначительно увеличилось (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,3$  кг/см<sup>2</sup>;
- давление газа возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,7$  кг/см<sup>2</sup>;
- давление газа резко возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 1,4$  кг/см<sup>2</sup>.

Принадлежность к тому или иному критерию оценивается за счет сравнения установленной величины и величины возмущающего воздействия. Далее сформи-

рованный критерий сопоставляется со значениями коэффициентов ПИД-регулятора из таблицы 2.2, просчитанной под различные режимы работы.

Таблица 2.2 – Режимные коэффициенты регулятора

| № п/п | Режим работы регулятора | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
| 1     | P↑(↓)                   | x     | y     | z     |
| 2     | P↑↑(↓↓)                 | x     | y     | z     |
| 3     | P↑↑↑(↓↓↓)               | x     | y     | z     |

Алгоритм работы системы имеет вид (рисунок 2.7).

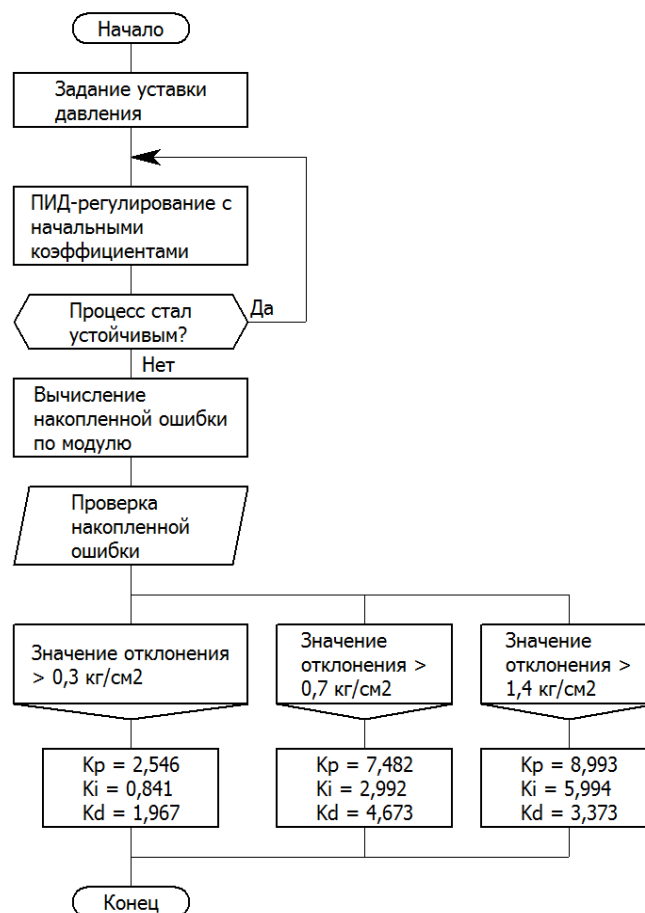


Рисунок 2.7 – Алгоритм управления адаптивным ПИД-регулятором с табличной автонастройкой

Задание уставки давления газа производит оператор (диспетчер) и осуществляется процесс регулирования по ПИД-закону, с начальными коэффициен-

тами. Далее проверяется условие устойчивости процесса регулирования. Если процесс устойчив, коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, в противном случае – происходит подсчет накопленной ошибки регулирования по модулю [105]. Затем проверяется накопленная ошибка и происходит ее идентификация согласно заданных условий значений отклонения. В конце подставляются значения коэффициентов ПИД-регулятора, заранее идентифицированные экспертом и занесенные в таблицу.

Рассмотренную систему можно представить, как систему с двумя контурами регулирования [102]. Контур, используемый для адаптации (с давлением газа на входе регулятора), является разомкнутым. Отсюда следует, что табличное управление характеризуется высоким быстродействием, отсутствием ложного срабатывания или расхождения алгоритмов адаптации.

### **2.3 Математическое описание процесса ПИД-регулирования редуцирования газа с применением аппарата нечеткой логики**

Регуляторы, построенные на классических ПИ- или ПИД-законах регулирования, как правило, реализуют в себе метод Циглера-Николса [64]. Этот метод предполагает выход объекта в область автоколебаний, что обусловлено переходом в пропорциональный закон регулирования и грубым изменением коэффициента усиления  $K_p$ . Однако множество технологических процессов в условиях эксплуатации не допускают автоколебательный режим, отрицательно влияющий на качество регулируемого параметра и технологическое оборудование. Таким образом, проблема нахождения оптимального метода регулирования до сих пор остается открытой.

В последнее время стали актуальными модели и алгоритмы управления, основанные на аппарате нечеткой логики. В его основе находится не умение использовать аналитические или теоретические данные, а знания и умение квалифицированных специалистов [9]. Данные знания, как правило, представляются в виде лингвистических баз данных. Нечеткое управление эффективно в случаях

неопределенных параметров объектов, когда имеется накопленный опыт специалистов по управлению и настройке АСУ [85,92]. Исходя из вышеизложенного, становится актуальной задача создания комбинированного метода управления редуцированием газа, реализующего в себе классический ПИД-закон и нечеткую логику. Целью является разработка нечеткой экспертной системы, которая определяет оптимальные настройки ПИД-регулятора для его адаптации к объекту управления [100,101], редуцированием газа в магистральном газопроводе.

Как правило, нечеткая логика в ПИД-регулировании используется для настройки самого регулятора и для подстройки его коэффициентов.

Процесс редуцирования газа на ЛЧ МГ, как говорилось выше, сводится к поддержанию уставки давления на выходе регулятора заданной диспетчером (оператором). Функциональная схема нечеткого ПИД-регулятора давления газа представлена на рисунке 2.8.

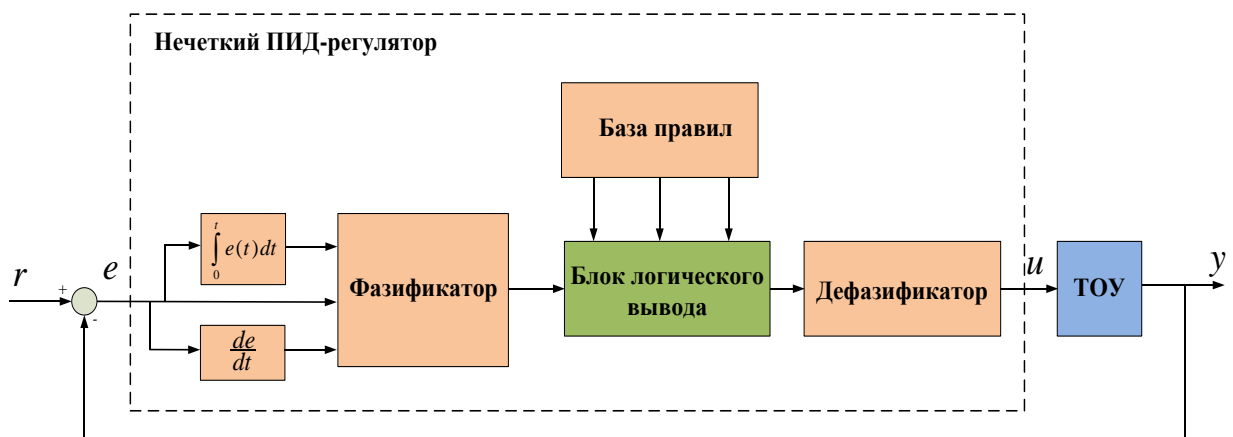


Рисунок 2.8 – Функциональная схема нечеткого ПИД-регулятора

На вход регулятора подается ошибка регулирования  $e$ , а также ее интегральная и дифференциальная составляющая по времени. Далее данные величины подвергаются операции фазификации, то есть перехода от четких значений к нечетким переменным. Далее на основе базы правил, составленной экспертом, блок логического вывода формирует управляющее воздействие. Блок дефазификации в данной схеме служит для преобразования нечетких переменных в управляющее воздействие  $u$  на технологический объект управления (исполнительный механизм



регулирующего клапана) [109]. Разработанная структурная схема нечеткого ПИД-регулятора представлена на рисунке 2.9.

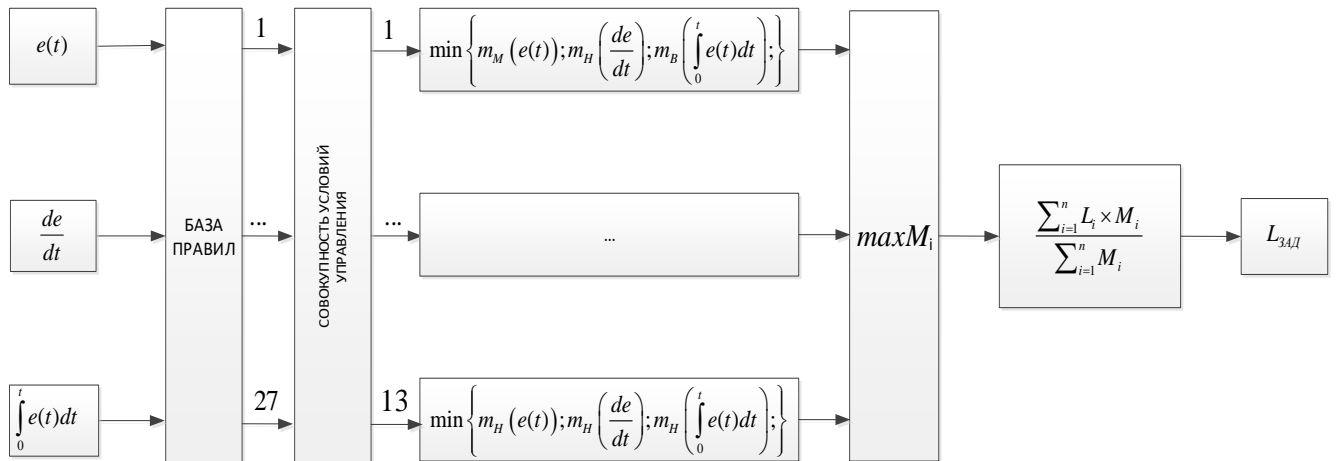


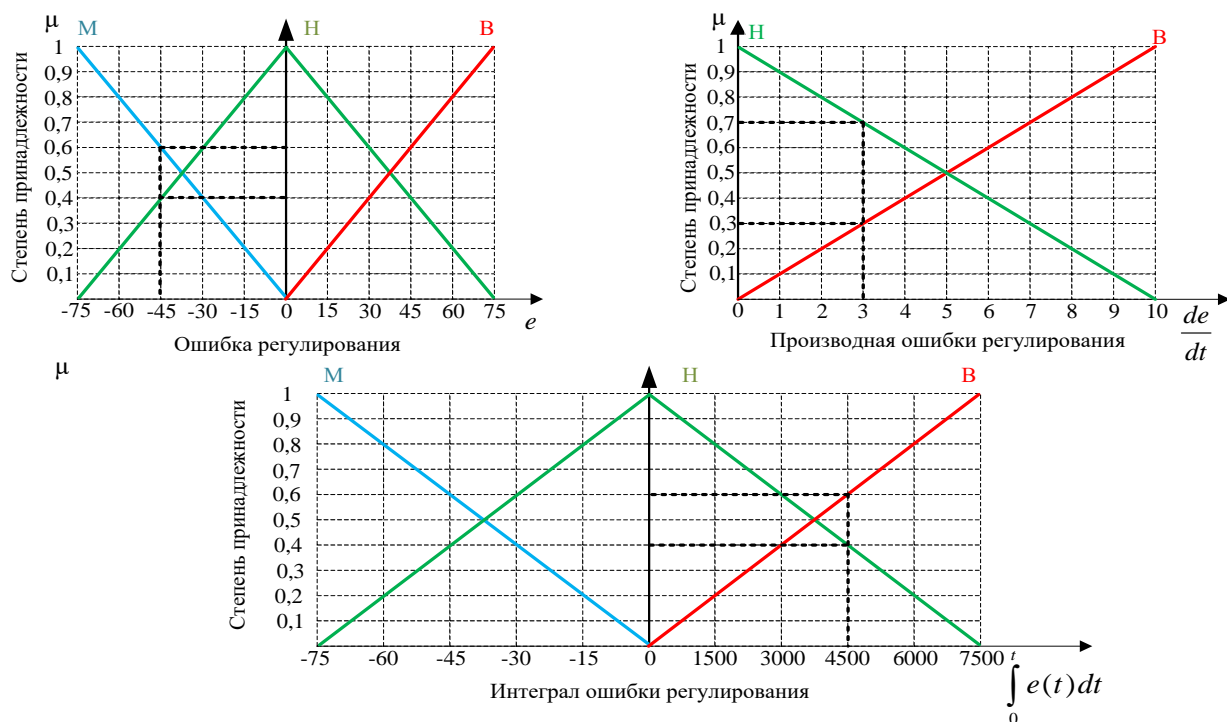
Рисунок 2.9 – Структурная схема нечеткого ПИД-регулятора

Для более детального описания системы, рассмотрим принцип работы нечеткого ПИД-регулятора. В процессе редуцирования газа из газопровода с максимально разрешенным давлением  $75 \text{ кг/см}^2$  в газопровод с давлением  $55 \text{ кг/см}^2$ , требуется поддержать заданную уставку в  $50 \text{ кг/см}^2$ . Дестабилизирующим фактором в данном процессе является динамически изменяющееся давление на входе регулятора, обусловленного спецификой переменного режима работы газопровода. Качество предъявляемые к данной системе – это минимальное время достижения заданного значения (уставки), а также отсутствия перерегулирования и автоколебательного процесса в системе.

Для процедуры дефазификации осуществим переход входных переменных к нечетким, примем стандартные формы функций принадлежности трех термов (рисунок 2.10).

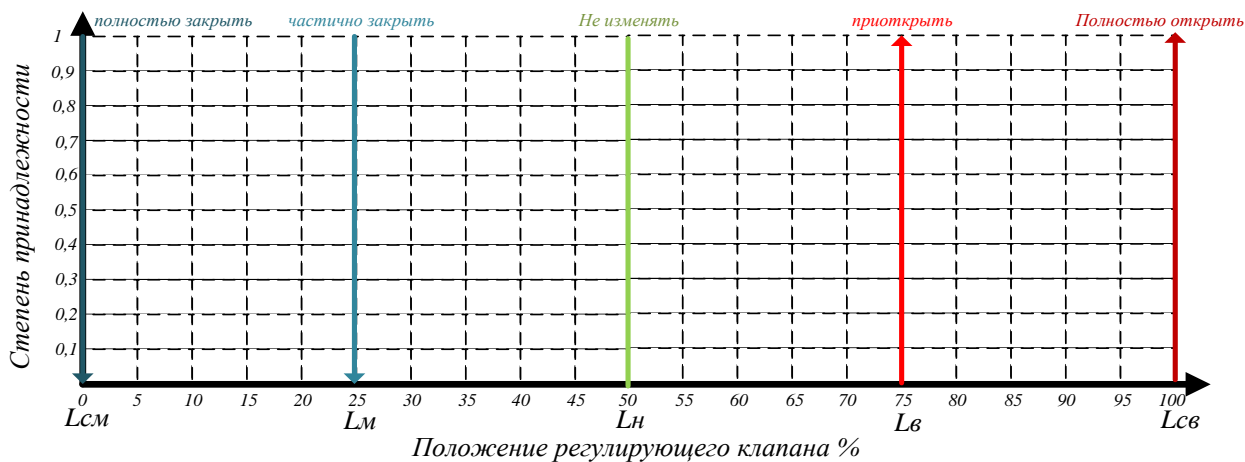
Процедура возмущающего воздействия на регулирующий орган определяется заданным процентом его открытия  $L_{\text{зад}}$  и принимает значение от 0 до 100 %. Представим управление положением клапана в нечетких лингвистических переменных, обусловленных пятью термами (рисунок 2.11).

Далее через нечеткие переменные составим свод правил всех возможных вариаций управления на основе экспертного заключения.



М - ниже нормы; Н - норма; В - выше нормы

Рисунок 2.10 – Фикции принадлежности ПИД составляющей



$L_{см}$  - полностью закрыть;  $L_m$  - частично закрыть;  $L_n$  - не изменять;  $L_v$  - частично открыть;  $L_{св}$  - полностью открыть

Рисунок 2.11 – Лингвистические переменные открытия клапана

Если ошибка регулирования, ее производная и интегральная составляющая уменьшаются, то положение клапана не изменяется. Через нечеткие переменные правило имеет следующий вид:

$$\text{если } e(t) = M; \frac{de}{dt} = M; \int_0^t e(t)dt = M \text{ то } L = H.$$

При уменьшении ошибки регулирования, ее производной и неизменной интегральной составляющей, клапан частично открывается. Через нечеткие переменные такое правило имеет вид:

$$\text{если } e(t) = M; \frac{de}{dt} = M; \int_0^t e(t)dt = H \text{ то } L = B.$$

В итоге учитывая все возможные условия получим 27 вариантов правил (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Возможные вариации условий управления

| №п/п | $e(t)$ | $\frac{de}{dt}$ | $\int_0^t e(t)dt$ | Реализуемость вариантов | $L$ |
|------|--------|-----------------|-------------------|-------------------------|-----|
| 1    | M↓     | M↓              | M↓                | +                       | H   |
| 2    | M↓     | H               | M↓                | +                       | B   |
| 3    | M↓     | B↑              | M↓                | +                       | CB  |
| 4    | M↓     | M↓              | H                 | -                       | -   |
| 5    | M↓     | H               | H                 | -                       | -   |
| 6    | M↓     | B↑              | H                 | -                       | -   |
| 7    | M↓     | M↓              | B↑                | +                       | H   |
| 8    | M↓     | H               | B↑                | +                       | M   |
| 9    | M↓     | B↑              | B↑                | +                       | CM  |
| 10   | H      | M↓              | M↓                | -                       | -   |
| 11   | H      | H               | M↓                | -                       | -   |
| 12   | H      | B↑              | M↓                | -                       | -   |
| 13   | H      | M↓              | H                 | -                       | -   |
| 14   | H      | H               | H                 | +                       | H   |
| 15   | H      | B↑              | H                 | -                       | -   |
| 16   | H      | M↓              | B↑                | -                       | -   |
| 17   | H      | H               | B↑                | -                       | -   |
| 18   | H      | B↑              | B↑                | -                       | -   |
| 19   | B↑     | M↓              | M↓                | +                       | M   |
| 20   | B↑     | H               | M↓                | +                       | CM  |
| 21   | B↑     | B↑              | M↓                | +                       | CM  |
| 22   | B↑     | M↓              | H                 | -                       | -   |
| 23   | B↑     | H               | H                 | -                       | -   |
| 24   | B↑     | B↑              | H                 | -                       | -   |
| 25   | B↑     | M↓              | B↑                | +                       | B   |
| 26   | B↑     | H               | B↑                | +                       | B   |
| 27   | B↑     | B↑              | B↑                | +                       | CB  |

Для удобства визуализации процесса поведения системы представим данные в виде графиков (рисунок 2.12).

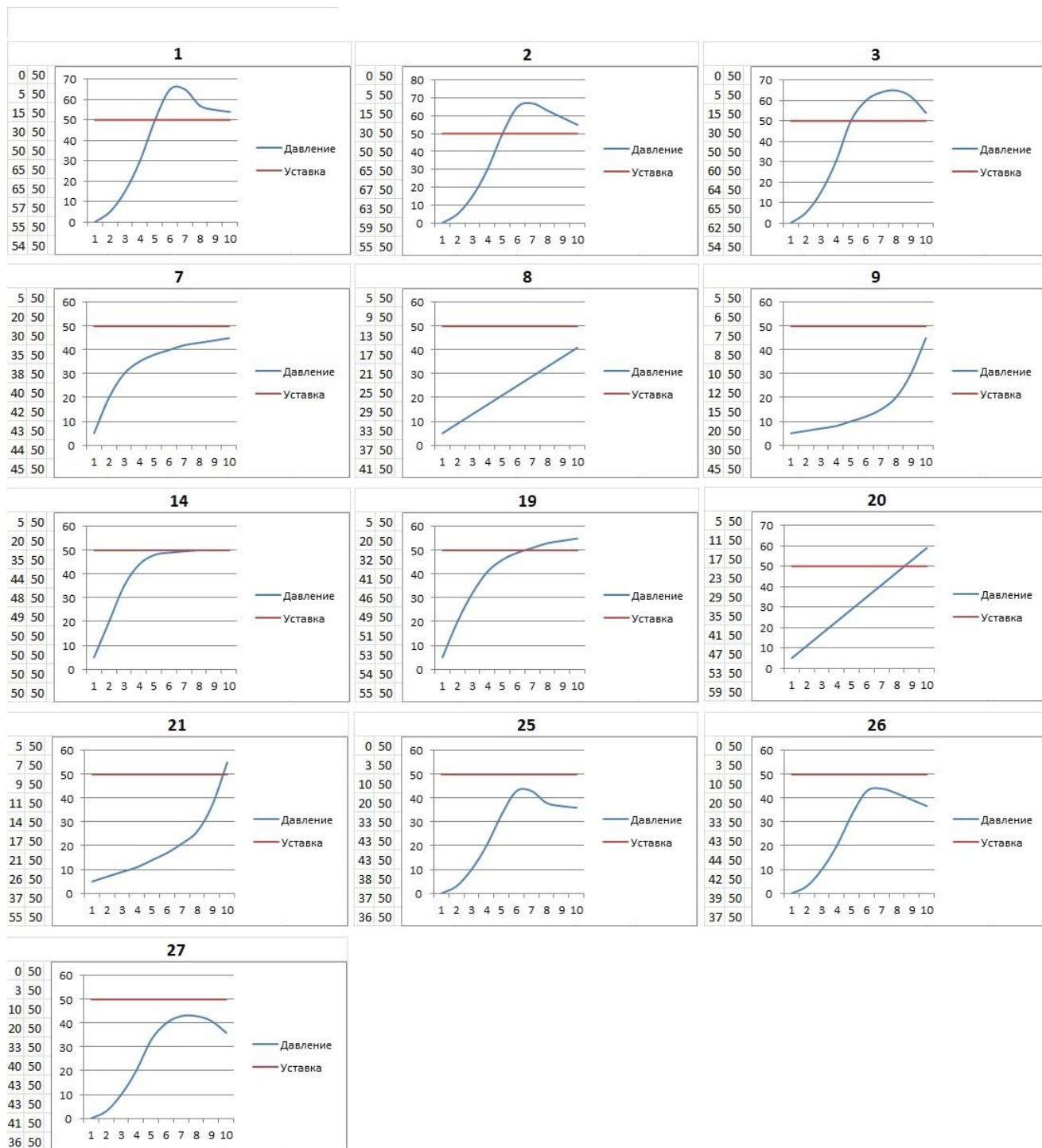


Рисунок 2.12 – Визуальное представление поведения системы при изменении входных лингвистических переменных

В итоге получаем свод из 13 правил совокупности условий управления. Далее аналогично принципу нечеткого логического регулирования вычисляется

управляющее воздействие на клапан по алгоритму Мамдани. Для дефазификации нечетких переменных применим метод центра тяжести в произвольной точке движения системы

$$L_{3AD} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \times M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (2.2)$$

## 2.4 Математическое описание гибридного нечеткого управления процессом редуцированием газа

При управлении сложными нестационарными объектами, которые работают в условиях неустойчивости, широко применяются регуляторы, сочетающие классический ПИД-закон управления с аппаратом нечеткой логики [89, 96].

Процесс автонастройки регулятора с использованием блока нечеткой логики необходимо начинать с поиска начальных приближенных коэффициентов:  $K_P$  – пропорционального,  $K_I$  – интегрального и  $K_D$  – дифференциального.

Для настройки ПИД-регулятора известно большое количество методов [112], но в работе выделим следующие:

- метод Зиглера-Никольса;
- метод Чена-Кронеса-Ресвика (CHR) без перерегулирования и с 20 % отклонением.

Перечисленные методы используют всего 2 параметра:  $a$  и  $L$ , которые находятся из переходной характеристики регулятора. Формулы для расчета коэффициентов ПИД-регулятора данными методами представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Формулы, применяемые при расчете коэффициентов ПИД-регулятора

| Метод настройки               | $K$      | $T_I$     | $T_D$     |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|
| Зиглера – Никольса            | $1,2/a$  | $0,9 L/K$ | $0,5L/K$  |
| CHR без перерегулирования     | $0,6/a$  | $1,0L/K$  | $0,5L/K$  |
| CHR с 20 % перерегулированием | $0,95/a$ | $1,4L/K$  | $0,47L/K$ |

После расчета коэффициентов осуществляется настройка регулятора с целью улучшения качества регулирования [79, 80]. Для этого в работе используем аппарат нечеткой логики [97].

Функциональная схема нечеткого регулятора представлена на рисунке 2.13.

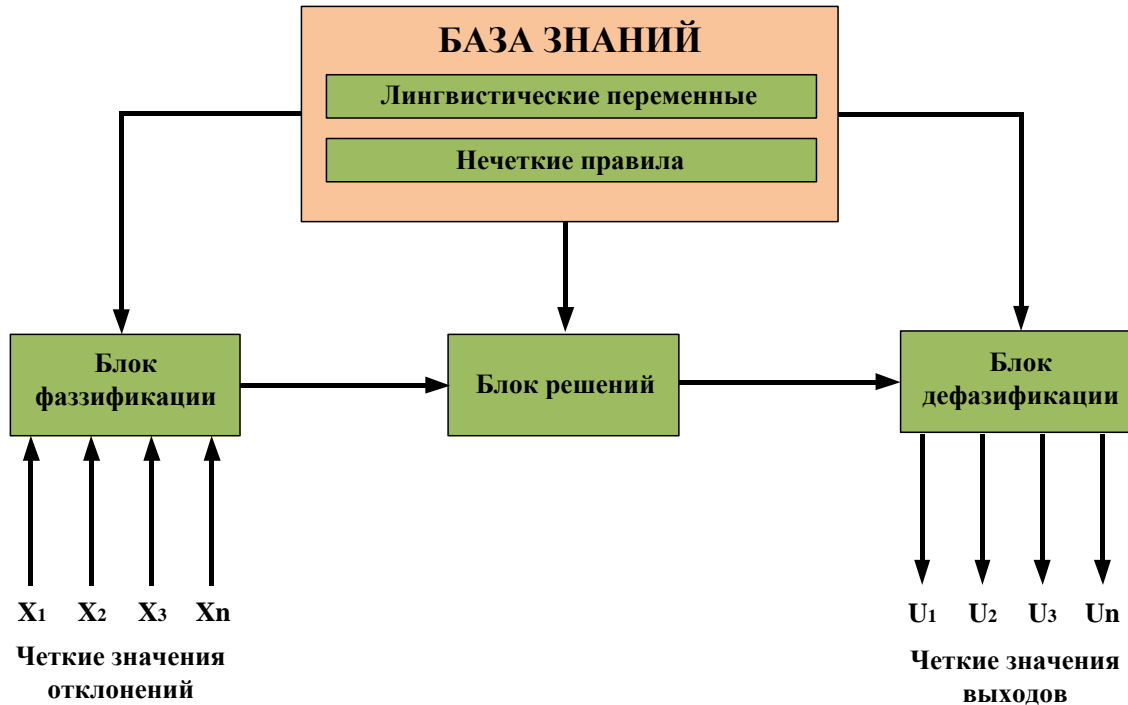


Рисунок 2.13 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора

Из анализа представленной схемы можно сделать вывод, что для формирования управляющих воздействий  $U_1, U_2, U_3, U_n$  на регулятор необходимо осуществить следующие этапы [33]:

- а) получить отклонение управляемых измеряемых величин и скоростей их изменения –  $X_1, X_2, X_3, X_n$ ;
- б) произвести «фазификацию» данных, то есть переход к нечеткой форме в виде лингвистических переменных;
- в) определить нечеткие (качественные) значения выходных переменных (в виде функций принадлежности к соответствующим нечетким подмножествам) на основе заранее сформулированных правил вывода, записанных в базе правил;
- г) произвести «дефазификацию», то есть переход от «нечетких значений» к реальным числовым значениям выходов, используемым для управления объектом –  $U_1, U_2, U_3, U_n$ .

Кроме применения «чистого» нечеткого управления, существуют и другие варианты построения регуляторов с применением аппарата нечеткой логики [104].

Как известно классический вид работы ПИД-регулятора давления газа описывается выражением:

$$u(t) = P + I + D = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

где:  $u(t)$  – управляющее воздействие на регулятор давления;

$e(t)$  – ошибка (рассогласование).

Коэффициенты  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  выбираются на основе заданных качественных показателей управления процессом (время достижения заданной уставки, перерегулирование входной величины и затухание переходных процессов). Но на практике большинство специалистов выполняют поиск таких коэффициентов вручную, методом подбора. Данная процедура является довольно сложной и требует большого опыта. С другой стороны, наличие опыта позволяет построить алгоритм автоматизированной регуляции коэффициентов ПИД-регулятора с использованием аппарата нечеткой логики [27]. Рассмотрим один из способов решения данной проблемы.

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 системы автоматизированного управления (ГНАСУ), 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 ГНАСУ ТП УРГ представлена на рисунке 2.14.

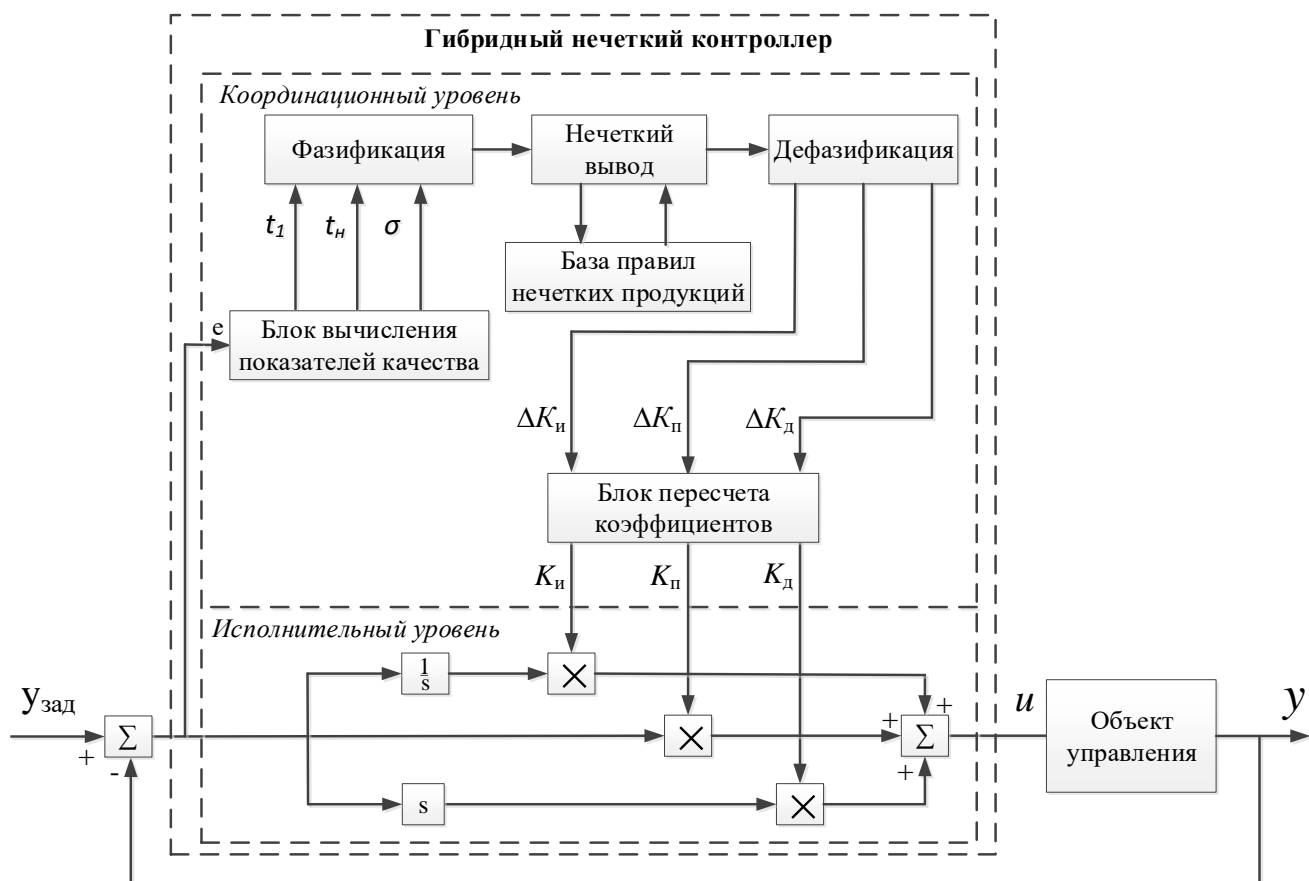


Рисунок 2.14 – Функциональная схема гибридной нечеткой АСУ ТП УРГ

Гибридная нечеткая АСУ УРГ строится из двух уровней иерархии: исполнительный и координационный. Исполнительный уровень синтезирует воздействие  $u$  на объект управления при помощи классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей соответственно.

На координационном уровне с помощью системы нечеткого вывода с разработанной базой продукционных правил на основе показателей отклонения заданной уставки давления  $y_{зад}$  от значения на выходе объекта управления с интервалом времени  $T$ , происходит интеллектуальная настройка ПИД-регулятора с формированием поправочных коэффициентов  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$ .

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  $K_D$ .

Вычисление поправочных коэффициентов  $Su$ ,  $Sn$ ,  $Sd$  формируется по алгоритму нечеткого вывода Мамдани. Взаимосвязь параметров более подробно раскрывается в структурной схеме блока нечеткой автоподстройки, представленной на рисунке 2.15.

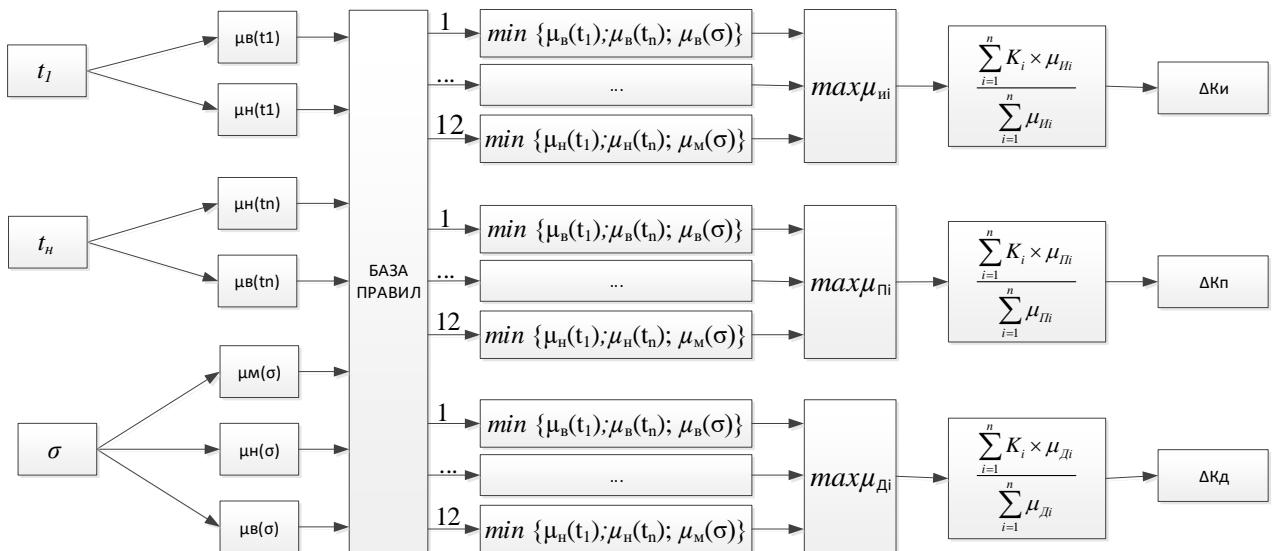


Рисунок 2.15 – Структурная схема интеллектуальной коррекции коэффициентов ПИД-регулятора

Выбираем три показателя [44]: время достижения 10 % от заданного значения; ( $t_1$ ); время нарастания, т.е. достижения 90 % от уставки ( $t_n$ ); превышение за-

данного значения ( $\sigma$ ) и для проведения процедуры фазификации построим функции принадлежности (рисунок 2.16).

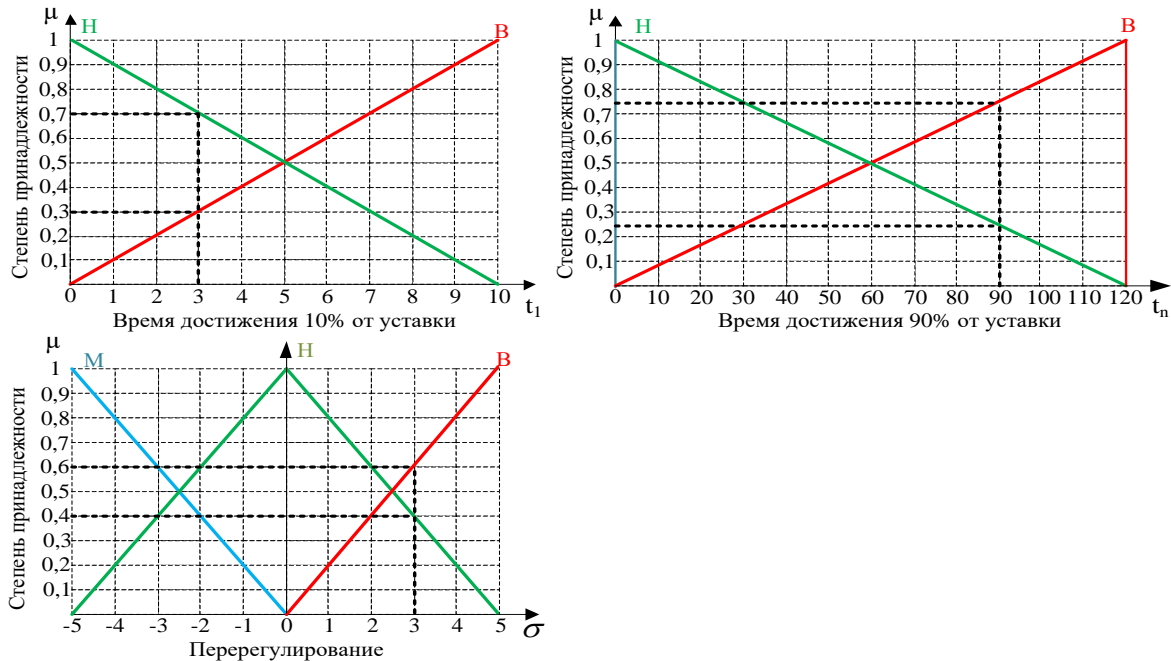


Рисунок 2.16 – Функции принадлежности

В лингвистических переменных нечеткой логики управляющие воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора представим пятью термами (рисунок 2.17.).

Предположим, что цель, которая стоит перед гибридным нечетким регулятором, это обеспечение требуемых показателей качества системы управления, т.е.  $t_1^*$ ,  $t_n^*$ ,  $\sigma^*$ , за счет подстройки коэффициентов ПИД-регулятора. Для этого используем правила, основанные на знаниях и опыте эксперта. При этом будем учитывать следующие правила:

- если время достижения 10 % от заданного значения  $t_1$  и время нарастания  $t_n$  увеличивается и перерегулирование  $\sigma$  возрастает – то увеличиваем интегральный коэффициент  $K_{II}$ , немного уменьшаем пропорциональный коэффициент  $K_{II}$ , и не изменяем дифференциальный коэффициент  $K_{II}$ ;

- если время достижения 10 % от заданного значения  $t_1$  увеличивается и перерегулирование  $\sigma$  возрастает, а время нарастания  $t_n$  не изменяется – то немного увеличиваем интегральный коэффициент  $K_{II}$ , увеличиваем пропорциональный коэффициент  $K_{II}$ , и немного увеличиваем дифференциальный коэффициент  $K_{II}$ ;

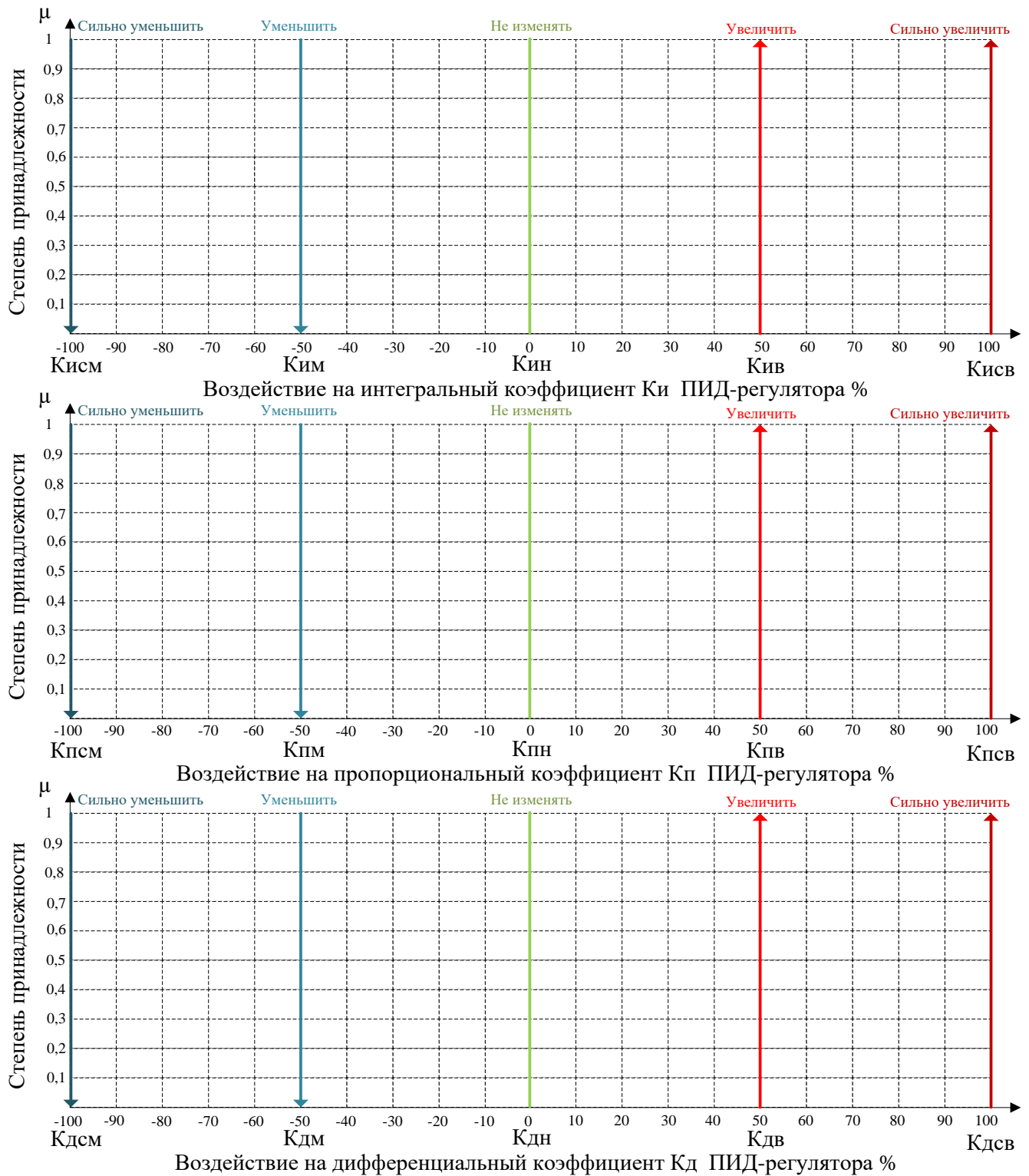


Рисунок 2.17 – Лингвистические переменные воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора

– если время достижения 10 % от заданного значения  $t_1$  увеличивается, а перерегулирование  $\sigma$  и время нарастания  $t_n$  не изменяется – то немного увеличиваем

интегральный коэффициент  $K_{II}$ , не изменяем пропорциональный коэффициент  $K_{II}$ , и сильно увеличиваем дифференциальный коэффициент  $K_{Д}$ .

Аналогично составляются остальные совокупности правил настройки ПИД-регулятора. Для удобства занесем их в таблицу 2.5.

Вычисление поправочных коэффициентов  $S_i$ ,  $S_p$ ,  $S_d$  формируется по алгоритму нечеткого вывода Мамдани. В качестве метода дефазификации нечетких переменных используется метод центра масс:

$$\Delta K_j = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \times \mu_{ji}}{\sum_{i=1}^n \mu_{ji}} \quad (2.4)$$

Таблица 2.5 – Совокупности правил настройки ПИД-регулятора

| №п/п | $t_1$ | $t_n$ | $\sigma$ | $K_{II}$ | $K_{II}$ | $K_{Д}$ |
|------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|
| 1    | 1     | 2     | 3        | 4        | 5        | 6       |
| 2    | В↑    | В↑    | В↑       | В↑       | М↓       | Н       |
| 3    | В↑    | Н     | В↑       | В↑       | В↑       | В↑      |
| 4    | В↑    | В↑    | Н        | В↑       | В↑       | Н       |
| 5    | В↑    | Н     | Н        | В↑       | Н        | СВ↑↑    |
| 6    | В↑    | В↑    | М↓       | В↑       | В↑       | Н       |
| 7    | В↑    | Н     | М↓       | Н        | В↑       | Н       |
| 8    | Н     | В↑    | В↑       | В↑       | М↓       | Н       |
| 9    | Н     | Н     | В↑       | Н        | М↓       | М↓      |
| 10   | Н     | В↑    | Н        | В↑       | В↑       | Н       |
| 11   | Н     | Н     | Н        | Н        | Н        | Н       |
| 12   | Н     | В↑    | М↓       | СВ↑↑     | М↓       | В↑      |
| 13   | Н     | Н     | М↓       | М↓       | В↑       | Н       |

Где  $SM\downarrow\downarrow$  – сильно уменьшить;  $M\downarrow$  – уменьшить;  $N$  – не изменять;  $V\uparrow$  – увеличить;  $SV\uparrow\uparrow$  – сильно увеличить.

### **Выводы по второй главе**

1. На основе технологической схемы редуцирования давления газа произведено математическое описание процесса с использованием нечеткого алгоритма Мамдани (Mamdani). Функции принадлежности сигналов «вход-выход», а также совокупность условий управления технологическим процессом редуцирования газа сформированы на основе опыта диспетчерского и обслуживающего персонала. Однако, для получения итоговой оценки данная модель нуждается в доработке.

2. На основе анализа функционирования системы автоматизированного управления УРГ предложен метод адаптации «табличная автонастройка». Также разработана схема регулятора давления газа и алгоритм функционирования, обеспечивающий последовательность выполнения действий. Предложенный метод управления обладает высоким быстродействием (откликом), так как система разделена на два контура управления, однако он включает в себя трудоемкий процесс по нахождению и созданию совокупной базы режимных коэффициентов.

3. Исходя из характеристик системы редуцирования давления газа предложен метод ПИД-регулирования с применением аппарата нечеткой логики. Разработана схема нечеткого ПИД-регулятора давления газа и описан процесс функционирования нечеткой экспертной системы, определяющей оптимальные настройки ПИД-регулятора для его адаптации к объекту управления используя ошибку регулирования, а также ее интегральную и дифференциальную составляющую по времени.

4. На основе анализа классических законов регулирования и применением аппарата нечеткой логики разработан метод гибридного управления, сочетающий в себе настройку регулятора методом Зиглера – Никольса, а также подстройку его коэффициентов при динамическом режиме работы. Разработана схема гибридного

нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов, а также представлена его математическая модель на основе правил, заданных экспертом. Данный метод предполагает создание базы правил, для подстройки коэффициентов ПИД – регулятора, использующий следующие критерии: время достижения 10 % от заданного значения; время нарастания (достижения 90 % от уставки); превышение заданного значения (перерегулирование).

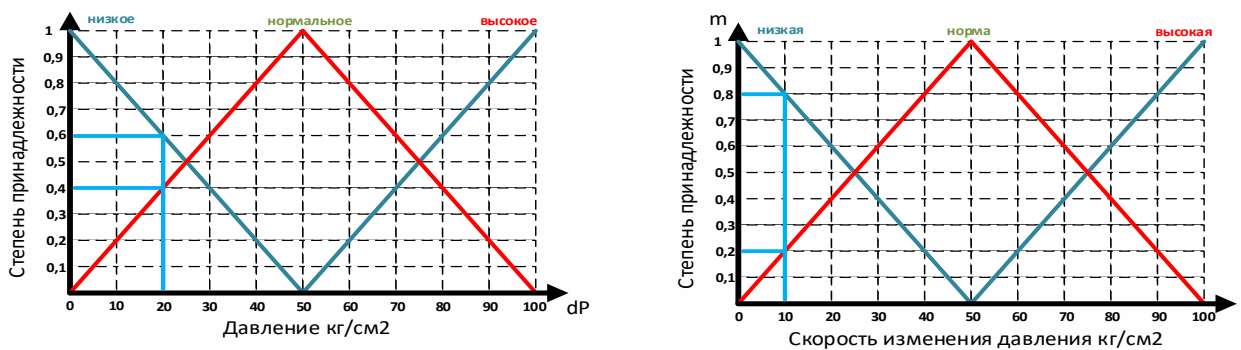
### 3 Исследование различных видов разработанных логических регуляторов в задачах управления процессом редуцирования газа

В данном разделе приводятся результаты исследований логических регуляторов, совместно с научным руководителем, доктором технических наук В.В. Туговым [34; 36; 37; 41; 43; 45; 46]. Личное участие соискателя заключается в разработке математических моделей процесса редуцирования газа в виде нечетких уравнений и их имитационная реализация для анализа влияния основных технологических параметров на качество регулирования давления в газопроводе. Основная задача данного раздела состоит в сравнительном анализе переходных процессов в разработанных логических регуляторах различного типа и выборе оптимального, обеспечивающего высокое качество управления. Доля личного вклада автора составляет 92 %.

#### 3.1 Исследование регулятора на нечеткой логике

Сделаем вычисление управляющего воздействия в произвольной точке движения системы.

Пусть отклонение давления, составляет  $-30 \text{ кг/см}^2$  и оно снижается со скоростью  $-10 \text{ кг/см}^2$ . При этом термы М и Н отклонения давления имеют степень принадлежности равны 0,6 и 0,4 соответственно, а термы М и Н скорости изменения давления соответственно 0,8 и 0,2 (рисунок 3.1).



М – ниже нормы; Н – норма; В – выше нормы

Рисунок 3.1 – Функция принадлежности изменения давления и скорости

Степень принадлежности к остальным термам равна 0. Для принятой формы записи правил степень принадлежности antecedента каждого правила определяется по минимуму всех условий, т.е. для вывода имеют значения правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

- 1) если  $dP = M$  и  $dV = M$ , то  $L = CB$ ;
- 2) если  $dP = M$  и  $dV = H$ , то  $L = B$ ;
- 3) если  $dP = H$  и  $dV = M$ , то  $L = B$ ;
- 4) если  $dP = H$  и  $dV = H$ , то  $L = H$ .

Каждое из этих правил дает степень принадлежности выводу по минимуму:

- 1)  $M_{CB}(L) = \min \{m_M(dP); m_M(dV)\} = \min \{0,6; 0,8\} = 0,6$ ;
- 2)  $M_B(L) = \min \{m_M(dP); m_H(dV)\} = \min \{0,6; 0,2\} = 0,2$ ;
- 3)  $M_B(L) = \min \{m_H(dP); m_M(dV)\} = \min \{0,4; 0,8\} = 0,4$ ;
- 4)  $M_H(L) = \min \{m_H(dP); m_H(dV)\} = \min \{0,4; 0,2\} = 0,2$ .

На втором этапе формирования нечеткого вывода, определим степень принадлежности термов выходной переменной по максимальному значению. Например, выражения п. 2 и 3 дают различные значения степени принадлежности для терма  $Mвб$ , но берется максимальное из них:

- 1)  $M_B(L) = \max \{m_B(L); m_B(L)\} = \max \{0,2; 0,4\} = 0,4$ .

Таким образом, при данном состоянии входных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения:

$$\{m_{CM}, m_M, m_H, m_B, m_{CB}\} = \{0; 0; 0,2; 0,4; 0,6\}.$$

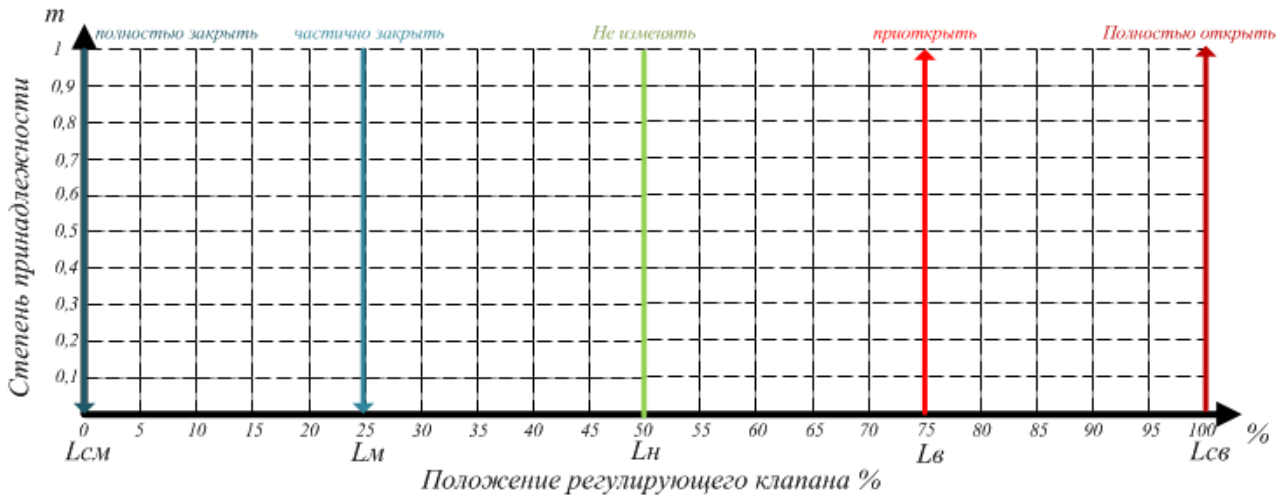
Положение клапана в лингвистических переменных представлено на рисунке 3.2.

Для перехода от нечетких выводов к управляющему воздействию на клапан используем формулу дефазификации по методу центра тяжести:

$$L_{Зад} = \frac{L_{CM} \times m_{CM} + L_M \times m_M + L_H \times m_H + L_B \times m_B + L_{CB} \times m_{CB}}{m_{CM} + m_M + m_H + m_B + m_{CB}}. \quad (3.1)$$

При подстановке в формулу числовых значений, получим:





СМ – закрыть клапан; М – частично закрыть клапан; Н – не изменять положение; В – частично открыть клапан; СВ – открыть клапан полностью

Рисунок 3.2 – Лингвистические переменные открытия клапана

$$L_{\text{зад}} = \frac{0 \times 0 + 25 \times 0 + 50 \times 0,2 + 75 \times 0,4 + 100 \times 0,6}{0 + 0 + 0,6 + 0,4 + 0,2} = 83,3\%$$

Отсюда следует, для поддержания требуемой уставки давления, клапан необходимо открыть на 83,3 %, следовательно

$$I_{\text{зад}} = \frac{83,3\% \times 16 \text{mA}}{100\%} = 17,33 \text{mA}$$

Рассмотрим практическую реализацию разработанного алгоритма и правил нечеткой логики на узле редуцирования газа под управлением системой линейной телемеханики «Магистраль 2» [41]. Для этого в конфигураторе ZondDataBase создаются две базы данных:

- 1) база данных, непосредственно объекта управления (полевой уровень);
- 2) база данных диспетчерского пункта (верхний уровень АСУТП предприятия).

В конфигураторе задаются входные и выходные порты баз данных, их параметры, протокол связи модулей ввода-вывода, а также тип данных и параметры линии [46]. Для реализации обмена информацией между модулями ввода-вывода и процессорным модулем используется промышленный протокол Modbus RTU [62]. На аппаратном уровне связь организована при помощи двухпроводного интерфейса RS-485 работающего в полудуплексном режиме.

Для реализации управления разработан репер параметра – сигнал задания процента открытия клапана регулятора и привязан к модулю вывода аналогового сигнала 4-20 мА. Согласно карте Modbus регистров на модуль управления, заданы следующие параметры: Modbus адрес устройства, Тип Modbus – Holding, адрес регистра чтения (записи). По аналогии разработаны репера параметров «задание уставки», «давление после клапана-регулятора» и «положение клапана-регулятора».

Для написания алгоритма управления на основе нечеткой логики использовался встроенный язык программирования ST (язык структурированного текста) [12]. Фрагмент алгоритма представлен на рисунке 3.3.

```

FUNC Scorost_Menshe(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления уменьшается"
if LT(x,0)
result=x*(-1/Opred_Plecha(P_zad))
else
result=0
endif
return(result)
endfunc

FUNC Scorost_Norma(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления не изменяется"
if LT(x,0)
result=x*(1/Opred_Plecha(P_zad))+1
else
result=x*(-1/Opred_Plecha(P_zad))+1
endif
return(result)
endfunc

FUNC Scorost_Bolshe(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления увеличивается"
if GT(x,0)
result=x*(1/Opred_Plecha(P_zad))
else
result=0
endif
return(result)
endfunc

FUNC Proc_Otkr(P_zad,P_izm,V_izm) ; функция "процент открытия", дефазификация по методу центра тяжести
CM=MIN(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad))
M=MAX(min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)))
H=NMAX(min(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)))
min(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad))
B=NMAX(min(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad)))
CB=MIN(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad))
result=(CM*CM_ust+M*M_ust+H*H_ust+B*B_ust+CB*CB_ust)/(CM+M+H+B+CB)
return(result)
endfunc

```

Рисунок 3.3 – Фрагмент кода программы

На рисунке 3.4, 3.5 представлен сравнительный анализ переходных процессов классического ПИД- регулятора и регулятора на нечеткой логике.

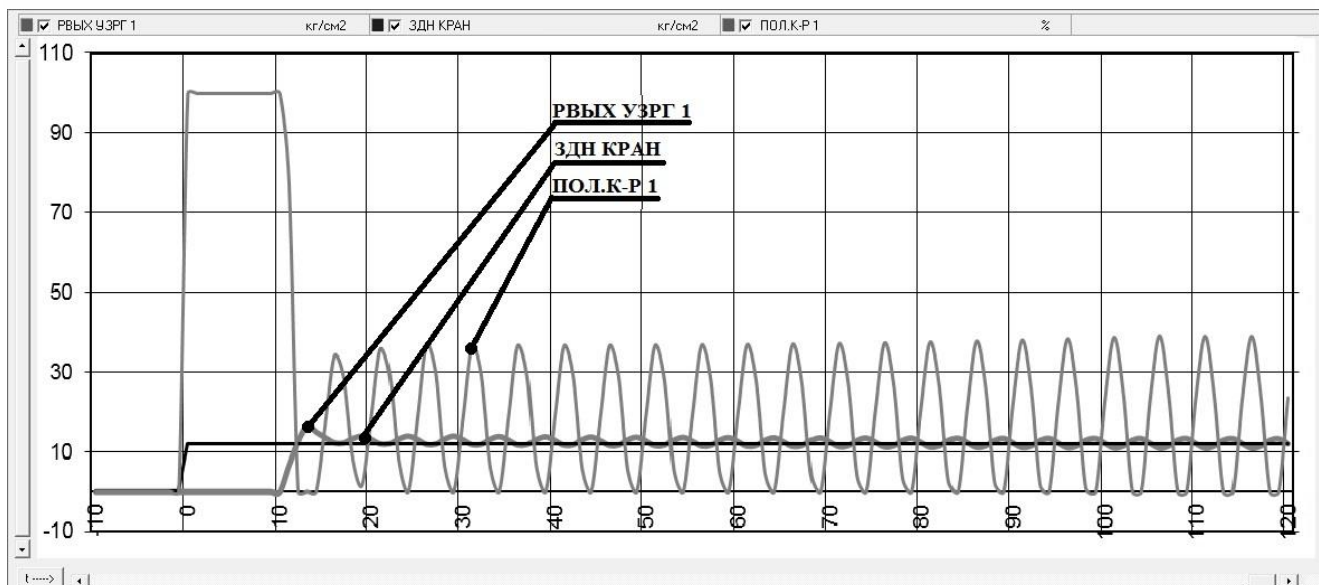


Рисунок 3.4 – График переходных процессов ПИД-регулятора

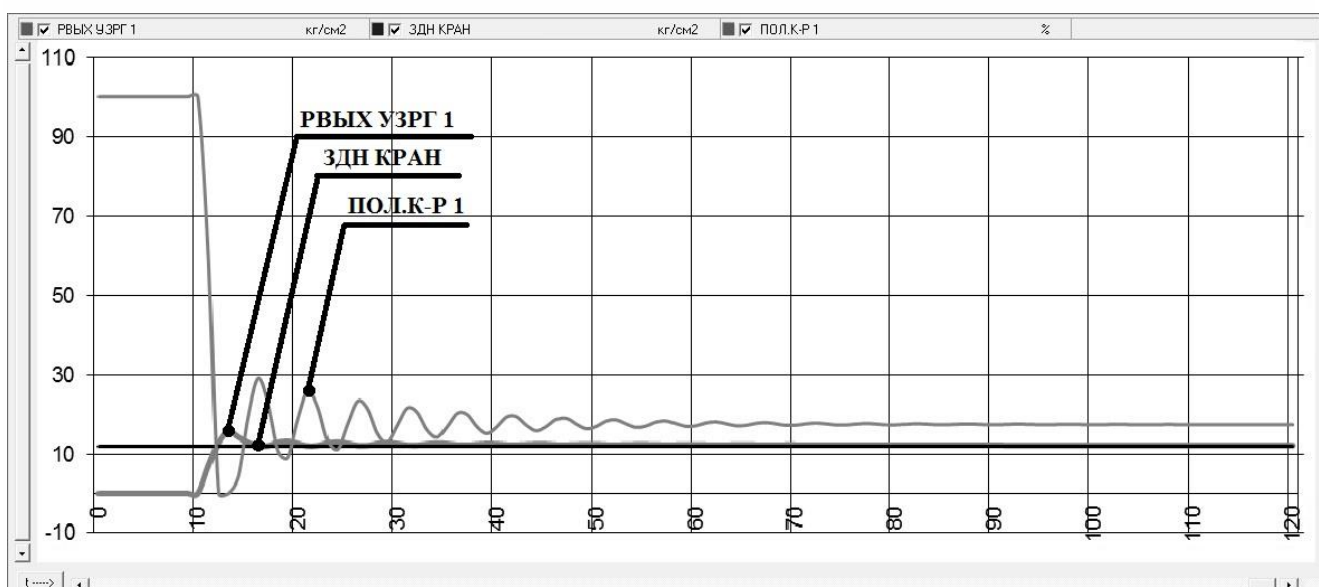


Рисунок 3.5 – График переходных процессов регулятора на нечеткой логике

Анализируя переходные характеристики, представленные на рисунке 3.5, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм управления на базе нечеткой логики, позволяет более качественно управлять процессом регулирования, в отличие от традиционного ПИД-регулятора [37]. Во-первых, алгоритм позволяет лучше подстроиться под переменный режим работы газопровода и не требует по-

стоянного подбора коэффициентов ПИД-регулятора. Во-вторых, увеличивает срок службы клапана, в связи с минимальным воздействием на его механическую часть, а главное сводит к минимуму возникновение внештатных ситуаций на объекте. Таким образом, у нечетких систем регулирования возможности значительно шире, чем у традиционных ПИД-регуляторов.

### 3.2 Исследование адаптивного регулятора с табличной автонастройкой

Рассмотрим пример функционирования блока табличной автонастройки ПИД-регулятора давления газа. Для вычисления режимных коэффициентов экспертом, выберем критерии предъявляемые к системе регулирования:

- давление газа незначительно изменилось  $\pm 0,3$  кг/см<sup>2</sup>;
- давление газа возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,7$  кг/см<sup>2</sup>;
- давление газа резко возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 1,4$  кг/см<sup>2</sup>.

Принадлежность к критерию оценивается сравнением установленной величины и величины возмущающего воздействия. Затем полученный критерий сопоставляется со значениями коэффициентов ПИД-регулятора из таблицы, просчитанной под различные режимы работы [45].

Таблица 3.1 – Режимные коэффициенты регулятора

| №п/п | Режим работы регулятора | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ |
|------|-------------------------|-------|-------|-------|
| 1    | P↑(↓)                   | 2,546 | 0,841 | 1,967 |
| 2    | P↑↑(↓↓)                 | 7,482 | 2,992 | 4,673 |
| 3    | P↑↑↑(↓↓↓)               | 8,993 | 5,994 | 3,373 |

Для наглядного представления переходных процессов данного метода, проведем апробацию работы системы на узле редуцирования газа. На рисунке 3.6 представлена работа адаптивного ПИД-регулятора с табличной автонастройкой.

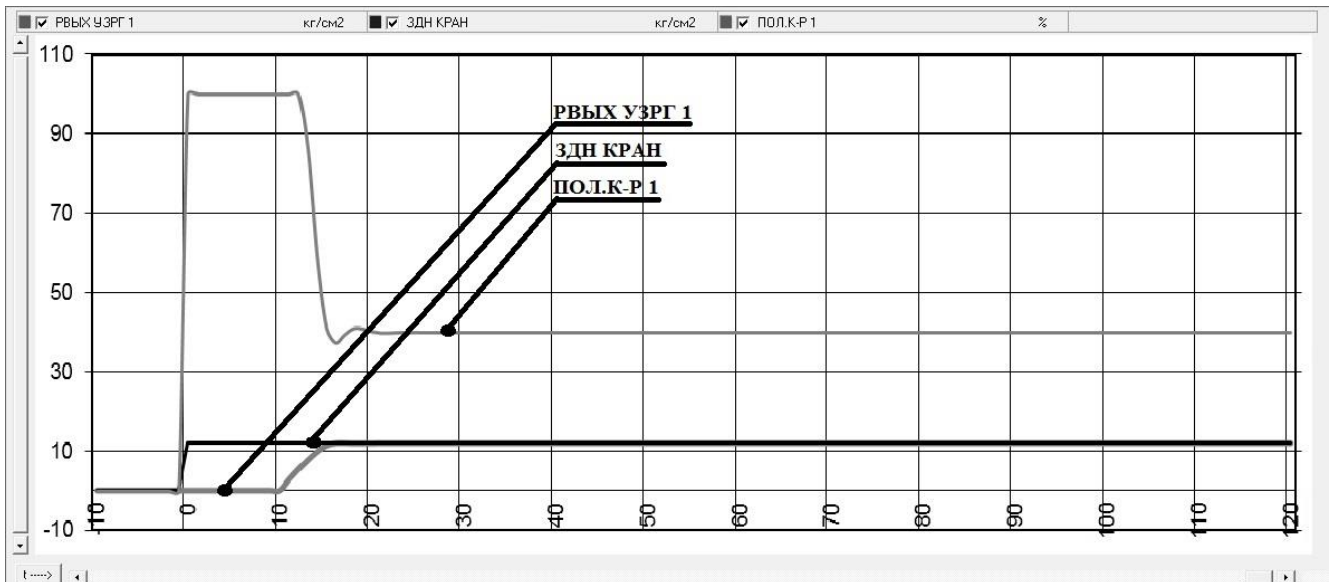


Рисунок 3.6 – Работа адаптивного ПИД-регулятора с табличной авто-настройкой

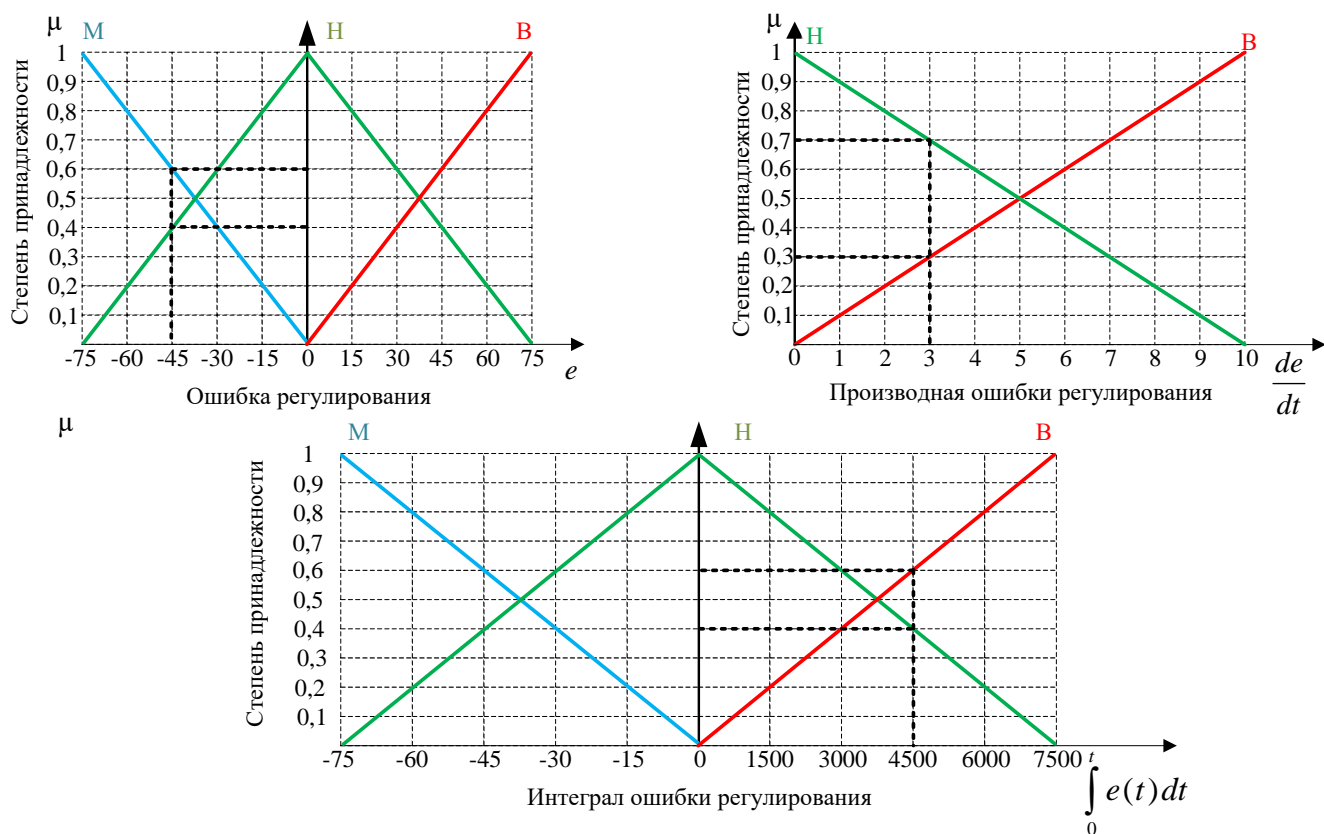
Анализируя работу адаптивного ПИД-регулятора, можно сделать вывод о том, что адаптация в виде табличного управления, целесообразно применять тогда, когда типы и величины дестабилизирующих факторов известны заранее. Данный метод позволяет значительно улучшить качество регулирования, а также установить взаимосвязь между параметрами объекта, выбирая значения коэффициентов в зависимости от конкретной ситуации [36]. Такой вид адаптации можно применять для управления нелинейными объектами и динамическими процессами, где существует необходимость изменения параметров в зависимости от определенных условий.

### 3.3 Исследование процесса ПИД-регулирования с применением аппарата нечеткой логики

Произведем вычисление управляющего воздействия на регулирующей орган в произвольной точке движения системы.

Пусть ошибка управления составляет – 45, ее производная равна 3, а интегральная составляющая 4500.

В данном случае термы принадлежности ошибки регулирования  $M$  и  $H$  равны  $0,6$  и  $0,4$  соответственно, ее производная  $V=0,3$   $H=0,7$ , а интегральная составляющая  $V=0,6$  и  $H=0,4$  (рисунок 3.7). У остальных термов степень принадлежности равна нулю.



$M$  - ниже нормы;  $H$  - норма;  $V$  - выше нормы

Рисунок 3.7 – Функции принадлежности характеризующие показатели процесса

Для вывода применим правила минимума условий термов с ненулевыми степенями принадлежности [43] представленные в таблице 3.2.

Исходя из таблицы 3.2, данные условия представим следующим образом:

- 1) Если  $e(t) = M$ ;  $\frac{de}{dt} = H$  и  $\int_0^t e(t) dt = V$ , то  $L = M$ ;
- 2) Если  $e(t) = M$ ;  $\frac{de}{dt} = V$  и  $\int_0^t e(t) dt = V$ , то  $L = CM$ ;
- 3) Если  $e(t) = H$ ;  $\frac{de}{dt} = H$  и  $\int_0^t e(t) dt = H$ , то  $L = H$ .

Таблица 3.2 – Термы принадлежностей

| $e(t)$            | $\frac{de}{dt}$ | $\int_0^t e(t)dt$ | $L$ |
|-------------------|-----------------|-------------------|-----|
| $M\downarrow=0,6$ | $M\downarrow=0$ | $M\downarrow=0$   | H   |
| $M\downarrow=0,6$ | $H=0,7$         | $M\downarrow=0$   | B   |
| $M\downarrow=0,6$ | $B\uparrow=0,3$ | $M\downarrow=0$   | CB  |
| $M\downarrow=0,6$ | $M\downarrow=0$ | $B\uparrow=0,6$   | H   |
| $M\downarrow=0,6$ | $H=0,7$         | $B\uparrow=0,6$   | M   |
| $M\downarrow=0,6$ | $B\uparrow=0,3$ | $B\uparrow=0,6$   | CM  |
| $H=0,4$           | $H=0,7$         | $H=0,4$           | H   |
| $B\uparrow=0$     | $M\downarrow=0$ | $M\downarrow=0$   | M   |
| $B\uparrow=0$     | $H=0,7$         | $M\downarrow=0$   | CM  |
| $B\uparrow=0$     | $B\uparrow=0,3$ | $M\downarrow=0$   | CM  |
| $B\uparrow=0$     | $M\downarrow=0$ | $B\uparrow=0,6$   | B   |
| $B\uparrow=0$     | $H=0,7$         | $B\uparrow=0,6$   | B   |
| $B\uparrow=0$     | $B\uparrow=0,3$ | $B\uparrow=0,6$   | CB  |

Каждое из этих правил определяет степень принадлежности по минимальному критерию:

$$1) M_M(L) = \min \left\{ m_M(e(t)); m_H\left(\frac{de}{dt}\right); m_B\left(\int_0^t e(t)dt\right) \right\} = \min \{0,6;0,7;0,6\} = 0,6$$

$$2) M_{CM}(L) = \min \left\{ m_M(e(t)); m_B\left(\frac{de}{dt}\right); m_B\left(\int_0^t e(t)dt\right) \right\} = \min \{0,6;0,3;0,6\} = 0,3$$

$$3) M_H(L) = \min \left\{ m_H(e(t)); m_H\left(\frac{de}{dt}\right); m_H\left(\int_0^t e(t)dt\right) \right\} = \min \{0,4;0,7;0,4\} = 0,4$$

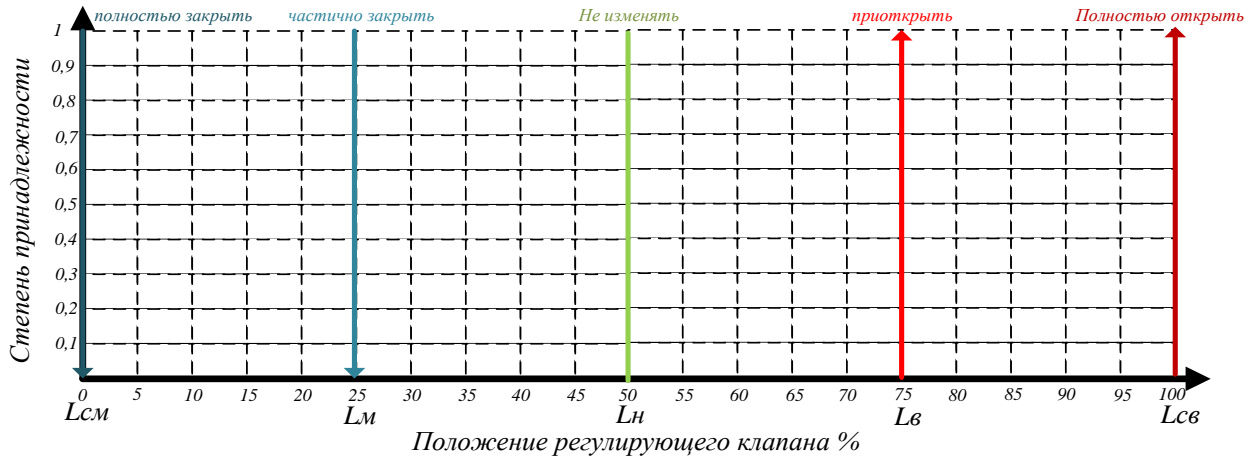
Если выражения имеют различные степени принадлежности для одного и того же терма, то на втором этапе определяют степень принадлежности термов входной переменной по максимальному значению.

Поэтому степень принадлежности термов выходной переменной в рассматриваемом случае принимают следующие значения:

$$\{m_{CM}, m_M, m_H, m_B, m_{CB}\} = \{0,3;0,6;0,4;0;0\}.$$

Для вычисления управляющего воздействия на клапан воспользуемся (процедуры дифазификации) методом центра масс:

$$L_{3AD} = \frac{L_{CM} \times m_{CM} + L_M \times m_M + L_H \times m_H + L_B \times m_B + L_{CB} \times m_{CB}}{m_{CM} + m_M + m_H + m_B + m_{CB}}, \quad (3.2)$$



$L_{см}$ -полностью закрыть;  $L_m$ -частично закрыть;  $L_n$ -не изменять;  $L_v$ -частично открыть;  $L_{св}$ -полностью открыть.

Рисунок 3.8 – Лингвистические переменные открытия регулирующего клапана

и подставив значения получим:

$$L_{зад} = \frac{0,3 \times 0 + 0,6 \times 25 + 0,4 \times 50 + 0 \times 75 + 0 \times 100}{0,3 + 0,6 + 0,4 + 0 + 0} = 26,9\%$$

Для апробации алгоритма полученных вычислений на объекте воспользуемся SCADA-модулем комплекса программ Zond 2006.

Дестабилизирующим фактором в данном процессе является динамически изменяющееся входное давление перед регулятором. Для проведения сравнительного анализа качества переходного процесса апробируем работу регулирующего клапана (рисунок 3.9).

Анализируя переходные характеристики, изображенные на рисунке 3.9, можно сделать вывод о том, что данный регулятор обладает достаточным запасом устойчивости к переменному давлению на входе, однако время достижения уставки значительно выше, чем у ПИД-регулятора с табличной автонастройкой.



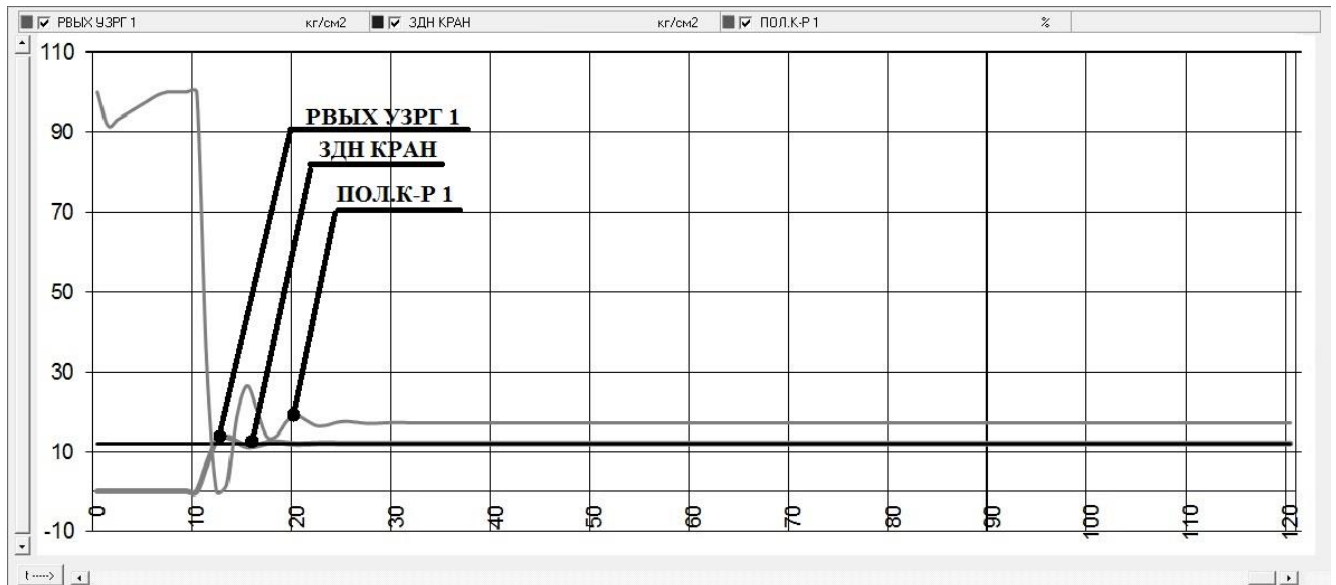


Рисунок 3.9 – Графики переходных процессов нечеткого логического ПИД-регулятора

### 3.4 Исследование нечеткого гибридного регулятора

Проведем исследование гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов используя следующие значения переменных: время достижения 10 % от заданного значения  $t_1 = 3$  сек; время нарастания, т.е. достижения 90 % от уставки  $t_n = 90$  сек; перерегулирование составляет  $\sigma = 3$  %.

При этом термы Н и В отклонения времени достижения 10 % от уставки имеют степень принадлежности равные 0,7 и 0,3 соответственно, термы Н и В времени нарастания составляют 0,75 и 0,25, а перерегулирования 0,4 и 0,6. Степень принадлежности к остальным термам равна 0 (рисунок 3.10).

На первом этапе формирования нечеткого вывода, согласно правилам, определим степень принадлежности термов выходной переменной по минимальному значению [34].

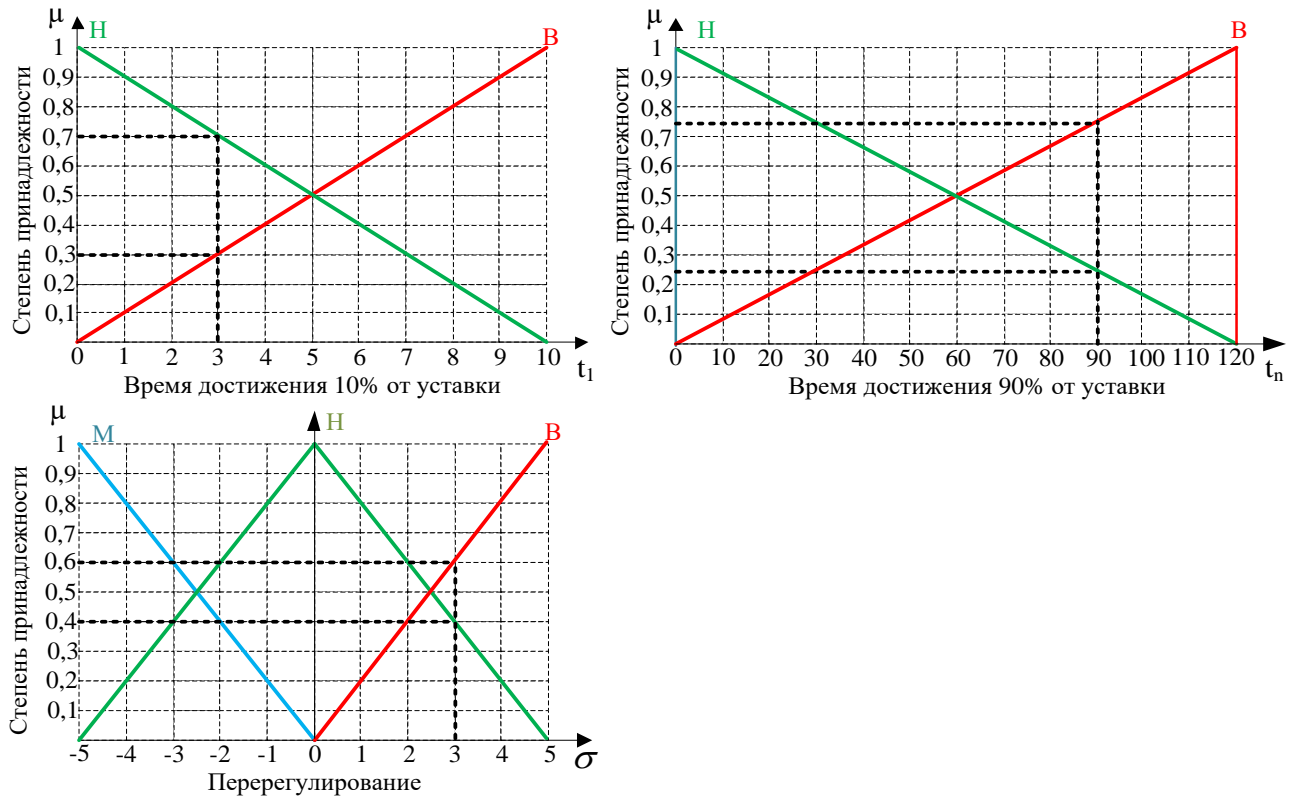


Рисунок 3.10 – Функции принадлежности характеризующие показатели процесса

Для интегрального звена  $K_{II}$ :

- 1)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,6 \} = 0,3;$
- 2)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,6 \} = 0,25;$
- 3)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,4 \} = 0,3;$
- 4)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,4 \} = 0,25;$
- 5)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,0 \} = 0;$
- 6)  $\mu_{кин} = \min \{ \mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0 \} = 0;$
- 7)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,6 \} = 0,6;$
- 8)  $\mu_{кин} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,6 \} = 0,25;$
- 9)  $\mu_{кив} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,4 \} = 0,4;$
- 10)  $\mu_{кин} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,4 \} = 0,25;$
- 11)  $\mu_{кисв} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0 \} = 0;$
- 12)  $\mu_{ким} = \min \{ \mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0 \} = 0.$

Для пропорционального звена  $K_{II}$ :

- 1)  $\mu_{K_{IIIM}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,6\} = 0,3;$
- 2)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0,6\} = 0,25;$
- 3)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,4\} = 0,3;$
- 4)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0,4\} = 0,25;$
- 5)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,0\} = 0;$
- 6)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0\} = 0;$
- 7)  $\mu_{K_{IIIM}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0,6\} = 0,6;$
- 8)  $\mu_{K_{IIIM}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0,6\} = 0,25;$
- 9)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0,4\} = 0,4;$
- 10)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0,4\} = 0,25;$
- 11)  $\mu_{K_{IIIM}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0\} = 0;$
- 12)  $\mu_{K_{IIB}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0\} = 0.$

Для дифференциального  $K_{II}$  звена соответственно:

- 1)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,6\} = 0,3;$
- 2)  $\mu_{K_{IIDB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0,6\} = 0,25;$
- 3)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,4\} = 0,3;$
- 4)  $\mu_{K_{IIDB}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0,4\} = 0,25;$
- 5)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,75; 0,0\} = 0;$
- 6)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_B(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,3; 0,25; 0\} = 0;$
- 7)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0,6\} = 0,6;$
- 8)  $\mu_{K_{IIDM}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_B(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0,6\} = 0,25;$
- 9)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0,4\} = 0,4;$
- 10)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_H(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0,4\} = 0,25;$
- 11)  $\mu_{K_{IIDB}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_B(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,75; 0\} = 0;$
- 12)  $\mu_{K_{IIDH}} = \min \{\mu_H(t_1); \mu_H(t_n); \mu_M(\sigma)\} = \min \{0,7; 0,25; 0\} = 0.$

На втором этапе формирования определим степень принадлежности термов выходных переменных по максимальному значению. К примеру, выражения п.3,4,5,7 дают разные значения степени принадлежности для терма  $\mu_{кив}$ , но выбирается максимальное из них:

- 2)  $\mu_{кин} = \max \{ \mu_{кин} \} = \max \{ 0; 0,25; 0,25 \} = 0,25;$
- 3)  $\mu_{кив} = \max \{ \mu_{кив} \} = \max \{ 0,3; 0,25; 0,3; 0,25; 0; 0,6; 0,4 \} = 0,6;$
- 4)  $\mu_{кпм} = \max \{ \mu_{кпм} \} = \max \{ 0,3; 0,6; 0,25; 0 \} = 0,6;$
- 5)  $\mu_{кпн} = \max \{ \mu_{кпн} \} = \max \{ 0,25; 0,25 \} = 0,6;$
- 6)  $\mu_{кпв} = \max \{ \mu_{кпв} \} = \max \{ 0,25; 0,3; 0; 0; 0,4; 0 \} = 0,4;$
- 7)  $\mu_{кдн} = \max \{ \mu_{кдн} \} = \max \{ 0,3; 0,3; 0; 0; 0,6; 0,4; 0,25; 0 \} = 0,4;$
- 8)  $\mu_{кдв} = \max \{ \mu_{кдв} \} = \max \{ 0,25; 0 \} = 0,25.$

Таким образом степени принадлежности термов выходных переменных имеют значения, представленные на рисунке 3.6:

- 1)  $\{ \mu_{кисм}, \mu_{ким}, \mu_{кин}, \mu_{кив}, \mu_{кисв} \} = \{ 0; 0; 0,25; 0,6; 0 \};$
- 2)  $\{ \mu_{кпсм}, \mu_{кпм}, \mu_{кпн}, \mu_{кпв}, \mu_{кпсв} \} = \{ 0; 0,6; 0,25; 0,4; 0 \};$
- 3)  $\{ \mu_{кдсм}, \mu_{кдм}, \mu_{кдн}, \mu_{кдв}, \mu_{кдсв} \} = \{ 0; 0,25; 0,6; 0,25; 0,25 \}.$

Для дефазификации поправочных коэффициентов  $S_{и}S_{п}S_{д}$  воспользуемся методом центра масс:

$$S_{и} = \frac{K_{исм} \times \mu_{кисм} + K_{им} \times \mu_{ким} + K_{ин} \times \mu_{кин} + K_{ив} \times \mu_{кив} + K_{исв} \times \mu_{кисв}}{\mu_{кисм} + \mu_{ким} + \mu_{кин} + \mu_{кив} + \mu_{кисв}}, \quad (3.3)$$

$$S_{п} = \frac{K_{псм} \times \mu_{кпсм} + K_{пм} \times \mu_{кпм} + K_{пн} \times \mu_{кпн} + K_{пв} \times \mu_{кпв} + K_{псв} \times \mu_{кпсв}}{\mu_{кпсм} + \mu_{кпм} + \mu_{кпн} + \mu_{кпв} + \mu_{кпсв}}, \quad (3.4)$$

$$S_{д} = \frac{K_{дсм} \times \mu_{кдсм} + K_{дм} \times \mu_{кдм} + K_{дн} \times \mu_{кдн} + K_{дв} \times \mu_{кдв} + K_{дсв} \times \mu_{кдсв}}{\mu_{кдсм} + \mu_{кдм} + \mu_{кдн} + \mu_{кдв} + \mu_{кдсв}}, \quad (3.5)$$

$$S_{и} = \frac{0 \times (-1) + 0 \times 0,5 + 0,25 \times 0 + 0,6 \times 0,5 + 0 \times 1}{0 + 0 + 0,25 + 0,6 + 0} = 0,3529,$$

$$S_{II} = \frac{0 \times (-1) + 0,6 \times (-0,5) + 0,25 \times 0 + 0,4 \times 0,5 + 0 \times 1}{0 + 0,6 + 0,25 + 0,4 + 0} = 0,08,$$

$$S_{D} = \frac{0 \times (-1) + 0,25 \times (-0,5) + 0,6 \times 0 + 0,25 \times 0,5 + 0,25 \times 1}{0 + 0,25 + 0,6 + 0,25 + 0,25} = 1,1852.$$

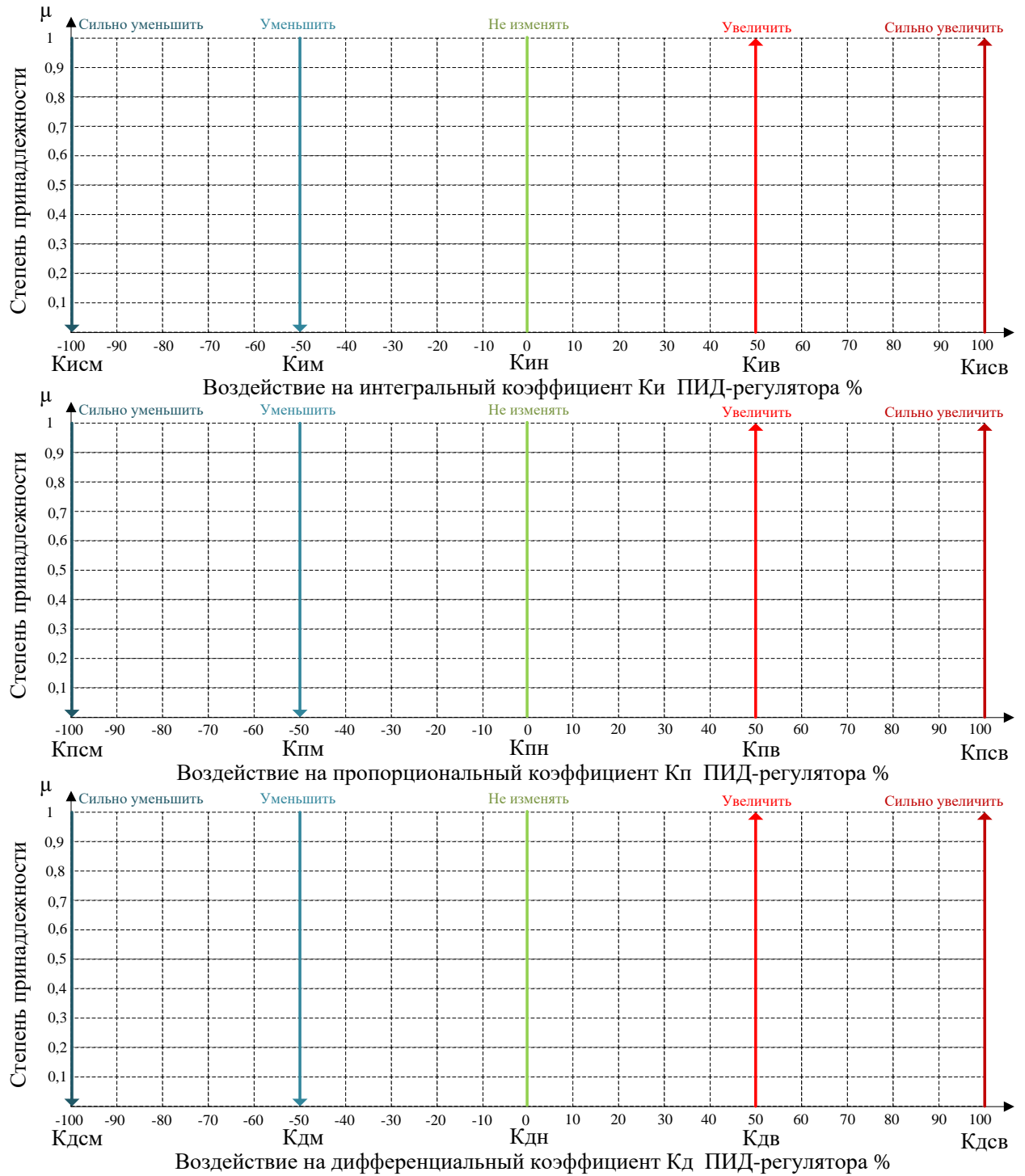


Рисунок 3.11 – Лингвистические переменные воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора

Далее используя значения поправочных коэффициентов  $S_i$ ,  $S_n$ ,  $S_d$ , определим величину изменения коэффициентов ПИД-регулятора в процентах:

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

$$\Delta K_n = S_n \times K_n \times 100\% = -8\% \times K_n;$$

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

Таким образом, чтобы достичь требуемое качество переходного процесса  $y(t)$  необходимо, на 8 % уменьшить пропорциональный коэффициент усиления  $K_n$ , на 35 % увеличить значение интегрального коэффициента  $K_i$  и на 18,5 % дифференциального  $K_d$ .

Произведем апробацию работы гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов на реальном объекте. Основным критерием, предъявляемым к данным АСР, является минимальное время достижения и поддержание заданной уставки давления на выходе УРГ при динамически изменяющемся входном давлении. Графики переходных процессов работы гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов представлены на рисунке 3.12.

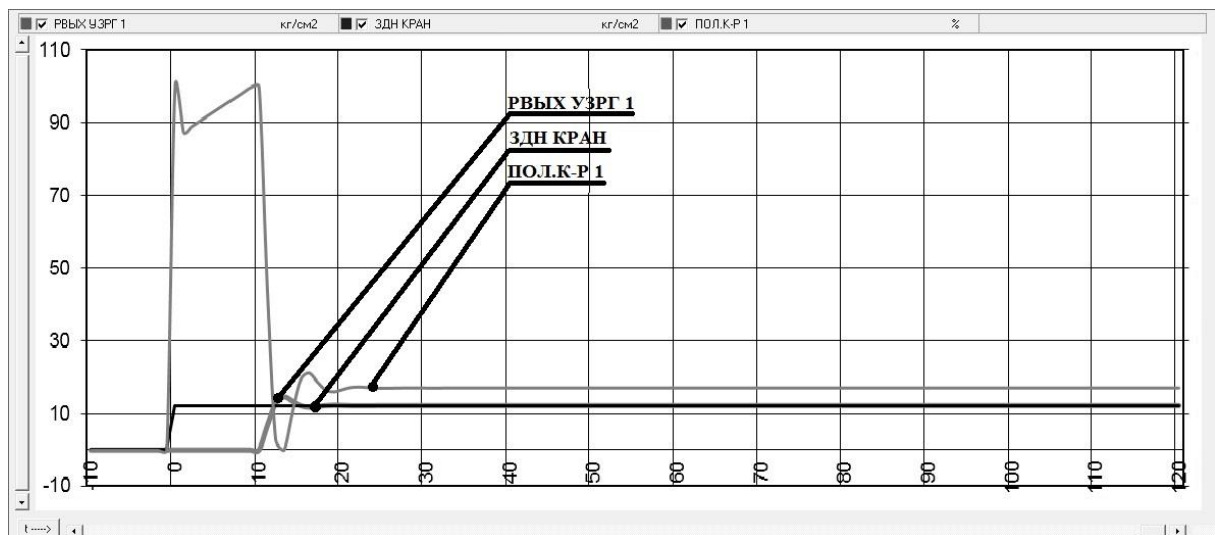


Рисунок 3.12 – Графики переходных процессов в системе с применением гибридного нечеткого ПИД-регулятора

На нем имеются следующие тренды:

РВХ УЗРГ1 – давление на входе узла редуцирования газа кг/см<sup>2</sup>;

ЗДН КРАН1 – уставка давления на выходе узла редуцирования газа кг/см<sup>2</sup>;  
РВЫХ УЗРГ1 – измеренное давление на выходе узла редуцирования газа кг/см<sup>2</sup>.

Из анализа графиков можно сделать вывод о том, что гибридный нечеткий ПИД-регулятор (с автоподстройкой коэффициентов) при подаче задающего воздействия (уставки) оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качества регулирования в отличии от ПИД-регулятора, использующего классический закон регулирования. Подстройка коэффициентов при помощи аппарата нечеткой логики снижает перерегулирование, позволяет сократить время переходного процесса, устранить автоколебания, а также повысить робастность регулятора.

### **3.5 Имитационная апробация различных типов регуляторов**

Для сравнительного анализа, произведена имитационная реализация работы рассмотренных логических регуляторов при изменении входного давления на 50 кг/см<sup>2</sup> при заданной уставке 12 кг/см<sup>2</sup>. Основным критерием, предъявляемым к данным АСР, является минимальное время достижения и поддержание заданной уставки давления на выходе УРГ. Графики переходных процессов изображены на рисунке 3.8.

Сравнительный анализ переходных процессов работы регуляторов (рисунки 3.4, 3.5, 3.6, 3.9, 3.12) при изменении входного давления представлен в таблице 3.3.

Анализируя представленные графики можно сделать вывод о том, что при подаче задающего воздействия (уставки) адаптивный ПИД-регулятор с табличной автонастройкой оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качество регулирования. Однако он имеет существенный недостаток – ограниченное количество режимных коэффициентов, что делает не корректным его работу во всех диапазонах регулируемого давления газа. Та-

ким образом, наиболее оптимальным является использование гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов.

Таблица 3.3 – Сравнительный анализ работы регуляторов

|   | ПИД-регулятор         | Нечеткий регулятор | ПИД-регулятор с табличной автонастройкой | Нечеткий ПИД-регулятор | Гибридный нечеткий ПИД-регулятор |
|---|-----------------------|--------------------|--|------------------------|----------------------------------|
| Количество циклов «открытие – закрытие» | 16,83                 | 2,58               | 1,2                                      | 1,66                   | 1,53                             |
| Время достижения заданной уставки, с    | уставка не достигнута | 348                | 20                                       | 114                    | 27                               |
| Перерегулирование, %                    | 38,8                  | 30,3               | 9,33                                     | 20,12                  | 13,8                             |

Подстройка коэффициентов при помощи аппарата нечеткой логики снижает перерегулирование, позволяет сократить время переходного процесса, устранить автоколебания, а также повышает робастность регулятора во всех диапазонах регулируемой величины.

### **3.6 Метод определения параметров гибридного нечеткого управления редуцированием газа**

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 3.13).

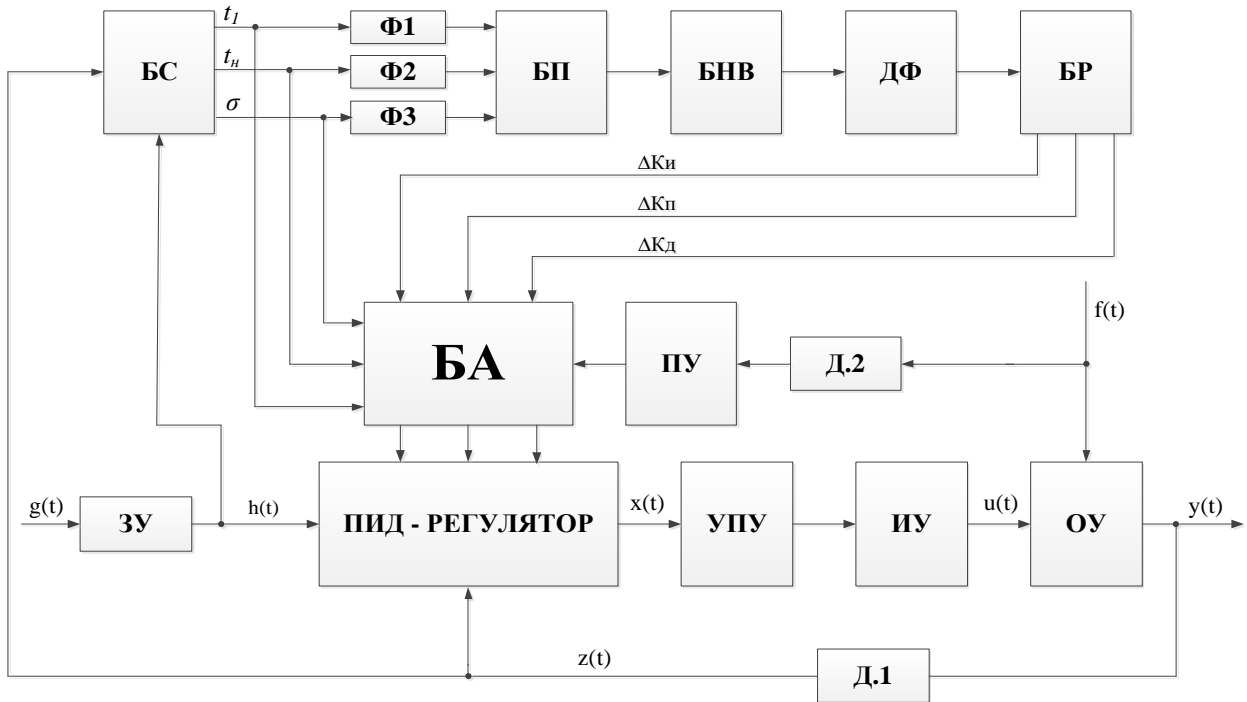


Рисунок 3.13 – Функциональная схема нечеткого гибридного ПИД-регулятора

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  $t_l$ ,  $t_n$ ,  $\sigma$  заданным  $t_l^*$ ,  $t_n^*$ ,  $\sigma^*$ , 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 нечёткого 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.

Алгоритм гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов представлен на рисунке 3.14. Процесс ПИД-регулирования на нечеткой логике начинается с того, что система находится в режиме ожидания (ввода данных):

- а) ввода уставки;
- б) нажатия кнопки «Подстройка коэффициентов», состоящая из двух этапов.

После приема одной из команд система переходит из режима ожидания на этап обработки соответствующей команды. После этапа обработки команды система опять переходит в начальную точку в режим ожидания.

Рассмотрим этап обработки ввода уставки. После ввода уставки запускается процесс классического ПИД-регулирования. Значения коэффициентов ПИД-регулятора берутся из памяти микроконтроллера, которые были сохранены последними. ПИД-регулирование продолжается до тех пор, пока процесс не станет устойчивым. То есть изменение выходного значения на протяжении определенного промежутка времени ниже порогового значения [35]. Для оптимизации расчета выходного сигнала регулятора  $U(n)$  используется рекуррентная формула:

$$U(n) = U(n-1) + K_p(E(n) - E(n-1)) + K_i^{discr} E(n) + K_d^{discr} (E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)) \quad (3.6)$$

Если процесс с течением времени не соответствует предъявляемым требованиям, оператор (диспетчер) подает команду на выполнение процедуры подстройки коэффициентов с применением аппарата нечеткой логики. Процесс автоподстройки коэффициентов нечеткого ПИД-регулятора осуществляется согласно разработанной базы правил с применением аппарата нечеткого вывода Мамдани (Mamdani).

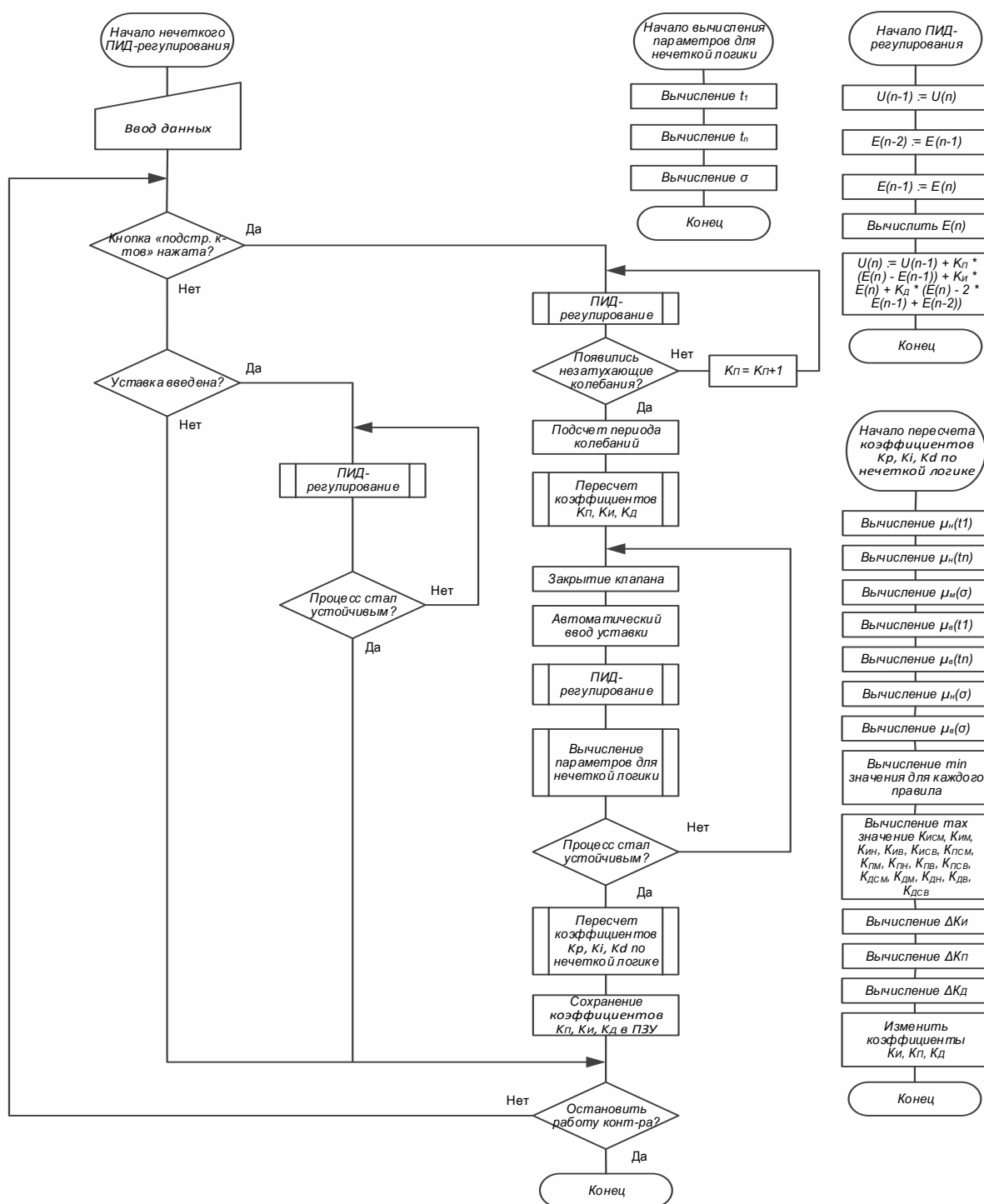


Рисунок 3.14 – Алгоритм управления гибридным нечетким ПИД-регулятором

## Выводы по третьей главе

1. Применение нечеткого логического регулятора позволяет более качественно управлять процессом редуцирования газа, в отличие от традиционного ПИД-регулирования. При этом, для улучшения качества процесса редуцирования, необходимо использовать комбинированный подход к построению регуляторов, что позволяет объединять достоинства и устранять некоторые недостатки отдельных типов регуляторов

2. Такой вид адаптации, как табличное управление ПИД-регулятором, целесообразно применять в тех случаях, когда типы и величина дестабилизирующих факторов известны заранее. Этот метод позволяет добиться требуемого качества процесса регулирования, а также установить взаимосвязь между параметрами объекта, выбирая значения коэффициентов в зависимости от конкретной ситуации. Однако он обладает существенным недостатком, который обуславливается ограниченным диапазоном величин дестабилизирующих факторов, влияющих на процесс регулирования.

3. Применение нечеткого ПИД-регулятора дает достаточный запас устойчивости к переменному давлению входа, однако время достижения уставки значительно выше, чем у нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов. Он позволяет достичь требуемое качество переходного процесса и расширить функциональные возможности системы.

4. Гибридный нечеткий ПИД-регулятор с автоподстройкой коэффициентов при подаче задающего воздействия (уставки) оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качество. Подстройка коэффициентов при помощи аппарата нечеткой логики снижает перерегулирование, позволяет сократить время переходного процесса, устранить автоколебания, а также повышает робастность ПИД-регулятора. Реализация разработанных алгоритмов позволяет не только добиться требуемого качества управления, но и значительно сократить затраты на текущий и капитальный ремонт движущихся деталей механической части клапана.

5. Разработанный метод определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления позволяет оценить влияние различных технологических параметров на поддержание заданного выходного давления, а также минимизировать негативные воздействия на процесс редуцирования.

## **4 Аппаратная и программная реализация нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов**

В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований, выполненные совместно с научным руководителем, доктором технических наук В.В. Туговым [35; 40]. Личное участие соискателя заключается в настройке регулирующего клапана по разработанным алгоритму, принципиальной схеме устройства и программного обеспечения для управления нечетким ПИД-регулятором с автоподстройкой коэффициентов. Доля личного вклада автора составляет 88 %.

### **4.1 Разработка и расчет принципиальной схемы программируемого логического контроллера на базе AVR ATMEGA32**

При проектировании схемы гибридного нечеткого ПИД-регулятора использовались компоненты, которые позволяют выполнить конструкцию устройства с низкой себестоимостью, не теряя качества регулирования. Основу узла управления гибридным нечетким ПИД-регулятором представляет микроконтроллер AVR ATMEGA32. Микроконтроллер принимает аналоговый сигнал с датчика выходного давления и задает процент открытия клапана-регулятора. Запуск процесса автонастройки коэффициентов нечеткого ПИД-регулятора и задание уставки давления выхода осуществляется при помощи интерфейса RS-485 по протоколу Modbus RTU.

Для организации питания микроконтроллера ATMEGA32 и конвертирующего модуля MAX 485 необходим источник постоянного напряжения 5 В. Данный источник выполнен на базе стабилизатора напряжения L7805. Конденсаторы  $C_1$ - $C_2$  необходимы для препятствия вхождению стабилизатора в самовозбуждение. Диод VD1 служит для защиты пробоя стабилизатора при исчезновении входного напряжения.

Рассмотрим схему, осуществляющую преобразование сигнала с датчика выходного давления и подачи его в микроконтроллер ATMEGA32. Датчик давления имеет выходной сигнал токовая петля (4-20 мА). Для приема аналогового сигнала в микроконтроллере используется АЦП с входным сигналом напряжения (0-5 В). Таким образом, произведено преобразование токового сигнала в напряжение. Для уменьшения погрешности измерения производится преобразование входного сигнала на все доступные значения АЦП (0 В – опорное значение АЦП). Опорное значение АЦП (2,5 В) формируется источником опорного напряжения и подается на вход AREF микроконтроллера. Резистор  $R_1$  служит для преобразования токового сигнала 4-20 мА в вольтовый 40-200 мВ. Далее полученный сигнал подается на усилитель, выполненный на операционном усилителе OP1 и резисторов  $R_5R_6$ . Коэффициент усиления вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} U_{out} &= K \cdot U_{in}, \\ K &= 1 + R_6/R_5. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для прецизионной настройки производится регулировка подстроечного резистора  $R_5$ , таким образом, чтобы при входном сигнале 4 мА выходной сигнал составлял 625 мВ. Расчетное значение резистора  $R_5$  согласно формуле (1.2) составляет 640 Ом. Таким образом, данный усилитель преобразует входной сигнал 40-200 мВ в выходной 625 мВ - 3,125 В.

Затем производим вычитание из 625 мВ, для того чтобы преобразовать полученный сигнал к существующим значениям АЦП (0-2,5 В). Для решения данной задачи используем вычитающую схему на элементах OP2 и резисторах  $R_3-R_8$ . Зависимость входного и выходного напряжения вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} U_{out} &= U_{in2} \cdot K_2 - U_{in1} \cdot K_1, \\ K_2 &= ((R_4 + R_3) \cdot R_8) / (R_8 + R_7) \cdot R_3, \\ K_1 &= R_4/R_3. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Для подачи вычитающего напряжения необходимо выполнить подстройку резистора  $R_2$ , таким образом, чтобы на вход схемы подавалось 625 мВ.

Для выдачи управляющего сигнала на электропневмопреобразователь клапана регулятора необходимо использовать аналоговый выход. В связи с тем, что у

микроконтроллера ATMEGA32 отсутствует ЦАП, данная возможность реализуется по схеме R2-R.

Его суть заключается в том, что каждый вход имеет свой вес в вольтах, далее они подвергаются суммированию для образования выходного напряжения 0-5 В. При этом происходит достаточно быстрая скорость работы, ограниченная паразитными емкостями между элементами.

На резистивной матрице происходит последовательное деление опорного напряжения. Резистивная цепь подключается на землю через резистор в нижней точке, он номинален в горизонтальных ветвях, а также используется конденсатор  $C_{13}$  для фильтрации помех. При этом старший разряд располагается вверху, самый младший внизу, ближе к земле. Таким образом, на выходе ЦАП формируется аналоговый сигнал 1-5 В.

Преобразование аналогового сигнала 1-5 В в сигнал токовой петли 4-20 мА выполняет фрагмент схемы, собранный на двух операционных усилителях ОП3, ОП4, и резисторах  $R_{27}-R_{31}$ . В данном узле специальный измерительный резистор  $R_{29}$  используется для замера падения напряжения, которое подается на операционный усилитель ОП4. Так как конструкция из ОП3 представляет для ОП4 обратную связь, то он стремится свести разность потенциалов на своих входах к нулевому значению. Таким образом вычисления производятся по следующим формулам:

$$U_{in} = R_{27}/R_{28} \cdot I_{29} \cdot R_{29}, \quad (4.3)$$

при  $R_{27} = 7,5$  кОм,  $R_{28} = 300$  Ом,  $R_{29} = 10$  Ом.

Получаем зависимость  $I_{29} = U_{in}/250$  с хорошей линейностью.

В связи с тем, что в функционале большинства контроллеров применяются интерфейсы RS232/RS422/RS485, для согласования с интерфейсом UART микроконтроллером ATMEGA32, используется микросхема MAX485.

Для обеспечения бесперебойной работы при отрицательных температурах - тактирование микроконтроллера ATMEGA32 осуществляется от внешнего кварцевого резонатора. Конденсаторы  $C_3, C_8, C_{11}, C_{12}$  и индуктивность  $L_1$  используются



для фильтрации помех по питанию. Разработанная принципиальная схема ПЛК на базе микроконтроллера ATMEGA 32 представлена на рисунке 4.1

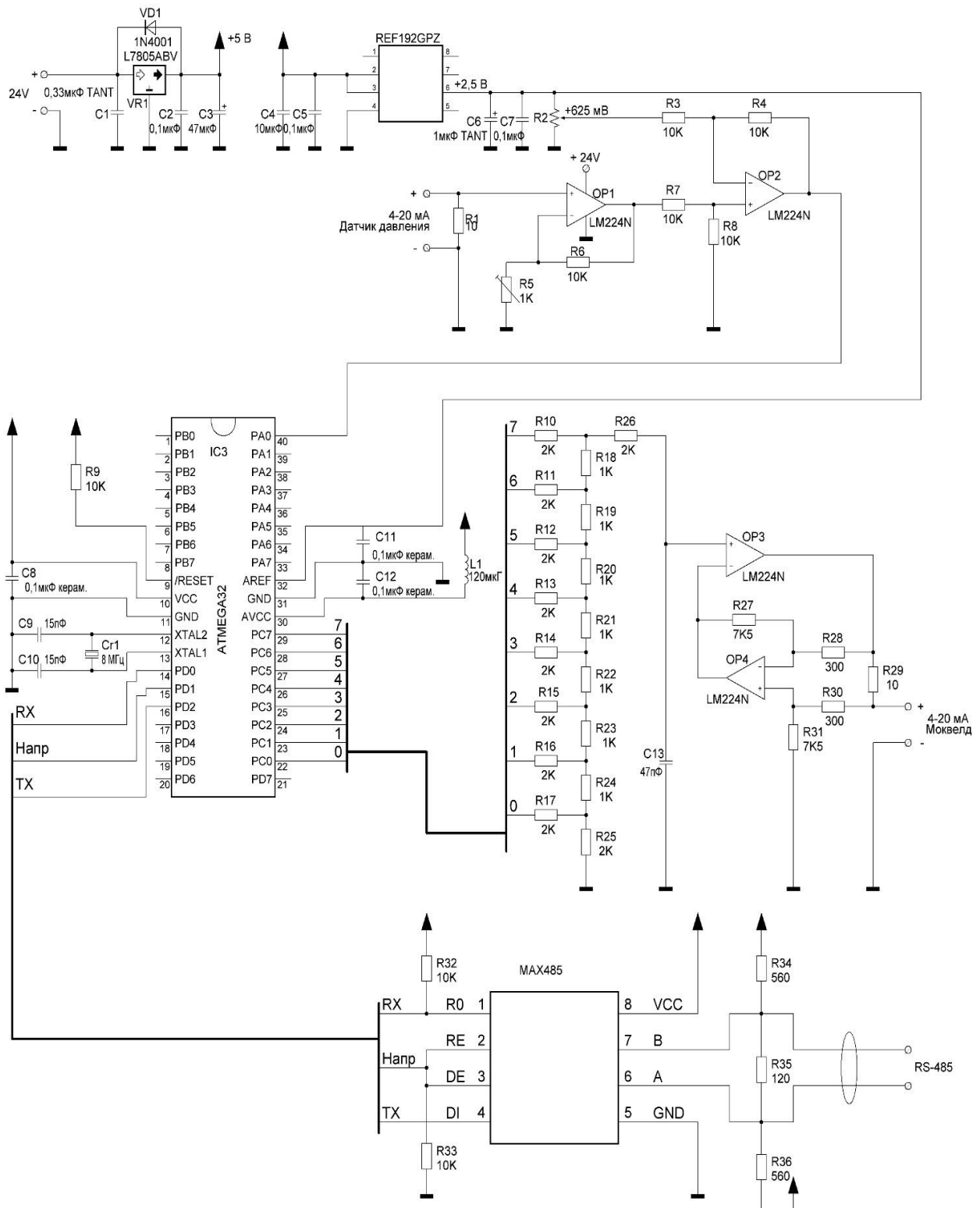


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема ПЛК на базе микроконтроллера AT-MEGA 32

Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 4.2.

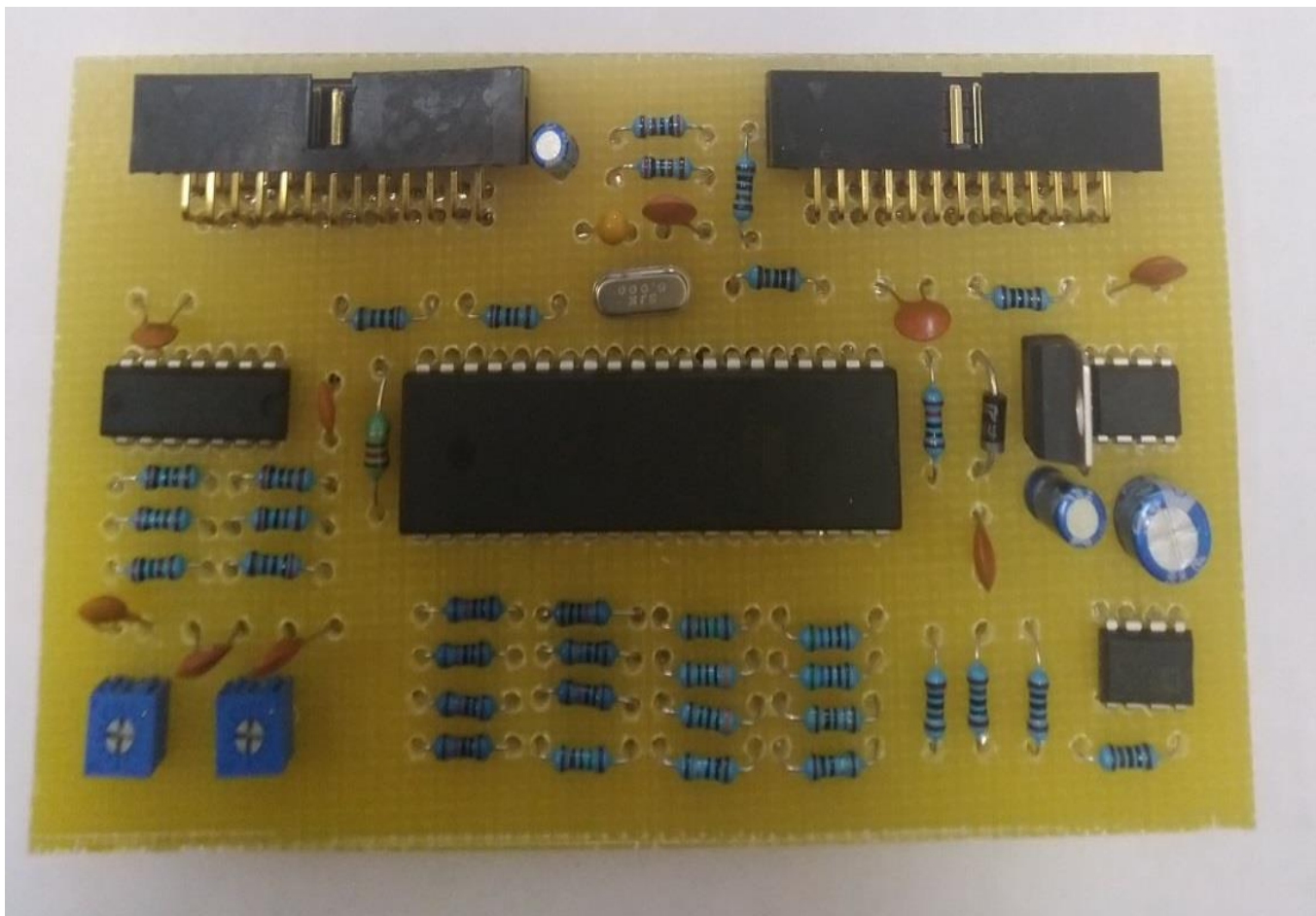


Рисунок 4.2 – Внешний вид разработанного устройства

Достоинством данного устройства является:

- установка в корзину штатный модулей, благодаря идентичным геометрическим размерам;
- возможность подключения средств автоматизации в штатные соединительные разъемы СЛТМ «Магистраль-21»;
- полная аппаратная совместимость общей шины;
- программная интеграция за счет использования идентичного протокола связи Modbus RTU;
- возможность использования как отдельного модуля в составе других комплексов и системах автоматизации.

## 4.2 Интеграция гибридного нечеткого ПИД-регулятора в систему линейной телемеханики «Магистраль-21»

Комплекс мероприятий для реализации нечеткого ПИД-регулятора сводится к конфигурации устройства в SCADA-модуль Zond 2006 на полевом и верхнем уровне (КП СЛТМ Магистраль 21; ДП ЛПУМГ).

В программном обеспечении «Zond Data Base Configuration» в редакторе структуры базы данных создается входной порт «УСО ModBus\_m». В свойствах внутреннего порта производится конфигурация блока ПИД-регулятора на нечеткой логике, указывается диапазон системных номеров тегов параметров. Во внутреннем порту ModBus master задается ModBus адрес спроектированного устройства в системе счисления HEX, тип контроллера, область данных и т.д. (рисунок 4.3).

| ## | Линия | Контроллер | Имя контроллера | mba(hex) | Тип контр | Формат | Coils (на) | Discr(-) | Input(-) | Holding(-) | Упр.(раз) | Начало | Размер # | ММВ | Оп |
|----|-------|------------|-----------------|----------|-----------|--------|------------|----------|----------|------------|-----------|--------|----------|-----|----|
| 1  | 2     | 1          | МП-1 ПИД НЛ     | 1        | ЗОНД      | WORD   |            | 0,4      |          | 0,4        |           | 160    | 2        | НЕТ | ДА |
| 2  | 2     | 2          | МП-2 ПИД НЛ     | 2        | ЗОНД      | WORD   |            | 0,4      |          | 0,4        |           | 163    | 2        | НЕТ | ДА |
| 3  | 2     | 3          | МП-3 ПИД НЛ     | 3        | ЗОНД      | WORD   |            | 0,4      |          | 0,4        |           | 166    | 2        | НЕТ | ДА |
| 4  | 2     | 4          | МП-4 ПИД НЛ     | 4        | ЗОНД      | WORD   |            | 0,4      |          | 0,4        |           | 169    | 2        | НЕТ | ДА |

Рисунок 4.3 – Конфигурация входного порта УСО ModBus\_m

Далее указываются параметры входного порта контроллера:

– Baud rate – 9,6 kbps;

- Parity – No Parity;
- Data bits – 8 bits per character;
- Stop bits – 1;
- ModBus address – 1.

В редакторе структуры базы данных создаются теги параметров нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов согласно разработанному программному обеспечению и осуществляется их подключение (рисунок 4.4).

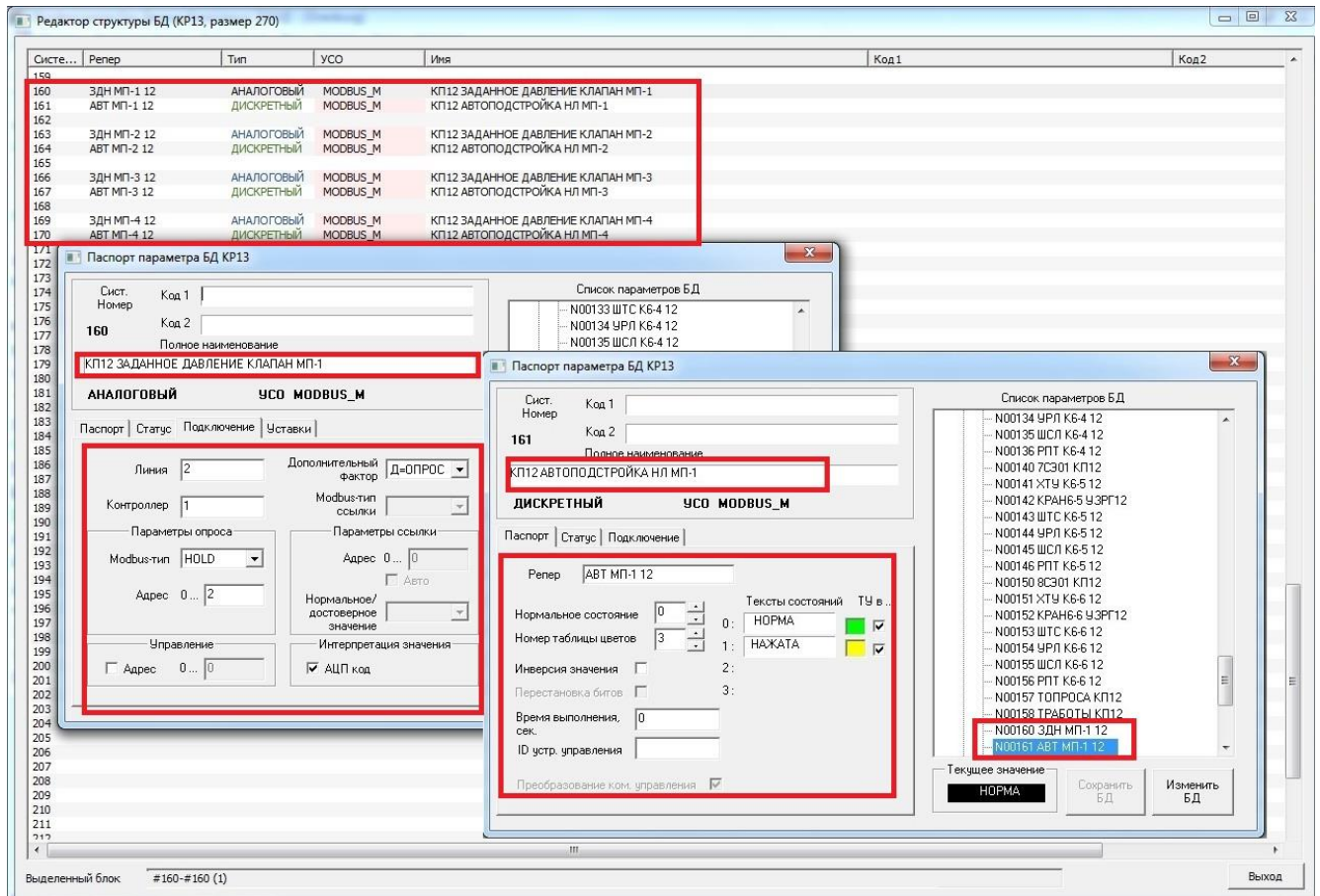


Рисунок 4.4 – Конфигурирование тегов параметров в структуры БД

Производим визуализацию фрагмента мнемосхемы КП №13 на АРМ СЛТМ в программе Viza 2007 и привязку тегов к мнемосхеме. В итоге получаем завершённое программное обеспечение на уровне КП СЛТМ и АРМ ДП ЛПУМГ (рисунок 4.5).

Автоподстройка коэффициентов гибридного нечеткого ПИД-регулятора осуществляется путем нажатия кнопки «ПОДСТР».

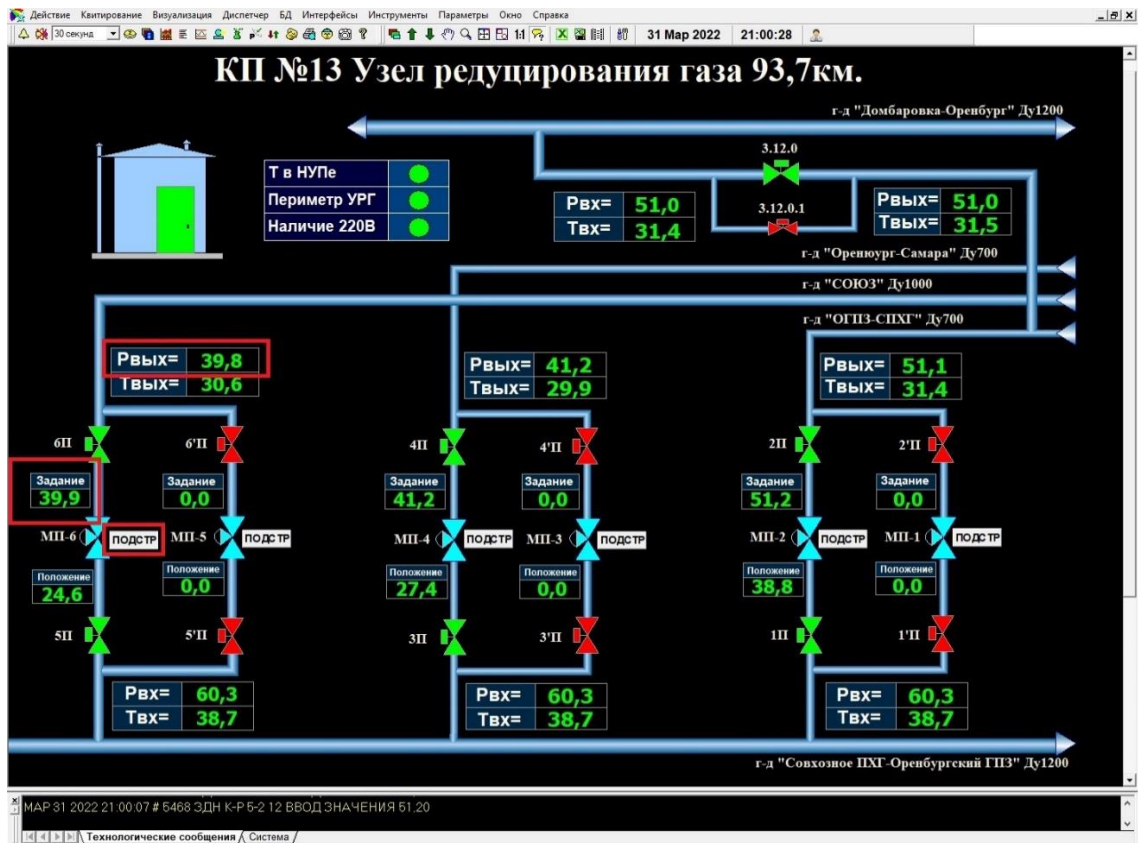


Рисунок 4.5 – Мнемосхема узла редуцирования газа

### 4.3 Апробирование результатов на узле редуцирования газа

Экспериментальное исследование на УРГ производилось с использованием следующих средств автоматизации:

- регулирующий клапан Mokveld тип RZD-REQX 28’’ CLASS 600 с пневматическим приводом M620-3VS-7;
- датчик избыточного давления ТЖИУ-406, диапазон измеряемой величины 0-100 кг/см<sup>2</sup>, выходной сигнал 4-20 мА;
- модуль ПИД-регулятора Mokveld;
- разработанный ПЛК на базе микроконтроллера ATMEGA 32 с программным обеспечением нечеткого ПИД-регулирования с автоподстройкой коэффициентов.

Для наглядного представления, произведем сравнение работы классического ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициен-

тов на УРГ. Основным критерием, предъявляемым к данным САР, является минимальное время достижения заданной уставки, а также минимальное значение перерегулирования при изменяющемся входном давлении.

Параметры встроенного классического ПИД-регулятора Mokveld при постоянном входном давлении  $30 \text{ кг/см}^2$  определили, применяя метод Зиглера-Никольса, за счет установки интегрального ( $K_I$ ) и дифференциального ( $K_D$ ) коэффициентов на нулевые значения, коэффициент  $K_P$  имеет значение равное 1. Далее производили исследование процесса. Если не возникало незатухающих колебаний, то значение  $K_P$ , увеличивалось на 1. В результате цикла увеличения  $K_P$ , до значения  $K_U = 35$ , выходной сигнал контура управления имел незатухающие колебания, при периоде колебаний  $T_U = 6$  сек. Используя данные параметры, произведено вычисление следующих коэффициентов  $K_P = 21$ ;  $K_I = 4,2$ ;  $K_D = 9,45$ , согласно формулам, указанным в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Формулы нахождения коэффициентов регулятора методом Зиглера-Никольса

| Метод настройки    | $K_P$    | $K_I$           | $K_D$            |
|--------------------|----------|-----------------|------------------|
| Зиглера – Никольса | $0,6K_U$ | $1,2 K_U / T_U$ | $3 K_U T_U / 40$ |

На рисунке 4.6 представлены графики переходных процессов после настройки регулятора методом Зиглера – Никольса.

В процессе апробации данные настройки не дали необходимого качества процесса регулирования, поэтому произвели трудоемкую экспертную настройку с учетом эмпирических данных. Апробация работы САР давления производилась при следующих настройках коэффициентов классического ПИД-регулятора Mokveld:  $K_P = 13,54$ ;  $K_I = 0,2585$ ;  $K_D = 4,52$ . Графики переходных процессов после настройки регулятора, выполненные экспертным методом, изображены на рисунке 4.7.

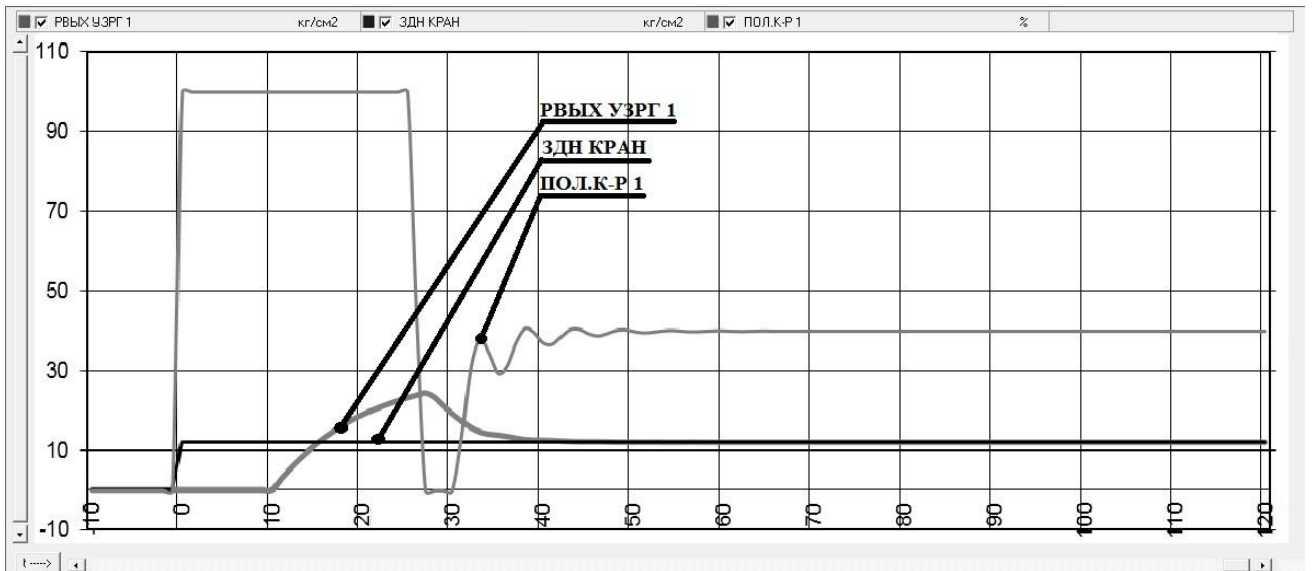


Рисунок 4.6 – Графики переходных процессов после настройки регулятора методом Зиглера – Никольса

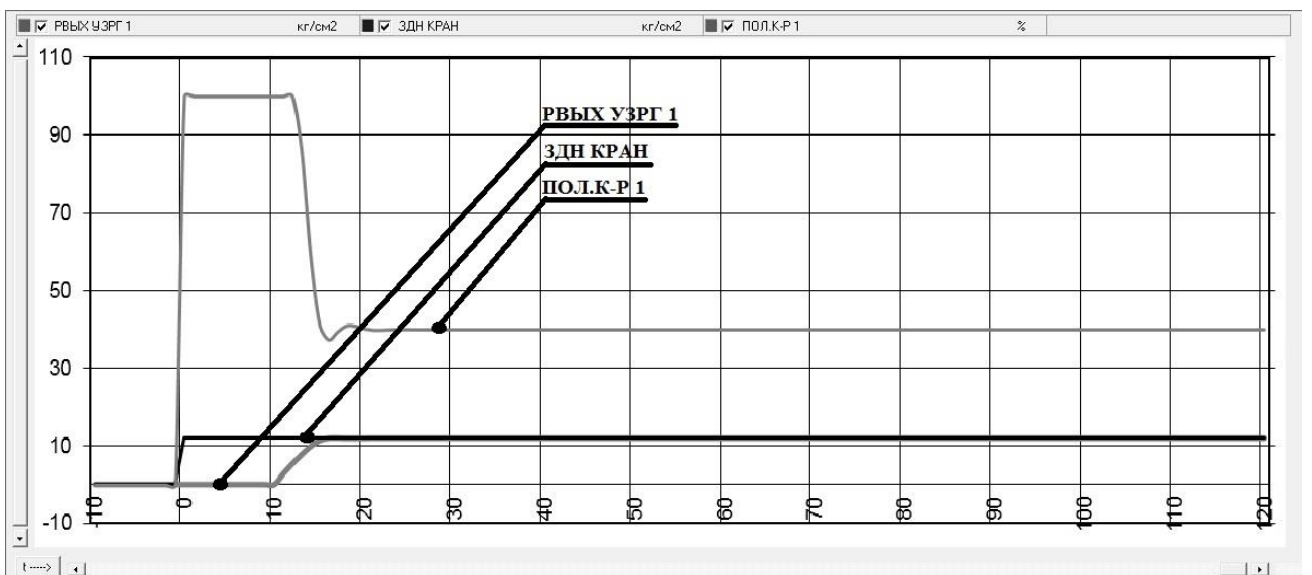


Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов после настройки регулятора, выполненные экспертным методом

При изменении входного давления узла редуцирования с  $30 \text{ кг/см}^2$  до  $70 \text{ кг/см}^2$  требуемое качество переходного процесса значительно ухудшилось и коэффициенты ПИД-регулятора требовали повторной настройки. Графики переходных процессов ПИД-регулятора Mokveld после изменения входного давления изображены на рисунке 4.8.

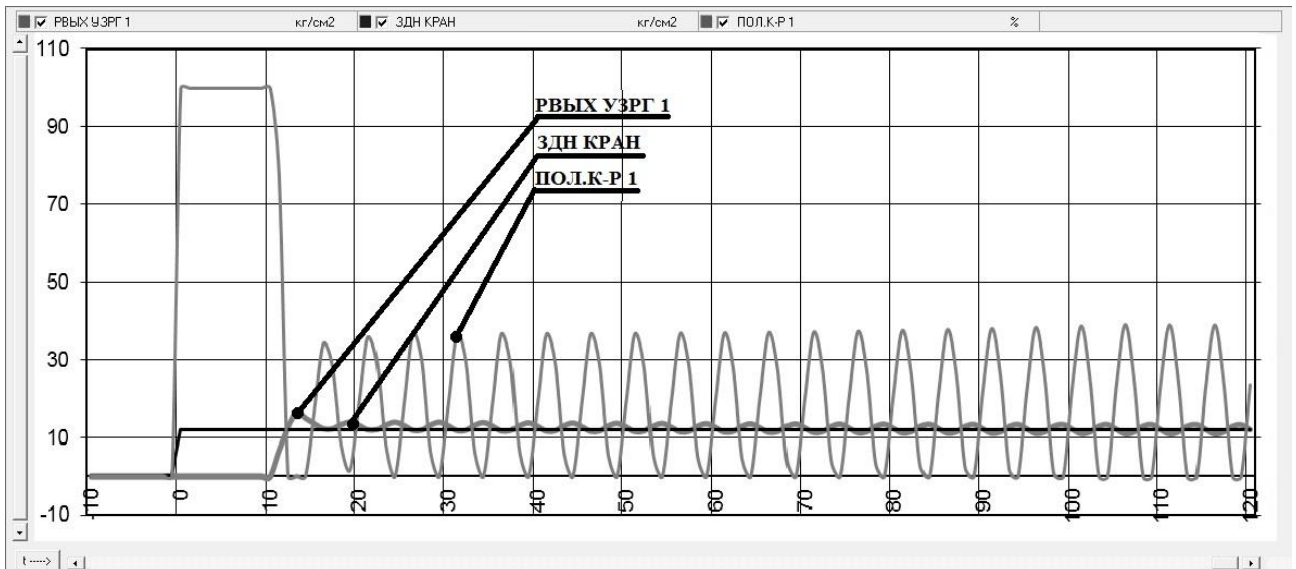


Рисунок 4.8 – Графики переходных процессов ПИД-регулятора после изменения входного давления

Аналогично произведем апробацию разработанного гибридного нечеткого ПИД-регулятора при постоянном входном давлении  $30 \text{ кг/см}^2$  (рисунок 4.9), а также после изменения входного давления до  $70 \text{ кг/см}^2$  (рисунок 4.10).

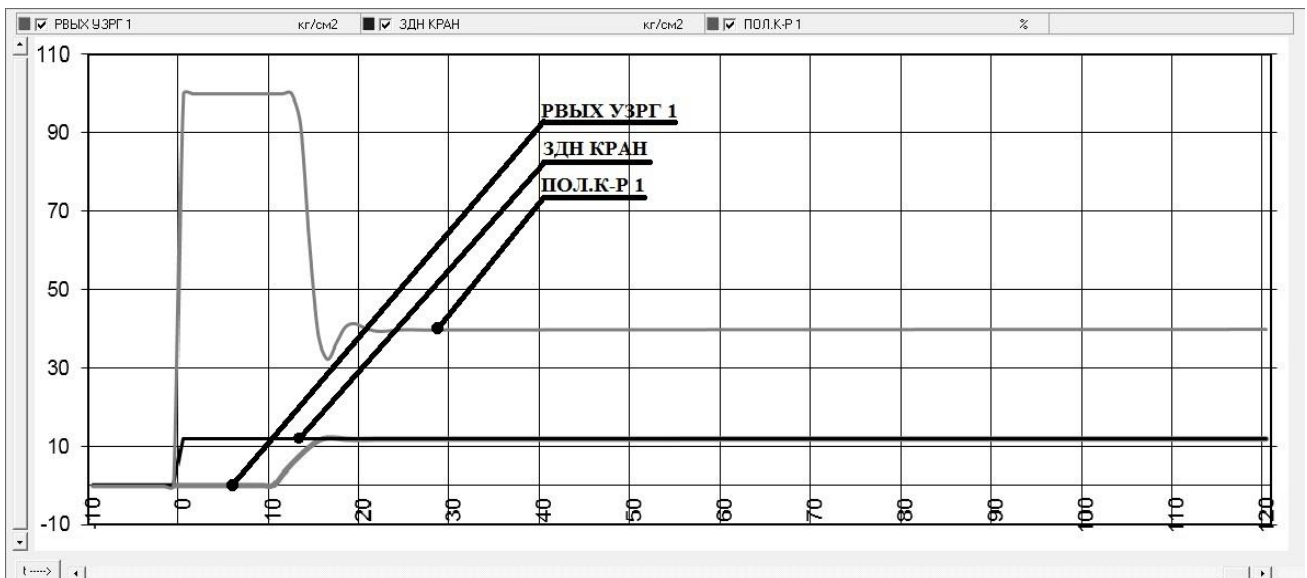


Рисунок 4.9 – Графики переходных процессов гибридного нечеткого ПИД-регулятора при постоянном входном давлении



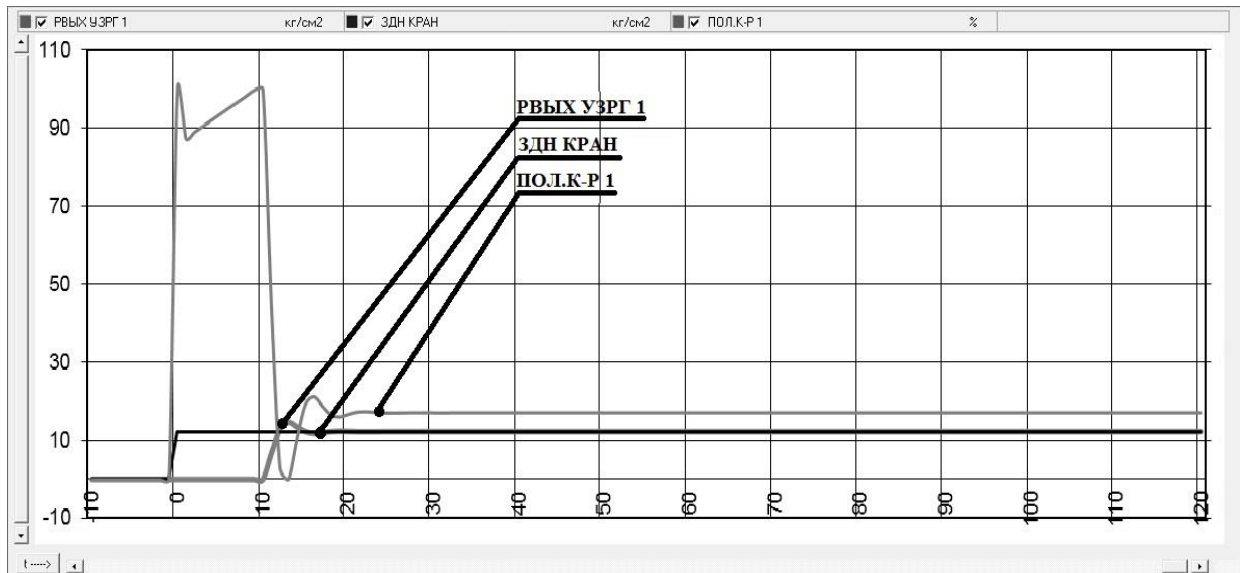


Рисунок 4.10 – Графики переходных процессов гибридного нечеткого ПИД-регулятора после изменения входного давления

Таблица изменения коэффициентов гибридного нечеткого ПИД-регулятора (рисунок 40) в процессе выполнения автоподстройки приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Изменения коэффициентов нечеткого ПИД-регулятора в процессе автоподстройки

| №п/п | $K_P$ | $K_I$  | $K_D$ |
|------|-------|--------|-------|
| 1    | 14,54 | 0,2519 | 3,05  |
| 2    | 8,93  | 0,1441 | 3,12  |
| 3    | 7,08  | 0,1318 | 1,86  |
| 4    | 7,02  | 0,1269 | 1,74  |
| 5    | 6,55  | 0,1292 | 1,75  |
| 6    | 6,63  | 0,1307 | 1,75  |
| 7    | 6,96  | 0,1262 | 1,73  |
| 8    | 6,57  | 0,1223 | 1,84  |

Из графиков переходных процессов видно, что гибридный нечеткий ПИД регулятор с автоподстройкой коэффициентов (рисунок 4.10) при подаче задающего воздействия (уставки) в отличии от ПИД-регулятора, использующего классический закон регулирования (рисунок 4.8), оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качество регулирования.

Также стоит отметить, что при изменении входного давления, суммарное время перемещения регулирующего органа эквивалентно:

- для классического ПИД-регулятора – 16,83 циклов «открытие–закрытие»;
- для гибридного нечеткого ПИД – регулятора с автоподстройкой коэффициентов – 1,53 цикла «открытие – закрытие».

Оценка устойчивости разработанного нечеткого ПИД-регулятора давления производилась путем экспериментальных исследований в ходе проведения ППР (планово-предупредительных работ) на объекте. Давление на вход регулятора подавалось из полости газопровода при помощи открытия входного кранового узла. Падение давления и расход газа обеспечивался путем стравливания газа «на свечу». Графики переходных процессов нечеткого ПИД-регулятора представлены на рисунке 4.11.

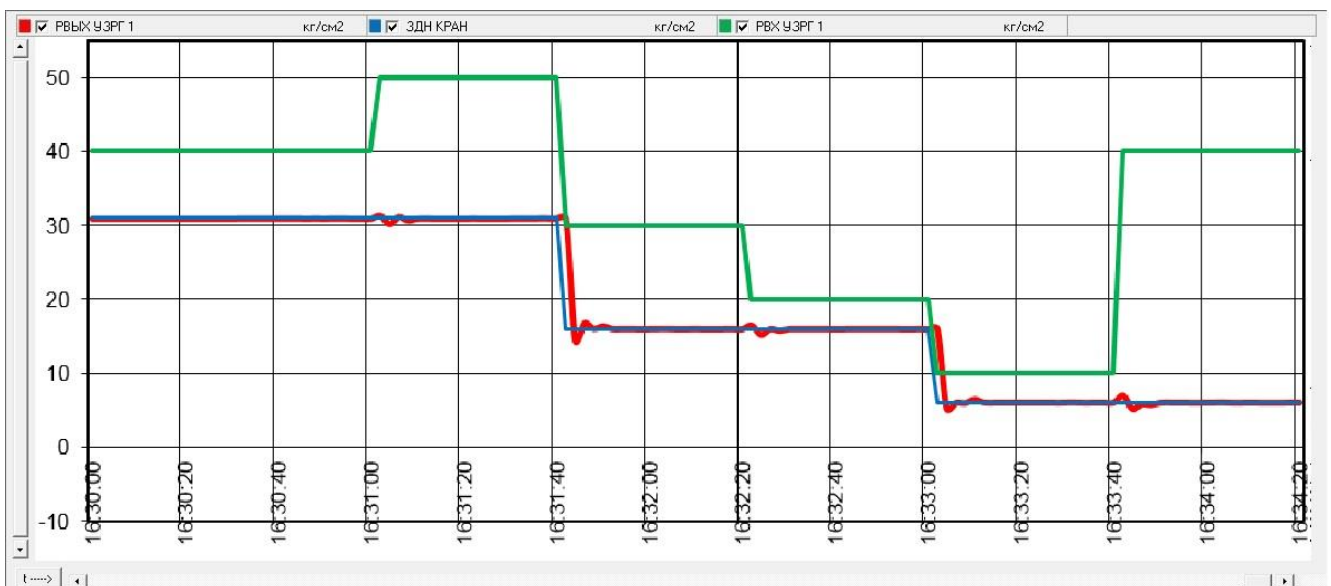


Рисунок 4.11 – Графики переходных процессов нечеткого ПИД-регулятора после изменения входного давления

Выгрузка архивов поведения системы из ПО Zond 2015 представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Изменения величин нечеткого ПИД-регулятора в процессе автоподстройки

| Time, t (время) | ЗДН КРАН<br>кг/см <sup>2</sup> (уставка) | РВХ УРГ 1 кг/см <sup>2</sup><br>(входное давление) | РВЫХ УРГ 1 кг/см <sup>2</sup> (выход-<br>ное давление) |
|-----------------|--|--|--|
| 1               | 2  | 3  | 4  |
| 16:31:00        | 31                                       | 40,00  | 30,99  |
| 16:31:02        | 31                                       | 50,00  | 31,41  |
| 16:31:04        | 31                                       | 50,00  | 30,22  |
| 16:31:06        | 31                                       | 50,00  | 31,25  |
| 16:31:08        | 31                                       | 50,00  | 30,73  |
| 16:31:10        | 31                                       | 50,00  | 30,99  |
| 16:31:12        | 31                                       | 50,00  | 31,01  |
| 16:31:14        | 31                                       | 50,00  | 30,99  |
| 16:31:42        | 16                                       | 30,00  | 31,01  |
| 16:31:44        | 16                                       | 30,00  | 14,50  |
| 16:31:46        | 16                                       | 30,00  | 16,79  |
| 16:31:48        | 16                                       | 30,00  | 16,04  |
| 16:31:50        | 16                                       | 30,00  | 16,39  |
| 16:31:52        | 16                                       | 30,00  | 16,01  |
| 16:31:54        | 16                                       | 30,00  | 16,01  |
| 16:31:56        | 16                                       | 30,00  | 16,02  |
| 16:31:58        | 16                                       | 30,00  | 15,98  |
| 16:32:00        | 16                                       | 30,00  | 15,99  |
| 16:32:02        | 16                                       | 30,00  | 16,01  |
| 16:32:22        | 16                                       | 20,00  | 16,50  |
| 16:32:24        | 16                                       | 20,00  | 15,23  |
| 16:32:26        | 16                                       | 20,00  | 15,99  |
| 16:32:28        | 16                                       | 20,00  | 15,76  |

Продолжение таблицы 4.3

| 1        | 2  | 3     | 4     |
|----------|----|-------|-------|
| 16:32:30 | 16 | 20,00 | 16,00 |
| 16:32:32 | 16 | 20,00 | 16,00 |
| 16:32:34 | 16 | 20,00 | 16,00 |
| 16:32:36 | 16 | 20,00 | 16,01 |
| 16:32:38 | 16 | 20,00 | 16,01 |
| 16:32:40 | 16 | 20,00 | 15,99 |
| 16:32:42 | 16 | 20,00 | 16,00 |
| 16:32:44 | 16 | 20,00 | 16,01 |
| 16:32:46 | 16 | 20,00 | 16,01 |
| 16:32:48 | 16 | 20,00 | 16,00 |
| 16:33:02 | 6  | 10,00 | 16,01 |
| 16:33:04 | 6  | 10,00 | 5,18  |
| 16:33:06 | 6  | 10,00 | 5,99  |
| 16:33:08 | 6  | 10,00 | 5,93  |
| 16:33:10 | 6  | 10,00 | 6,45  |
| 16:33:12 | 6  | 10,00 | 6,02  |
| 16:33:42 | 6  | 40,00 | 6,97  |
| 16:33:44 | 6  | 40,00 | 5,13  |
| 16:33:46 | 6  | 40,00 | 5,82  |
| 16:33:48 | 6  | 40,00 | 5,72  |
| 16:33:50 | 6  | 40,00 | 5,98  |
| 16:33:52 | 6  | 40,00 | 6,01  |

Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что регулятор способен сохранять стабильность и точность своей работы при изменении параметров входного сигнала, а также внешних возмущающих воздействий.

## Выводы по четвертой главе

1. Разработанная принципиальная схема гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов использует компоненты, позволяющие выполнить конструкцию устройства с низкой себестоимостью при высоком качестве регулирования. Устройство позволяет принимать аналоговый сигнал 4-20 мА с датчика выходного давления и задает процент открытия клапана-регулятора путем подачи управляющего сигнала на исполнительный механизм. В качестве интерфейса связи с Master устройством выступает широко распространенный промышленный интерфейс RS-485, что позволяет интегрировать данное устройство в широкий спектр систем автоматике и телемеханики.

2. Реализован комплекс мероприятий по интеграции разработанного устройства в SCADA-модуль Zond 2006 на полевом и верхнем уровнях АСУ ТП предприятия (КП СЛТМ Магистраль 21; ДП ЛПУМГ). Произведена программная привязка реперов параметров с использованием промышленного протокола ModBus RTU, а также визуализация фрагмента мнемосхемы путем добавления необходимых тегов.

3. Проведенные экспериментальные исследования доказали эффективность использования гибридного нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов позволяющего по сравнению с классическим ПИД-регулятором снизить перерегулирование на 24,5 %, достичь заданной уставки, а также уменьшить количество циклов «открытие-закрытие» клапана при выходе на режим 11 раз.

## Заключение

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

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 произведённого 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 произ-

водить расчет настроечных коэффициентов, что ведет к повышению эффективности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов

5. Разработанные 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антипин, А.Ф. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами на основе многомерных четких логических регуляторов: автореф. диссертации канд. техн. наук: 05.13.06 / А.Ф. Антипин. – Уфа. 2010 – 22 с.
2. Бахирев, И.В. Исследование варианта структуры нечеткого ПИД-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки / И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – №. 9. – С. 16-24.
3. Бернер, Л.И. Метрологическое обеспечение систем телемеханики газопроводов как основа надежности их функционирования / Л.И. Бернер, С.А. Лавров, А.А. Полянский // Газовая промышленность. – 2019. – №. S2 (786). – С. 130-135.
4. Бернер, Л.И. Современные требования к системам линейной телемеханики магистральных газопроводов / Л.И. Бернер, В.В. Никаноров // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – №. 1. – С. 5-7.
5. Блюмин, С.Л. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения / С.Л. Блюмин и др. – Липецк: ЛЭГИ. – 2002. – 178 с.
6. Бобровский, С.А. Движение газа в газопроводах с путевым отбором / С.А. Бобровский и др. – М., 1972. – 142 с.
7. Бочков, А.В. Научно-методические основы мониторинга и прогнозирования состояния производственной безопасности ПАО «Газпром» / А.В. Бочков, Д.В. Пономаренко // Газовая промышленность. – 2017. – №. 3 (749). – С. 20-30.
8. Будзуляк, Б.В. Формирование принципов оптимального развития и функционирования газотранспортных систем / Б.В. Будзуляк и др. // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. ИМ Губкина. – 2018. – №. 4. – С. 88-95.



9. Бураков, М.В. Нечеткие регуляторы. Учебное пособие / М.В. Бураков. – СПб, из-во ГУАП, 2010. – 237 с.
10. Плотников, В.М. Регуляторы давления газа / В.М. Плотников, В.А. Подрешетников и др. – Недра, 1982. – 125 с.
11. Воронов, А.А. Теория автоматического управления / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин – М.: Высшая школа. – 1986. – С. 504.
12. Встраиваемое программное обеспечение «МикроЗонд». Для одноплатных ЭВМ Octagon Micro PC 5066 и процессорных модулей SmartModule 486PC, DIMM PC-520 и DIMMBoard DX86. Версия 4.40.0362. – Москва, 2017. – 96 с.
13. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. – Изд. официальное. – М. Стандартинформ, 2007. – 143 с.
14. Гостев, В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – БХВ – Петербург. – 2011. – 416 с.
15. Грибин, М.А. Применение алгоритма Мамдани в системах автоматического управления / М.А. Грибин // Agricultural sciences. – 2017. – С. 75 - 82.
16. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В.В. Денисенко // СТА. – 2007. – №4. – С. 86 – 97.
17. Единая система газоснабжения. Её основные показатели и элементы. Перспективы развития. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://infopedia.su/10x2f4f.html>
18. Единая система управления производственной безопасностью в ПАО «Газпром». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/about/production/safety/>
19. Елизарьева, Н.Л. Анализ влияния характеристик газа на эффективность узла редуцирования / Н.Л. Елизарьева и др. // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2015. – №. 4. – С. 178-186.

20. Задача обработки технологических данных. Версия 4.40.0348. Прикладное программное обеспечение системы сбора технологической информации. Комплекс программ ЗОНД (Версия 4.40). – Москва: 2017. – 20 с.

21. Иванов, Б.А. К проблеме идентификации крана-регулятора на магистральном газопроводе / Б.А. Иванов и др. // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. – 2003. – №. 3. – С. 139-143.

22. Иванов, Б.А. Математическая модель управляемого узла редуцирования газа (аналитический аспект) / Б.А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. – 2006. – №. 2. – С. 17-19.

23. Икусов, А.Е. Надежность крановых узлов линейной части газопроводов / А.Е. Икусов // Газовая промышленность. – 2001. – № 6. – С. 58-59.

24. Калмыков, А. С. Современные тенденции развития мировой энергетики и роль магистрального трубопроводного транспорта России / А.С. Калмыков // Вестник Бурятского государственного университета. Философия. – 2013. – №. 14. – С. 153-157.

25. Картышов, А.С. Сравнение регуляторов / А.С. Картышов // Вестник научных конференций. – ООО Консалтинговая компания Юком, 2017. – №. 5-2. – С. 49-51.

26. Кипрушкин, А.В. Проблема автоматизации узлов редуцирования газа на магистральных газопроводах / А.В. Кипрушкин, А.А. Колотов // Автоматизация технологичных объектов и производств. – ДонНТУ. – 2004. – С. 162-163

27. Кныш, Н.В. Интеллектуальное управление процессом подачи и распределения смеси асфальтоукладчиком: дис. канд. техн. наук / Н.В. Кныш. – Сибирский федеральный университет, 2016. – 136 с.

28. Козаченко, А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А.Н. Козаченко. – Москва: Нефть и газ 1999. – 463 с.

29. Комплекс программ ЗОНД. Программа «Зонд2006». Пункт управления СЛТМ «Магистраль-2». Краткое руководство диспетчера. Прикладное программное обеспечение системы сбора технологической информации. – Москва 2014. – 21 с.

30. Корячко, В.П. Интеллектуальные системы и нечеткая логика: учебник / В.П. Корячко, М.А. Бакулева, В.И. Орешков. – М: КУРС, 2020. – 352 с.
31. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – Москва: Физматлит, 2001. - 224 с.
32. Крымский, В.Г. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы / В.Г. Крымский и др. //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – №. 2. – С. 70-79.
33. Крюков, В.В. Применение нечеткой логики в процессе управления редуцированием газа в магистральных трубопроводах / В.В. Крюков // Доклад IX Международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech 2017). – С. 122-127.
34. 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.
35. 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.
36. Крюков, В.В. Управление процессом редуцирования газа в магистральных газопроводах / В.В. Крюков, В.В. Тугов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (63). – С. 35-46.
37. 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.
38. 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 науч-

но-технической конференции молодых руководителей и специалистов. Сборник тезисов. – Екатеринбург: 2015. – С.36-39.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. Кузищин, В.Ф. Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное воздействие и в режиме автоколебаний / В.Ф. Кузищин, В.С. Царев // Теплоэнергетика. – 2014. – № 4. – С. 35.

48. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

49. Ланге, Ф. Нечеткая логика / Ф. Ланге. – Санкт-Петербург: Страта, 2018. – 114 с.

50. Лубенцова Е. В. Системы управления с динамическим выбором структуры, нечеткой логикой и нейросетевыми моделями / Е.В. Лубенцова. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2014. – 247 с.

51. Макаров, И.М. Линейные автоматические системы / И.М. Макаров, Е.М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982. – 464 с.

52. Мохаммед, А.З. Локальное управление для улучшения устойчивости многомашинной энергетической системы / А.З. Мохаммед, А.И. Маликов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №. 1-2. – С. 75-83.

53. Чурсин, К.А. Нечеткая система регулирования расхода реагента для обессоливания воды с использованием нечеткой логики / К.А. Чурсин, В.В. Тугов // Сборник: Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2015. – С. 111-114.

54. Никаноров, В.В. Актуальные требования к системам линейной телемеханики магистральных газопроводов / В.В. Никаноров, А.М. Проскуряков, А.В. Крохмалев // Газовая промышленность. – 2012. – №. 5. – С. 33-37.

55. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон. Д. Пиани. – СПб: Невский Диалект, 2001. – С. 379.

56. Пархимович, А.Ю. Качественный анализ системы регулирования давления магистрального газа / А.Ю. Пархимович, А.А. Соловьев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2006. – Т. 8. – №. 4. – С. 7-12.

57. Петров, И.В. Программируемые логические контроллеры. Стандартные языки и инструменты / И.В. Петров. – М.: Солон-Пресс. – 2003. – 256 с.

58. Предместьин, И.В. Разработка и исследование метода интуитивного управления / И.В. Предместьин и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30. – №. 4 (173). – С. 65-67.

59. Программа газификации регионов России 2021–2025 [Электронный ресурс] / ООО «Газпром межрегионгаз» – Режим доступа: <https://mrg.gazprom.ru/about/gasification/>.

60. Гневшев, И.В. Разработка модели процесса очистки воды на основе аппарата нечеткой логики / И.В. Гневшев, В.В. Тугов // Сборник: Компьютерная ин-

теграция производства и ИПИ-технологии материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2015. – С. 50-53.

61. Распоряжение правительства Российской Федерации «Об утверждении плана мероприятий ("дорожная карта") по внедрению социально ориентированной и экономически эффективной системы газификации и газоснабжения субъектов Российской Федерации» № 1152-р от 30 апреля 2021 г.

62. Реализация протокола MODBUS. Версия 4.40.0322. Руководство пользователя. Прикладное программное обеспечение системы сбора технологической информации. Комплекс программ ЗОНД (Версия 4.40). – Москва: 2014. – 242 с.

63. Рубанов, В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов, И.А. Рыбин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nrsu.bstu.ru/>

64. Сидорова, А.А. Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора / А.А. Сидорова // Проблемы информатики. – 2012. – №. 5. – С. 143-150.

65. Система линейной телемеханики «Магистраль-2». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gpa.ru/Комплекс Магистраль-2/>

66. Сныткин, В.В. Наладка, ремонт и эксплуатация газорегуляторных установок / В.В. Сныткин, А.В. Шалин. – Л.: Недра, 1970. – 144 с.

67. СТО Газпром 2-3.5-454-2010. «Правила эксплуатации магистральных газопроводов». Распоряжение ОАО «Газпром» № 130 от 24 мая 2010 г.

68. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник / Д.Ф. Гуревич, О.Н. Заринский, С.И. Косых и др.; под общ. ред. С. И. Косых. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1982. – 320.

69. Труханович А. Л. Промышленные сети. № УД-1266/уч. – БГУ. – 2015. – 14 с.

70. Убайдуллаева, Ш.Р. Промышленные сети и интерфейсы в автоматизированных системах управления технологическими процессами / Ш.Р. Убайдуллаева, С. Акбарова // Молодежь и XXI век-2019. – 2019. – С. 184-187.

71. Управление в условиях неопределенности / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. Е. Горецкого. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – 398 с.
72. Усков, А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – Издательство: "Горячая Линия - Телеком" – 2004. – 143 с.
73. Фёдорова, Н.В. Модернизация автоматизированной системы управления магистральным газопроводом / Н.В. Фёдорова, И.Ю. Еланцев, В.А. Рябчук // 21 век: фундаментальная наука и технологии. – 2016. – С. 142-144.
74. Финаев, В.И. Решение задач управления с применением интеллектуальных гибридных систем / В.И. Финаев, Е.Н. Павленко, С.В. Кирильчик // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – №. 5 (154). – С. 140-147.
75. Чучакин, Л.А. Приборный контроль за состоянием газопроводов и газового оборудования / Л.А. Чучакин, Н.Е. Тверитин. – Л.: Недра, 1989. – 167 с.
76. Шишов, О.В. Современные технологии промышленной автоматизации. – Directmedia / О.В. Шишов. – Москва|Берлин, 2015. 369 с.
77. Шпак, М.В. Экспериментальное исследование работы ПИД-регулятора заполнения испарителя жидким холодильным агентом / М.В. Шпак, И.З. Жильцов // Вестник Астраханского ГТУ. Механика. – 1998. – С. 119.
78. Штейнберг, Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Сережин, И.Е. Залуцкий, И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С. 1-7.
79. Шубладзе, А.М. Адаптивные автоматически настраивающиеся ПИД-регуляторы / А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, А.А. Шубладзе // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 6. – С. 35–42.
80. Шубладзе, А.М. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы / А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, А.А. Шубладзе // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – С. 30-33.
81. Шур, И.А. Газорегуляторные пункты и установки / И.А. Шур. – Л.: Недра, 1985. – 288 с.



82. Alimonti, C. From a valve to a flow metering device in two-phase flows / C. Alimonti, D. Berardi // Conference: 8th World conference on experimental heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics June. – 2013. – C. 16-20.

83. Ang, K.H. PID control system analysis, design, and technology / K.H. Ang, G. Chong, Y. // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – July 2005. – Vol. 13. – No. 4. – P. 559-576.

84. Bergsten, P. Observers for Takagi-Sugeno fuzzy systems / P. Bergsten, R. Palm, D. Driankov // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 2002. – T. 32. – №. 1. – C. 114-121.

85. Carvajal, J. Fuzzy PID Controller: Design, Analysis, performance evaluation, and stability analysis / J. Carvajal, G. Chen and H. Ogmen // Information Sciences. Vol.123, no. 3-4. pp. 249-270, April 2000.

86. Chien, K.L. On automatic control of gene - ralized passive systems / K.L. Chien, J.A. Hrones, J.B. Reswick // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. P. 175-185.

87. Hemerly, E.E. PC based packages for identification, optimization, and adaptive control / E.E Hemerly // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 1991. Vol. 11. Issue 2.- P. 37 43.

88. Ho, H.F. Adaptive PID controller for nonlinear system with  $H_{\infty}$  / H.F. Ho, Y.K. Wong, A.B. Rad // Physics and Control, 2003 International Conference, 20-22 Aug. 2003. Proceedings. Vol. 4. P. 1315-1319.

89. Ho, M.T., PID controller design for robust performance / M.T. Ho, C.Y. Lin // IEEE Trans. on Automatic Control. Aug. 2003. Vol. 48. No. 8. P. 1404- 1409.

90. Hodel, A.S. Variable-structure PID control to prevent integrator windup / A.S. Hodel, C.E. Hall // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2001. Vol.48. No. 2. P. 442-451.

91. Jing-Chung, Shen. PID tuning rules for second dorder systems / Shen Jing-Chung, Chiang Huann-Keng // Control Conference, 2004 (5th Asian), 20-23 July 2004. Vol. 1. P. 472-477.

92. Kanagaraj, N. An embedded fuzzy controller for real time pressure control / N. Kanagaraj and P. Sivashanmugam // Proceedings of the IEEE Int. conf. on Industrial Technology. 2006. Mumbai, India.
93. Karimi, A. PID controller tuning using Bode's integrals / A. Karimi, D. Garcia, R. Longchamp // IEEE Trans. on Control Systems Technology. Nov. 2003. Vol. 11. No. 6. P. 812-821.
94. Keel, L.H. A new approach to digital PID controller design / L.H. Keel, J.I. Rego, S.P. Bhattacharyya // IEEE Trans. on Automatic Control. April 2003. Vol. 48. No. 4. P. 687-692.
95. Kryukov, V.V. Managing the process of reduction gas in gas pipelines / V.V. Kryukov, V.V. Tugov // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2019. – T. 27. – №. 3. – C. 35-46.
96. Li, Y. Patents, Software, and Hardware for PID control: an overview and analysis of the current art / Y. Li, K.H. Ang, G.C.Y. Chong // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. P. 42-54.
97. Moradi M.H. New techniques for PID controller design / M.H. Moradi // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications (CCA 2003), 23-25 June 2003. Vol. 2. P. 903-908.
98. Murti, T. Sistem penunjang keputusan kelayakan pemberian pinjaman dengna metode fuzzy tsukamoto / T. Murti, L.A. Abdillah, M. Sobri // arXiv preprint arXiv:1506.00091. – 2015.
99. O'Dwyer, A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey / A. O'Dwyer // Proceedings of the American Control Conference, 4-6 June 2003. Vol. 2. P. 1494-1499.
100. Obika, M. An evolutionary design of robust PID controllers / M. Obika, T. Yamamoto // Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, 29 July - 1 Aug. 2005. Vol. 1. P. 101-106.
101. Obika, M. An evolutionary design of robust PID controllers / M. Obika, T. Yamamoto // Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, 29 July - 1 Aug. 2006. Vol. 1. P. 120-180.

102. Oviedo, J.J.E. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications / J.J.E. Oviedo, T. Boelen, P. van Overschee // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. P. 15-19.

103. Press conference on a theme «Gazprom» in Eastern Russia, Entry into Asia-Pacific Markets». The shorthand report. – June, 21st, 2011 – М: JSC «Gazprom». – 15 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/f/posts/89/063726/gazprom-east-stenogramma-2011-06-21.pdf/>.

104. Qiwen, Yang. Simultaneous PID self-tuning and control / Qiwen Yang, Yuncan Xue, Jiao Huang // Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2-4 Sept. 2004. P. 363-367.

105. Shouli, W. Robust stability of approximate Smith predictor control systems / W. Shouli, K. Watanabe, E. Muramatsu, Y. Ariga, S. Endo // SICE 2004 Annual Conference, 4-6 Aug. 2004. Vol. 2. P. 1522-1527.

106. Silva, G.J. New results on the synthesis of PID controllers / G.J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya // IEEE Trans. on Automatic Control. Feb. 2002. Vol. 47. No. 2. P. 241-252.

107. Silva, G.J. On the stability and controller robustness of some popular PID tuning rules / G.J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya // IEEE Trans. on Automatic Control. Sept. 2003. Vol. 48. No. 9. P. 1638-1641.

108. Skoczowski, S. A method for improving the robustness of PID control / S. Skoczowski, S. Domek, K. Pietruszewicz, B. Broel-Plater // IEEE Trans. on Industrial Electronics. Dec. 2005. Vol. 52. No. 6. P. 1669-1676.

109. Takao, K. Design of a memory-based self-tuning PID controller / K. Takao, T. Yamamoto, T. Hinamoto // 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2004), 14-17 Dec. 2004. Vol. 2. P. 1598-1603.

110. Wen, Tan. Comparison of some well-known PID tuning formulas / Wen.Tan.Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio. J. Marquez // Computers and Chemical Engineering. -2006. - № 30. –P. 1416-1423.

111. Yang, Y.S. Characteristics of MOKVELD Axial Piston Type Control Valve and Disposal of Its Problems / Y.S. Yang, Y.Q. Cong, P. Wang // Pipeline Technique and Equipment. – 2010.

112. Ziegler, J.G. Optimum settings for automatic controllers / J.G. Ziegler, N.B. Nichols // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.

**Приложение А**  
**Благодарственные письма, дипломы**



# БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

## Крюкову Владимиру Викторовичу

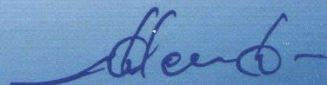
инженеру 3 категории (по телемеханике) службы КИПиА  
Оренбургского ЛПУМГ

за участие  
в XVI Научно-технической конференции  
молодых руководителей и специалистов  
ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»



**МОЛОДЕЖНЫЕ ИННОВАЦИИ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И  
НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТА ГАЗА**

Генеральный директор  
ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»

 Д.Д. Гайдт

г. Екатеринбург, 2015 г.



**МОЛОДЕЖНЫЕ ИННОВАЦИИ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ  
ТРАНСПОРТА ГАЗА**  
18-22 АПРЕЛЯ 2016,  
ЕКАТЕРИНБУРГ

# БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

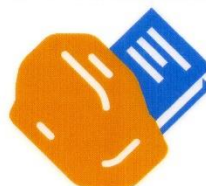
**Крюков Владимир Викторович**

ИНЖЕНЕР ПО ТЕЛЕМЕХАНИКЕ СЛУЖБЫ КИПИА  
ОРЕНБУРГСКОЕ ЛПУМГ

**ЗА УЧАСТИЕ В XVII ОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ**

Генеральный директор  
ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»

Д.Д. Гайдт



**2016  
ГОД  
ОХРАНЫ  
ТРУДА**

«ИННОВАЦИОННЫЕ МОЛОДЕЖНЫЕ ПРОЕКТЫ -  
ВЕКТОР РАЗВИТИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ»



# БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО



10-14 АПРЕЛЯ 2017,  
ЕКАТЕРИНБУРГ


вручается:

## КРЮКОВУ ВЛАДИМИРУ ВИКТОРОВИЧУ

инженеру 3 категории (по телемеханике)  
Службы КИПиА, телемеханики, эксплуатации  
АСУ ТП и метрологии Оренбургского ЛПУМГ

**ЗА УЧАСТИЕ В XVIII ОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ**

Генеральный директор  
ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»

 Д.Д. Гайдт



**XIX Отраслевая научно-техническая  
конференция молодых  
руководителей и специалистов**

**Благодарственное  
письмо**



**19**

**ОТРАСЛЕВАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ**

**2019/64**

55 ЛЕТ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»

**ВРУЧАЕТСЯ:**

**КРЮКОВУ  
ВЛАДИМИРУ  
ВИКТОРОВИЧУ**

**Инженеру 2 категории (по телемеханике)  
Службы КИПиА, телемеханики, эксплуатации АСУ ТП и метрологии  
Оренбургского ЛПУМГ**

**ЗА УЧАСТИЕ  
В XIX ОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ**

**Генеральный директор  
ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»**

**А.В. Крюков**

**21-25  
МАЯ  
2018  
ЕКАТЕРИНБУРГ**



**2018 ГОД  
КАЧЕСТВА**





**55** ЛЕТ  
1964–2019

**XX**

ОТРАСЛЕВАЯ  
НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ

**2019/64**

55 ЛЕТ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»

# БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

ВРУЧАЕТСЯ

**КРЮКОВУ**

**ВЛАДИМИРУ ВИКТОРОВИЧУ**

инженеру КИПиА службы АиМО  
Оренбургского ЛПУМГ

ЗА УЧАСТИЕ

В XX ОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И  
СПЕЦИАЛИСТОВ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

03–07 июня 2019 г. Екатеринбург



**XXIII**  
ОТРАСЛЕВАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
**2022**

# БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

ВРУЧАЕТСЯ

**КРЮКОВУ**

**ВЛАДИМИРУ ВИКТОРОВИЧУ**

инженеру по КИПиА 1 категории службы автоматизации  
и метрологического обеспечения Оренбургского ЛПУМГ

ЗА УЧАСТИЕ

В XXIII ОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ РУКОВОДИТЕЛЕЙ  
И СПЕЦИАЛИСТОВ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

06-10 июня 2022 г. Екатеринбург



# ДИПЛОМ

КОНКУРС ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МАСТЕРСТВА  
«ЛУЧШИЙ МОЛОДОЙ РАЦИОНАЛИЗАТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ» 2019»

# I МЕСТО

НАГРАЖДАЕТСЯ

инженер 1-ой категории  
по КИПиА  
Оренбургского ЛПУМГ

**КРЮКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

---

2019



# ДИПЛОМ

«ЛУЧШИЙ МОЛОДОЙ РАЦИОНАЛИЗАТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
за 2019 год»

# I МЕСТО

НАГРАЖДАЕТСЯ

**КРЮКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

инженер 1 категории по КИПиА  
службы автоматизации и метрологического  
обеспечения  
Оренбургского ЛПУМГ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

2020



# ДИПЛОМ

«ЛУЧШИЙ МОЛОДОЙ РАЦИОНАЛИЗАТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
за 2020 год»

# III МЕСТО

НАГРАЖДАЕТСЯ

**КРЮКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

инженер по контрольно – измерительным приборам и автоматике 1 категории службы автоматизации и метрологического обеспечения Оренбургского ЛПУМГ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

2021



# ДИПЛОМ

«ЛУЧШИЙ МОЛОДОЙ РАЦИОНАЛИЗАТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
за 2021 год»

# I МЕСТО

НАГРАЖДАЕТСЯ

**КРЮКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

инженер по контрольно – измерительным приборам и автоматике 1 категории службы автоматизации и метрологического обеспечения Оренбургского ЛПУМГ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЕКАТЕРИНБУРГ»  
А.В. КРЮКОВ

2022

## Приложение Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для  
ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

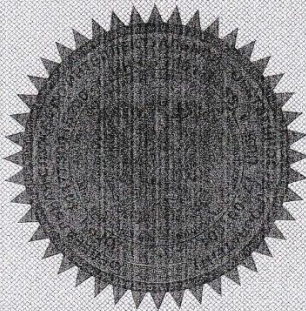
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2021614238Программа управления нечетким ПИД-регулятором  
давленияПравообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет» (RU)*Авторы: *Тугов Виталий Валерьевич (RU), Крюков Владимир  
Викторович (RU)*

Заявка № 2021613429

Дата поступления 19 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2021 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности  
Г.П. Ивлиев

## Приложение В

### Программа управления нечетким ПИД-регулятором давления

**Авторы:** Крюков В.В., Тугов В.В.

**Правообладатель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»

**Программа:** Программа «Программа управления нечетким ПИД-регулятором давления»

**Аннотация:** Программа предназначена для управления клапанами – регуляторами высокого давления, устанавливаемыми на линейной части магистрального газопровода. Программа обеспечивает поддержание заданного значения давления на выходе регулятора при динамически изменяющемся входном давлении узла редуцирования газа. Программа сочетает в себе классический закон ПИД-регулирования, а также подстройку коэффициентов регулирования при помощи аппарата нечеткой логики, что позволяет значительно снизить автоколебания в системе, ускорить процесс стабилизации выходной величины и повысить качество технологического процесса.

Область применения — производственная деятельность работников служб газотранспортных предприятий, научно-исследовательская деятельность при проведении диссертационных исследований, учебный процесс при подготовке инженерно-технических специалистов высших учебных заведений.

**Тип ЭВМ:** Atmel AVR ATmega32

**Язык программирования:** С

**ОС:** Не требуется

**Объём программы:** 37,9 Кб.

**Листинг программы:**

```
#include <math.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/libtypes.h>
#include "avrlibdefs.h"
#include "avrlibtypes.h"
```



```

#include "avr/pgmspace.h"

#include <avr/wdt.h>

//Clock Config

#define F_CPU 8000000L

//System Timer Config

#define Prescaler 64

#define TimerDivider (F_CPU/Prescaler/1000) // 1 mS

//USART Config

#define baudrate 9600L

#define bauddivider (F_CPU/(16*baudrate)-1)

#define HI(x) ((x)>>8)

#define LO(x) ((x)& 0xFF)

//PORT Defines

#define I_C 3

#define I_L 6

#define OUTPUT_DDR DDRC

#define OUTPUT_PORT PORTC

#define STATUS_REG SREG

#define Interrupt_Flag SREG_I

#define Disable_Interrupt cli();

#define Enable_Interrupt sei();

//RTOS Config

#define RTOS_ISR TIMER2_COMP_vect

#define TaskQueueSize 20

#define MainTimerQueueSize 15

/* define baudrate of modbus */

#define BAUD 38400L

/*

* Definitions for transceiver enable pin.

*/

#define TRANSCEIVER_ENABLE_PORT PORTD

```

```

#define TRANSCEIVER_ENABLE_PIN 2

#define TRANSCEIVER_ENABLE_PORT_DDR DDRD

#define UART_TRANSMIT_COMPLETE_INTERRUPT USART_TXC_vect

#define UART_RECEIVE_INTERRUPT USART_RXC_vect

#define UART_TRANSMIT_INTERRUPT USART_UDRE_vect

#define UART_STATUS UCSRA

#define UART_CONTROL UCSRB

#define UART_DATA UDR

#define UART_UDRIE UDRIE

#define UBRR (F_CPU / 8 / BAUD ) -1

#define MULTIPLE_ADR 2

#define SINGLE_ADR 1

/*
 * Use SINGLE_ADR or MULTIPLE_ADR, default: SINGLE_ADR
 * This is useful for building gateways, routers or clients that for whatever reason need multiple ad-
 * dresses.
 */

#define ADDRESS_MODE SINGLE_ADR

#define PHYSICAL_TYPE 485 //possible values: 485, 232

#define modbusInterFrameDelayReceiveStart 16

#define modbusInterFrameDelayReceiveEnd 18

#define modbusInterCharTimeout 7

#define MaxFrameIndex 255

#define fcForceSingleCoil 5 //write single bit

#define fcPresetSingleRegister 6 //write analog output register (2 Bytes)

#define ecIllegalFunction 1

#define ecIllegalDataAddress 2

#define ecIllegalDataValue 3

#define ecSlaveDeviceFailure 4

#define ecAcknowledge 5

#define ecSlaveDeviceBusy 6

```

```

#define ecNegativeAcknowledge 7
#define ecMemoryParityError 8
#define BusTimedOut 0
#define Receiving 1
#define Transmitting 2
#define ReceiveCompleted 3
#define TransmitRequested 4
#define TimerActive 5
#define GapDetected 6
typedef void (*TPTR)(void);
// Очереди задач, таймеров.
// Тип данных - указатель на функцию
volatile static TPTR TaskQueue[TaskQueueSize+1]; // очередь указателей
volatile static struct
{
    TPTR GoToTask; // Указатель перехода
    u16 Time; // Выдержка в мс
}
MainTimer[MainTimerQueueSize+1]; // Очередь таймеров
extern void InitAll(void);
extern void InitRTOS(void);
extern void RunRTOS (void);
extern void Idle(void);
extern void SetTask(TPTR TS);
extern void SetTimerTask(TPTR TS, u16 NewTime);
extern void TaskManager(void);
extern void TimerService(void);
extern void modbusInit(void);
extern void modbusSendMessage(unsigned char packtop);
extern void modbusSendException(unsigned char exceptionCode);
void modbusReset(void);

```

```
extern void modbusTickTimer(void);

volatile unsigned char rxbuffer[MaxFrameIndex+1];

volatile uint16_t DataPos;

volatile unsigned char Address = 0x09;

volatile uint8_t outstate = 0; // Флаг нажатия "Настройка коэффициентов ПИД регулятора"

volatile uint16_t holdingRegisters[4]; // Уставка текущая
uint16_t holdingRegistersPrevious; // Уставка предыдущая

volatile unsigned char BusState = 0;

volatile uint16_t modbusTimer = 0;

volatile unsigned char rxbuffer[MaxFrameIndex+1];

volatile uint16_t DataPos = 0;

volatile unsigned char PacketTopIndex = 7;

volatile unsigned char modBusStaMaStates = 0;

uint8_t Output = 0; // Величина открытия Моквелда (0..255)

uint8_t ADCiteration = 0; // количество пройденных итераций суммирования значений АЦП
(1..64)

uint16_t Input10 = 0; // Входное значение АЦП 10 бит
uint16_t InputSum = 0; // Промежуточная сумма значений АЦП
uint16_t Input16 = 0; // Суммированное значение АЦП 16 бит
uint16_t Array_Input16[255]; // Массив последних 256 суммированных значений АЦП
uint8_t ProcessBecomeUnchangeable; // Флаг показывающий, что процесс стал стабильный
float Kp = 1.0; // пропорциональный коэффициент
float Ki = 0.0; // интегральный коэффициент
float Kd = 0.0; // дифференциальный коэффициент
uint16_t Tu; // Период для подсчета по методу Зиглера-Никольса
uint16_t Un = 0; // Un текущее выходное значение ПИД регулятора 16 бит
uint16_t UnMinus1 = 0; // Un-1 предыдущее выходное значение ПИД регулятора 16 бит
int32_t En = 0; // En текущая ошибка регулирования 16 бит
int32_t EnMinus1 = 0; // предыдущая ошибка регулирования 16 бит
int32_t EnMinus2 = 0; // ошибка регулирования две итерации назад 16 бит
uint32_t q = 0; // интеграл (сумма) ошибок регулирования
```

```
uint16_t T = 0; // время (количество итераций), которое прошло с начала регулирования
uint16_t t1 = 0; // время (количество итераций), которое прошло с начала регулирования до момента t1
uint16_t tn = 0; // время (количество итераций), которое прошло с начала регулирования до момента tn

#define MaxDeflection 10 // максимальное стандартное отклонение, при котором процесс регулирования считается устойчивым

#define t1max 10
#define tnmax 60
#define qminmax 10

float mnt1;
float mntn;
float mmq;
float mvt1;
float mvtn;
float mnq;
float mvq;

float MinForEveryRules[11];

#define Force_mKim -0.5
#define Force_mKin 0
#define Force_mKiv 0.5
#define Force_mKisv 1
#define Force_mKpm -0.5
#define Force_mKpn 0
#define Force_mKpv 0.5
#define Force_mKdm -0.5
#define Force_mKdn 0
#define Force_mKdv 0.5
#define Force_mKdsv 1

float mKim;
float mKin;
float mKiv;
```

```

float mKisv;

float mKpm;

float mKpn;

float mKpv;

float mKdm;

float mKdn;

float mKdv;

float mKdsv;

float dKI;

float dKP;

float dKD;

//RTOS Interrupt
ISR(RTOS_ISR)
{
TimerService();
}

//Timer0 Interrupt
ISR(TIMER0_OVF_vect) { //this ISR is called 9765.625 times per second
    modbusTickTimer();
}

//UART Interrupt
ISR(UART_RECEIVE_INTERRUPT)
{
    unsigned char data;
    data = UART_DATA;
    modbusTimer=0; //reset timer

    if (!(BusState & (1<<ReceiveCompleted)) && !(BusState & (1<<TransmitRequested)) &&
        !(BusState & (1<<Transmitting)) && (BusState & (1<<Receiving)) && !(BusState &
        (1<<BusTimedOut)))
    {
        if (DataPos>MaxFrameIndex) modbusReset();
    }
}

```

```

else
{
rxbuffer[DataPos]=data;
DataPos++; //TODO: maybe prevent this from exceeding 255?
}
} else
if (!(BusState & (1<<ReceiveCompleted)) && !(BusState & (1<<TransmitRequested)) &&
!(BusState & (1<<Transmitting)) && !(BusState & (1<<Receiving)) && (BusState &
(1<<BusTimedOut)))
{
rxbuffer[0]=data;
BusState=((1<<Receiving)|(1<<TimerActive));
DataPos=1;
}
}
//UART Interrupt
void transceiver_rxen(void);
ISR(UART_TRANSMIT_INTERRUPT)
{
BusState&=~(1<<TransmitRequested);
BusState|= (1<<Transmitting);
UART_DATA=rxbuffer[DataPos];
DataPos++;
if (DataPos==(PacketTopIndex+1)) {
UART_CONTROL&=~(1<<UART_UDRIE);
}
}
//UART Interrupt
ISR(UART_TRANSMIT_COMPLETE_INTERRUPT)
{
transceiver_rxen();
}

```

```
modbusReset();
}
//ADC Interrupt
ISR(ADC_vect)
{
Input10 = ADCW;
if (ADCiteration<64) {
InputSum = InputSum + Input10;
ADCiteration = ADCiteration + 1;
}
else {
Input16 = InputSum;
InputSum = Input10;
ADCiteration = 1;
}
}
// Прототипы задач
=====

void ModbusGet (void);
void CopyVariableToOutputPort (void);
void WaitPushButtonSetting (void);
void WaitEnterLimit (void);
void PIDRegulate1 (void);
void PIDRegulate2 (void);
void PIDRegulate3 (void);
void KnowProcessBecomeUnchangeable1 (void);
void KnowProcessBecomeUnchangeable2 (void);
void KnowProcessBecomeUnchangeable3 (void);
void Calculate_Tu (void);
void WaitUnchangeableProcess (void);
void OpenCrane5Percent (void);
```



```

void CalculateDeadTimeProcess (void);
void Calculate_KpKiKd (void);
void KnowProcessBecomeUnchangeable (void);
void Calculate_mnt1 (void);
void Calculate_mntn (void);
void Calculate_mmq (void);
void Calculate_mvt1 (void);
void Calculate_mvtn (void);
void Calculate_mnq (void);
void Calculate_mvq (void);
void CalculateMinForEveryRules (void);
void Calculate_mKi (void);
void Calculate_mKp (void);
void Calculate_mKd (void);
void Calculate_dKI (void);
void Calculate_dKP (void);
void Calculate_dKD (void);
void Change_KpKiKd (void);
void PIDRegulate (void);
void CalculateArgumentForFuseLogic (void);
void KnowProcessBecomeUnchangeable (void);
extern uint8_t modbusGetBusState(void);
extern uint8_t modbusExchangeBits(volatile uint8_t *ptrToInArray, uint16_t startAddress, uint16_t
size);
extern uint8_t modbusExchangeRegisters(volatile uint16_t *ptrToInArray, uint16_t startAddress,
uint16_t size);
extern uint16_t modbusRequestedAmount(void);
extern uint16_t modbusRequestedAddress(void);
extern uint8_t crc16(volatile uint8_t *ptrToArray,uint8_t inputSize);
//=====
====
//Область задач

```

```

//=====
=====

void ModbusGet (void) //процедура обработки принятого сообщения протоколу Modbus RTU
{
    if (modbusGetBusState() & (1<<ReceiveCompleted))
    {
        switch(rxbuffer[1]) {
        case fcForceSingleCoil: {
            modbusExchangeBits(&outstate,0,8);
        }
        break;
        case fcPresetSingleRegister: {
            modbusExchangeRegisters(holdingRegisters,0,4);
        }
        break;
        default: {
            modbusSendException(ecIllegalFunction);
        }
        break;
        }
    }
    SetTimerTask(ModbusGet,1);
}

void CopyVariableToOutputPort (void)
{
    OUTPUT_PORT = Output;
    SetTimerTask(CopyVariableToOutputPort,1);
}

void WaitPushButtonSetting (void)
{
    if (outstate = 1) {

```

```

Kp = 0.1;
Ki = 0.0;
Kd = 0.0;
holdingRegisters[0] = (256*256-1) / 10;
SetTimerTask(PIDRegulate2,1);
}
else {
SetTimerTask(WaitEnterLimit,100);
}
}
void PIDRegulate2 (void)
{
PIDRegulate;
SetTimerTask(KnowProcessBecomeUnchangeable2,1);
}
void KnowProcessBecomeUnchangeable2 (void)
{
KnowProcessBecomeUnchangeable;
if (ProcessBecomeUnchangeable = 1) {
Kp = Kp + 0.1;
SetTimerTask(PIDRegulate2,99);
}
else {
SetTimerTask(Calculate_Tu,1);
}
}
void Calculate_Tu (void)
{
uint8_t max = 0;
uint8_t min = 255;
uint8_t i_max = 0;

```

```

uint8_t i_min = 0;
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
if (Array_Input16[i]>max)
{
max = Array_Input16;
i_max = i;
}
}
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
if (Array_Input16[i]<min)
{
min = Array_Input16;
i_min = i;
}
}
Tu = 2 * fabs(i_max - i_min);
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
Array_Input16[i] = 0;
}
SetTimerTask(Calculate_KpKiKd,1);
}
void Calculate_KpKiKd (void)
{
Kp = 0.6 * Kp;
Ki = 2 * Kp / Tu;
Kd = 5 * Kp * Tu / 40;
Output = 0;
holdingRegisters[0] = (256*256-1) / 10;
SetTimerTask(PIDRegulate3,1);
}
void PIDRegulate3 (void)

```

```

{
PIDRegulate;
CalculateArgumentForFuseLogic;
SetTimerTask(KnowProcessBecomeUnchangeable3,1);
}

void KnowProcessBecomeUnchangeable3 (void)
{
KnowProcessBecomeUnchangeable;
if (ProcessBecomeUnchangeable = 1) {
SetTimerTask(Calculate_mnt1,1);
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
Array_Input16[i] = 0;
}
}
else {
SetTimerTask(PIDRegulate3,99);
}
}

void Calculate_mnt1 (void)
{
mnt1 = (-1) / t1max * t1 + 1;
SetTimerTask(Calculate_mntn,1);
}

void Calculate_mntn (void)
{
mntn = (-1) / tnmax * tn + 1;
SetTimerTask(Calculate_mmq,1);
}

void Calculate_mmq (void)
{
if (q<=0) mmq = (-1) / qminmax * q;

```

```

else mmq = 0;
SetTimerTask(Calculate_mvt1,1);
}
void Calculate_mvt1 (void)
{
mvt1 = 1 / t1max * t1;
SetTimerTask(Calculate_mvtn,1);
}
void Calculate_mvtn (void)
{
mvtn = 1 / tnmax * tn;
SetTimerTask(Calculate_mnq,1);
}
void Calculate_mnq (void)
{
if (q>=0) mnq = (-1) / qminmax * q + 1;
else mnq = 1 / qminmax * q + 1;
SetTimerTask(Calculate_mvq,1);
}
void Calculate_mvq (void)
{
if (q>0) mvq = 1 / qminmax * q;
else mvq = 0;
SetTimerTask(CalculateMinForEveryRules,1);
}
void CalculateMinForEveryRules (void)
{
float Rules[11][2];
Rules[0][0] = mvt1;
Rules[0][1] = mvtn;
Rules[0][2] = mvq;

```

Rules[1][0] = mvt1;  
Rules[1][1] = mntn;  
Rules[1][2] = mvq;  
Rules[2][0] = mvt1;  
Rules[2][1] = mvtn;  
Rules[2][2] = mnq;  
Rules[3][0] = mvt1;  
Rules[3][1] = mntn;  
Rules[3][2] = mnq;  
Rules[4][0] = mvt1;  
Rules[4][1] = mvtn;  
Rules[4][2] = mmq;  
Rules[5][0] = mvt1;  
Rules[5][1] = mntn;  
Rules[5][2] = mmq;  
Rules[6][0] = mnt1;  
Rules[6][1] = mvtn;  
Rules[6][2] = mvq;  
Rules[7][0] = mnt1;  
Rules[7][1] = mntn;  
Rules[7][2] = mvq;  
Rules[8][0] = mnt1;  
Rules[8][1] = mvtn;  
Rules[8][2] = mnq;  
Rules[9][0] = mnt1;  
Rules[9][1] = mntn;  
Rules[9][2] = mnq;  
Rules[10][0] = mnt1;  
Rules[10][1] = mvtn;  
Rules[10][2] = mmq;  
Rules[11][0] = mnt1;

```

Rules[11][1] = mntn;
Rules[11][2] = mmq;
uint8_t i;
for (i = 0; i <= 11; i = i + 1)
if (Rules[i][0] < Rules[i][1])
if (Rules[i][0] < Rules[i][2])
MinForEveryRules[i] = Rules[i][0];
else
MinForEveryRules[i] = Rules[i][2];
else
if (Rules[i][1] < Rules[i][2])
MinForEveryRules[i] = Rules[i][1];
else
MinForEveryRules[i] = Rules[i][2];

SetTimerTask(Calculate_mKi,1);
}
void Calculate_mKi (void)
{
mKim = MinForEveryRules[11];
mKisv = MinForEveryRules[10];
float Array_mKin[2];
Array_mKin[0] = MinForEveryRules[5];
Array_mKin[1] = MinForEveryRules[7];
Array_mKin[2] = MinForEveryRules[9];
float max_num = Array_mKin[0];
uint8_t i;
for (i = 1; i <= 2; i = i + 1)
if (Array_mKin[i] > max_num) max_num = Array_mKin[i];
mKin = max_num;
float Array_mKiv[6];

```



```

Array_mKiv[0] = MinForEveryRules[0];
Array_mKiv[1] = MinForEveryRules[1];
Array_mKiv[2] = MinForEveryRules[2];
Array_mKiv[3] = MinForEveryRules[3];
Array_mKiv[4] = MinForEveryRules[4];
Array_mKiv[5] = MinForEveryRules[6];
Array_mKiv[6] = MinForEveryRules[8];
max_num = Array_mKiv[0];
for (i = 1; i <= 6; i = i + 1)
if (Array_mKiv[i] > max_num) max_num = Array_mKiv[i];
mKiv = max_num;
SetTimerTask(Calculate_mKp,1);
}
void Calculate_mKp (void)
{
float Array_mKpm[3];
Array_mKpm[0] = MinForEveryRules[0];
Array_mKpm[1] = MinForEveryRules[6];
Array_mKpm[2] = MinForEveryRules[7];
Array_mKpm[3] = MinForEveryRules[10];
float max_num = Array_mKpm[0];
uint8_t i;
for (i = 1; i <= 3; i = i + 1)
if (Array_mKpm[i] > max_num) max_num = Array_mKpm[i];
mKpm = max_num;
float Array_mKpn[1];
Array_mKpn[0] = MinForEveryRules[3];
Array_mKpn[1] = MinForEveryRules[9];
max_num = Array_mKpn[0];
if (Array_mKpn[1] > max_num) max_num = Array_mKpn[1];
mKpn = max_num;

```

```

float Array_mKpv[5];
Array_mKpv[0] = MinForEveryRules[1];
Array_mKpv[1] = MinForEveryRules[2];
Array_mKpv[2] = MinForEveryRules[4];
Array_mKpv[3] = MinForEveryRules[5];
Array_mKpv[4] = MinForEveryRules[8];
Array_mKpv[5] = MinForEveryRules[11];
max_num = Array_mKpv[0];
for (i = 1; i <= 5; i = i + 1)
if (Array_mKpv[i] > max_num) max_num = Array_mKpv[i];
mKpv = max_num;
SetTimerTask(Calculate_mKd,1);
}
void Calculate_mKd (void)
{
mKdm = MinForEveryRules[7];
mKdsv = MinForEveryRules[3];
float Array_mKdn[7];
Array_mKdn[0] = MinForEveryRules[0];
Array_mKdn[1] = MinForEveryRules[2];
Array_mKdn[2] = MinForEveryRules[4];
Array_mKdn[3] = MinForEveryRules[5];
Array_mKdn[4] = MinForEveryRules[6];
Array_mKdn[5] = MinForEveryRules[8];
Array_mKdn[6] = MinForEveryRules[9];
Array_mKdn[7] = MinForEveryRules[11];
float max_num = Array_mKdn[0];
uint8_t i;
for (i = 1; i <= 7; i = i + 1)
if (Array_mKdn[i] > max_num) max_num = Array_mKdn[i];
mKdn = max_num;

```

```

float Array_mKdv[1];

Array_mKdv[0] = MinForEveryRules[1];
Array_mKdv[1] = MinForEveryRules[10];
max_num = Array_mKdv[0];
if (Array_mKdv[1] > max_num) max_num = Array_mKdv[1];
mKdv = max_num;
SetTimerTask(Calculate_dKI,1);
}

void Calculate_dKI (void)
{
dKI = (mKim * Force_mKim + mKin * Force_mKin + mKiv * Force_mKiv + mKisv * Force_mKisv)
/ (mKim + mKin + mKiv + mKisv);
SetTimerTask(Calculate_dKP,1);
}

void Calculate_dKP (void)
{
dKP = (mKpm * Force_mKpm + mKpn * Force_mKpn + mKpv * Force_mKpv) / (mKpm + mKpn +
mKpv);
SetTimerTask(Calculate_dKD,1);
}

void Calculate_dKD (void)
{
dKD = (mKdm * Force_mKdm + mKdn * Force_mKdn + mKdv * Force_mKdv + mKdsv *
Force_mKdsv) / (mKdm + mKdn + mKdv + mKdsv);
SetTimerTask(Change_KpKiKd,1);
}

void Change_KpKiKd (void)
{
Kp = Kp * (dKP + 1);
Ki = Ki * (dKI + 1);
Kd = Kd * (dKD + 1);
SetTimerTask(WaitPushButtonSetting,1);
}

```

```

}

void WaitEnterLimit (void)
{
if (holdingRegisters[0] != holdingRegistersPrevious)
SetTimerTask(PIDRegulate1,1);
else SetTimerTask(WaitPushButtonSetting,100);
}

void PIDRegulate1 (void)
{
PIDRegulate;
SetTimerTask(KnowProcessBecomeUnchangeable1,1);
}

void KnowProcessBecomeUnchangeable1 (void)
{
KnowProcessBecomeUnchangeable;
if (ProcessBecomeUnchangeable = 1) {
SetTimerTask(WaitPushButtonSetting,100);
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
Array_Input16[i] = 0;
}
}
else {
SetTimerTask(PIDRegulate1,99);
}
}

//=====
=====

int main(void)
{
InitAll(); // Инициализируем периферию
InitRTOS(); // Инициализируем ядро

```

```

RunRTOS(); // Старт ядра.

//ModbusInit

UBRRH = (unsigned char)((UBRR) >> 8);

UBRRL = (unsigned char) UBRR;

UART_STATUS = (1<<U2X); //double speed mode.

#ifdef URSEL // if UBRRH and UCSRC share the same I/O location , e.g. ATmega8
    UCSRC = (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0); //Frame Size
#else
    UCSRC = (3<<UCSZ0); //Frame Size
#endif

UART_CONTROL = (1<<TXCIE)|(1<<RXCIE)|(1<<RXEN)|(1<<TXEN); // USART receiver and
transmitter and receive complete interrupt

#if PHYSICAL_TYPE == 485
    TRANSCEIVER_ENABLE_PORT_DDR|=(1<<TRANSCEIVER_ENABLE_PIN);
    transceiver_rxen();
#endif

BusState=(1<<TimerActive);

// Запуск фоновых задач.
SetTask(WaitPushButtonSetting);

while(1) // Главный цикл диспетчера
{
    wdt_reset(); // Сброс таймера
    TaskManager(); // Вызов диспетчера
}

return 0;

}

void PIDRegulate (void)
{
    UnMinus1 = Un;
    EnMinus2 = EnMinus1;
    EnMinus1 = En;
}

```

```

En = holdingRegisters[0] - Input16;
Un = UnMinus1 + Kp * (En - EnMinus1) + Ki * En + Kd * (En - 2 * EnMinus1 + EnMinus2);
Output = Un / 256;
}
void CalculateArgumentForFuseLogic (void)
{
T = T + 1;
if (Input16 < holdingRegisters[0]/10) t1 = T;
if (Input16 < ((holdingRegisters[0]*9)/10)) tn = T;
q = q + fabs(En);
}
void KnowProcessBecomeUnchangeable (void)
{
uint16_t m = 0;
uint16_t deflection = 0;
uint16_t sum = 0;
uint16_t Array_sqr[255];
for (uint8_t i=0; i<254; i++) {
Array_Input16[i] = Array_Input16[i+1];
}
Array_Input16[255] = Input16;
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
sum = sum + Array_Input16[i];
}
m = sum / 256;
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
Array_sqr[i] = pow((Array_Input16[i] - m),2);
}
for (uint8_t i=0; i<255; i++) {
sum = sum + Array_sqr[i];
}
}

```

```

deflection = sqrt(sum / 256);
if (deflection<=MaxDeflection) {
ProcessBecomeUnchangeable = 1;
}
else {
ProcessBecomeUnchangeable = 0;
}
}
uint8_t modbusGetBusState(void)
{
return BusState;
}
void transceiver_txen(void)
{
TRANSCEIVER_ENABLE_PORT|=(1<<TRANSCEIVER_ENABLE_PIN);
}
void transceiver_rxen(void)
{
TRANSCEIVER_ENABLE_PORT&=~(1<<TRANSCEIVER_ENABLE_PIN);
}
uint8_t crc16(volatile uint8_t *ptrToArray,uint8_t inputSize)
{
uint16_t out=0xffff;
uint16_t carry;
unsigned char n;
inputSize++;
for (int l=0; l<inputSize; l++) {
out ^= ptrToArray[l];
for (n = 0; n < 8; n++) {
carry = out & 1;
out >>= 1;
}
}
}

```

```

if (carry) out ^= 0xA001;
}
}
//out=0x1234;
if ((ptrToArray[inputSize]==out%256) && (ptrToArray[inputSize+1]==out/256)) //check
{
return 1;
} else {
ptrToArray[inputSize]=out%256; //append Lo
ptrToArray[inputSize+1]=out/256; //append Hi
return 0;
}
}
void listRegisterCopy(volatile uint8_t *source, volatile uint8_t *target, uint8_t amount)
{
for (uint8_t c=0; c<amount; c++)
{
*(target+c)=*(source+c);
}
}
void listBitCopy(volatile uint8_t *source, uint16_t sourceNr,volatile uint8_t *target, uint16_t targetNr)
{
if(*(source+(sourceNr/8))&(1<<(sourceNr-((sourceNr/8)*8))))
{
*(target+(targetNr/8))|= (1<<(targetNr-((targetNr/8)*8)));
} else *(target+(targetNr/8))&=~(1<<(targetNr-((targetNr/8)*8)));
}
void modbusReset(void)
{
BusState=(1<<TimerActive); //stop receiving (error)
modbusTimer=0;
}

```



```

}

void modbusTickTimer(void)
{
    if (BusState&(1<<TimerActive))
    {
        modbusTimer++;
        if (BusState&(1<<Receiving)) //we are in receiving mode
        {
            if ((modbusTimer==modbusInterCharTimeout)) {
                BusState|= (1<<GapDetected);
            } else if ((modbusTimer==modbusInterFrameDelayReceiveEnd)) { //end of message
                BusState=(1<<ReceiveCompleted);
                #if ADDRESS_MODE == MULTIPLE_ADR
                if (crc16(rxbuffer,DataPos-3)) { //perform crc check only. This is for multiple/all address mode.
                    } else modbusReset();
                #endif
                #if ADDRESS_MODE == SINGLE_ADR
                if (rxbuffer[0]==Address && crc16(rxbuffer,DataPos-3)) { //is the message for us? => perform crc
                    check
                } else modbusReset();
                #endif
            }
            } else if (modbusTimer==modbusInterFrameDelayReceiveStart) BusState|= (1<<BusTimedOut);
        }
    }

void modbusSendMessage(unsigned char packtop)
{
    PacketTopIndex=packtop+2;
    crc16(rxbuffer,packtop);
    BusState|= (1<<TransmitRequested);
    DataPos=0;
}

```

```

#if PHYSICAL_TYPE == 485
transceiver_txen();
#endif

UART_CONTROL |= (1 << UART_UDRIE);
BusState &= ~(1 << ReceiveCompleted);
}

void modbusSendException(unsigned char exceptionCode)
{
    rxbuffer[1] |= (1 << 7); //setting MSB of the function code (the exception flag)
    rxbuffer[2] = exceptionCode; //Exceptioncode. Also the last byte containing data
    modbusSendMessage(2);
}

uint16_t modbusRequestedAmount(void)
{
    return (rxbuffer[5] | (rxbuffer[4] << 8));
}

uint16_t modbusRequestedAddress(void)
{
    return (rxbuffer[3] | (rxbuffer[2] << 8));
}

void intToModbusRegister(volatile uint16_t *inreg, volatile uint8_t *outreg, uint8_t amount)
{
    for (uint8_t c=0; c<amount; c++)
    {
        *(outreg+c*2) = (uint8_t)(*(inreg+c) >> 8);
        *(outreg+1+c*2) = (uint8_t)(*(inreg+c));
    }
}

void modbusRegisterToInt(volatile uint8_t *inreg, volatile uint16_t *outreg, uint8_t amount)
{
    for (uint8_t c=0; c<amount; c++)

```

```

{
*(outreg+c) = (*(inreg+c*2) << 8) + *(inreg+1+c*2);
}
}

uint8_t modbusExchangeRegisters(volatile uint16_t *ptrToArray, uint16_t startAddress, uint16_t
size)
{
uint16_t requestedAmount = modbusRequestedAmount();
uint16_t requestedAdr = modbusRequestedAddress();
if (rxbuffer[1]==fcPresetSingleRegister) requestedAmount=1;
if ((requestedAdr>=startAddress) && ((startAddress+size)>=(requestedAmount+requestedAdr))) {
if (rxbuffer[1]==fcPresetSingleRegister)
{
modbusRegisterToInt(rxbuffer+4,ptrToArray+(unsigned char)(requestedAdr-startAddress),1);
modbusSendMessage(5);
return 1;
}
//modbusSendException(ecSlaveDeviceFailure); //inappropriate call of modbusExchangeRegisters
return 0;
} else {
modbusSendException(ecIllegalDataValue);
return 0;
}
}

uint8_t modbusExchangeBits(volatile uint8_t *ptrToArray, uint16_t startAddress, uint16_t size)
{
uint16_t requestedAmount = modbusRequestedAmount();
uint16_t requestedAdr = modbusRequestedAddress();
if (rxbuffer[1]==fcForceSingleCoil) requestedAmount=1;
if ((requestedAdr>=startAddress) && ((startAddress+size)>=(requestedAmount+requestedAdr)))
{

```

```

if (rxbuffer[1]==fcForceSingleCoil) {
listBitCopy(rxbuffer+4,0,ptrToInArray,requestedAdr-startAddress);
modbusSendMessage(5);
return 1;
}
//modbusSendException(ecSlaveDeviceFailure); //inappropriate call of modbusExchangeBits
return 0;
} else
{
modbusSendException(ecIllegalDataValue);
return 0;
}
}
inline void InitAll(void)
{
//InitUSART
UBRRL = LO(bauddivider);
UBRRH = HI(bauddivider);
UCSRA = 0;
UCSRB = 1<<RXEN|1<<TXEN|0<<RXCIE|0<<TXCIE;
UCSRC = 1<<URSEL|1<<UCSZ0|1<<UCSZ1;
cli();
// Timer0 100us start
TCCR0|=(1<<CS01); //prescaler 8
TIMSK|=(1<<TOIE0);
//InitADC
ADMUX = 0; // Использовать ногу PA0,
// выравнивание по правой границе,
// использовать внешний ИОН
ADCSRA |=(1<<ADEN)|(1<<ADIE)|(1<<ADSC)|(1<<ADATE)|(7<<ADPS0);
// ADEN = 1 - разрешаем АЦП

```

```

// ADIE = 1 - разрешаем прерывание
// ADSC = 1 - запускаем преобразование (первое, дальше автоматом)
// ADATE = 1 - непрерывные последовательные преобразования, одно за другим
// ADPS2..0 = 7 - делитель частоты на 128
sei();
//InitPort
OUTPUT_DDR = 1; // Порт работает на выход
OUTPUT_PORT = 0; // Первоначальное состояние = 0
}
//RTOS Запуск системного таймера
inline void RunRTOS (void)
{
TCCR2 = 1<<WGM21|4<<CS20; // Freq = СК/64 - Установить режим и предделитель
// Автосброс после достижения регистра сравнения
TCNT2 = 0; // Установить начальное значение счётчиков
OCR2 = LO(TimerDivider); // Установить значение в регистр сравнения
TIMSK = 0<<TOIE0|1<<OCF2|0<<TOIE0; // Разрешаем прерывание RTOS - запуск ОС
sei();
}
// RTOS Подготовка. Очистка очередей
inline void InitRTOS(void)
{
u08 index;
for(index=0;index!=TaskQueueSize+1;index++) // Во все позиции записываем Idle
{
TaskQueue[index] = Idle;
}
for(index=0;index!=MainTimerQueueSize+1;index++) // Обнуляем все таймеры.
{
MainTimer[index].GoToTask = Idle;
MainTimer[index].Time = 0;
}
}

```

```

}
}
//Пустая процедура - простой ядра.
inline void Idle(void)
{
}
// Функция установки задачи в очередь. Передаваемый параметр - указатель на функцию
// Отдаваемое значение - код ошибки.
void SetTask(TPTR TS)
{
u08 index = 0;
u08 nointerrupted = 0;
if (STATUS_REG & (1<<Interrupt_Flag)) // Если прерывания разрешены, то запрещаем их.
{
Disable_Interrupt
nointerrupted = 1; // И ставим флаг, что мы не в прерывании.
}
while(TaskQueue[index]!=Idle) // Проверяем очередь задач на предмет свободной ячейки
{ // с значением Idle - конец очереди.
index++;
if (index==TaskQueueSize+1) // Если очередь переполнена то выходим
{
if (nointerrupted) Enable_Interrupt // Если мы не в прерывании, то разрешаем прерывания
return; // Раньше функция возвращала код ошибки - очередь переполнена..
}
}
// Если нашли свободное место, то
TaskQueue[index] = TS; // Записываем в очередь задачу
if (nointerrupted) Enable_Interrupt // И включаем прерывания если не в обработчике прерывания.
}
//Функция установки задачи по таймеру. Передаваемые параметры - указатель на функцию,

```

```

// Время выдержки в тиках системного таймера. Возвращет код ошибки.
void SetTimerTask(TPTR TS, u16 NewTime)
{
u08 index=0;
u08 nointerrupted = 0;
if (STATUS_REG & (1<<Interrupt_Flag)) // Проверка запрета прерывания, аналогично функции
выше
{
Disable_Interrupt
nointerrupted = 1;
}
for(index=0;index!=MainTimerQueueSize+1;++index) //Просматриваем очередь таймеров
{
if(MainTimer[index].GoToTask == TS) // Если уже есть запись с таким адресом
{
MainTimer[index].Time = NewTime; // Перезаписываем ей выдержку
if (nointerrupted) Enable_Interrupt // Разрешаем прерывания если не были запрещены.
return; // Выходим.
}
}
for(index=0;index!=MainTimerQueueSize+1;++index) // Если не находим похожий таймер, то
ищем любой пустой
{
if (MainTimer[index].GoToTask == Idle)
{
MainTimer[index].GoToTask = TS; // Заполняем поле перехода задачи
MainTimer[index].Time = NewTime; // И поле выдержки времени
if (nointerrupted) Enable_Interrupt // Разрешаем прерывания
return; // Выход.
}
}
}
}

```

```

/*=====
=====

Диспетчер задач ОС. Выбирает из очереди задачи и отправляет на выполнение.

*/

inline void TaskManager(void)
{
    u08 index=0;

    TPTR GoToTask = Idle; // Инициализируем переменные
    Disable_Interrupt // Запрещаем прерывания!!!

    GoToTask = TaskQueue[0]; // Берем первое значение из очереди
    if (GoToTask==Idle) // Если там пусто
    {
        Enable_Interrupt // Разрешаем прерывания
        (Idle()); // Переходим на обработку пустого цикла
    }
    else
    {
        for(index=0;index!=TaskQueueSize;index++) // В противном случае сдвигаем всю очередь
        {
            TaskQueue[index]=TaskQueue[index+1];
        }

        TaskQueue[TaskQueueSize]= Idle; // В последнюю вставляем процедуру выполняющуюся в кон-
це очереди задач

        Enable_Interrupt // Разрешаем прерывания
        (GoToTask()); // Переходим к задаче
    }
}

/*

Служба таймеров ядра. Должна вызываться из прерывания раз в 1мс. Хотя время можно варьи-
ровать в зависимости от задачи

То DO: Привести к возможности загружать произвольную очередь таймеров. Тогда можно бу-
дет создавать их целое множество.

```



А также использовать эту функцию произвольным образом.

В этом случае не забыть добавить проверку прерывания.

\*/

```
inline void TimerService(void)
```

```
{
```

```
u08 index;
```

```
for(index=0;index!=MainTimerQueueSize+1;index++) // Просматриваем очередь таймеров
```

```
{
```

```
if(MainTimer[index].GoToTask == Idle) continue; // Если нашли пустышку - щелкаем  
следующую итерацию
```

```
if(MainTimer[index].Time !=1) // Если таймер не выщелкал, то щелкаем еще раз.
```

```
{ // To Do: Вычислить по тактам, что лучше !=1 или !=0.
```

```
MainTimer[index].Time --; // Уменьшаем число в ячейке если не конец.
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
SetTask(MainTimer[index].GoToTask); // Устанавливаем в очередь задачу
```

```
MainTimer[index].GoToTask = Idle; // А в ячейку пишем процедуру выполняющуюся в конце  
очереди задач.
```

## Приложение Г

### Акт о внедрении результатов диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью  
«Газпром трансгаз Екатеринбург»  
(ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»)

Филиал

Оренбургское линейное производственное  
управление магистральных газопроводов  
(Оренбургское ЛПУМГ)

с. Черноречье, Оренбургский р-н,  
Оренбургская область, Российская Федерация, 460539  
тел.: +7 (3532) 91-44-08, факс: +7 (3532) 91-44-10  
e-mail: 19@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

ОКПО 46737036, ОГРН 1026604947852, ИНН 6608007434, КПП 563802001

22.06.2022 № 19-02.05/11-21

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

#### результатов диссертационной работы В.В. Крюкова

Результаты диссертационной работы Крюкова Владимира Викторовича «Автоматизированная система управления узлами редуцирования газа магистральных газопроводов с применением аппарата нечеткой логики» (научный руководитель, к.т.н. В.В. Тугов) по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) представленные:

алгоритмом управления регулирующим клапаном с применением аппарата нечеткой логики;

программным обеспечением нечеткого супервизорного ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов на языке Си;

регулятором на базе микроконтроллера AVR ATmega32 интегрированным в комплекс СЛТМ Магистраль-2 и SCADA-модуль «Zond 2006»;

внедряются в процесс управления узлами редуцирования газа магистральных газопроводов Оренбургского ЛПУМГ в части разработанной авторами автоматизированной системы управления с применением аппарата нечеткой логики, способствующей повышению качества и снижению потерь от погрешностей.

Начальник управления

С.Е. Полев

