

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Казахстанский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

УДК 004.896

На правах рукописи

**САМИГУЛИН ТИМУР ИЛЬДУСОВИЧ**

**Разработка Smart-технологии для систем управления сложными  
объектами на основе подходов искусственного интеллекта**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научный консультант  
кандидат технических наук,  
ассоц. профессор  
Ширяева О.И.

Зарубежный научный консультант  
PhD, Professor  
Aleksander Sladkowski

Республика Казахстан  
Алматы, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ .....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	14
1.1 Развитие искусственного интеллекта в сфере автоматизации технологических процессов.....	14
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ ГАЗА В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ КАК СЛОЖНЫЙ ОБЪЕКТ.....	25
2.1 Технология обработки природного газа в дистилляционных колоннах в нефтегазовой отрасли.....	25
2.2 Математическая модель динамической системы управления процессами дистилляционной колонны.....	29
2.3 Выводы по второму разделу.....	33
3 ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ.....	34
3.1 Разработка развязывающего управления для МПМО-объекта ДК.....	34
3.2 Разработка модифицированных критериев для управления дистилляционной колонной.....	35
3.3 Биоинспирированные алгоритмы оптимизации.....	37
3.3.1 Алгоритм оптимизации колонии муравьев.....	37
3.3.2 Алгоритм поиска кукушки.....	38
3.3.3 Алгоритм оптимизации стрекозы.....	40
3.3.4 Алгоритм оптимизации серого волка.....	42
3.3.5 Генетический алгоритм оптимизации.....	44
3.3.6 Алгоритм оптимизации искусственных иммунных систем на базе клональной селекции.....	46
3.4 Выводы по третьему разделу.....	47
4 СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ SMART УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ ГАЗА В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ.....	49
4.1 Разработка модели системы управления дистилляционной колонной в Simulink.....	49
4.2 Выводы по четвёртому разделу.....	55
5 РАЗРАБОТКА SMART-СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ФИРМЫ HONEYWELL.....	56
5.1 Архитектура SMART-системы на базе оборудования Honeywell. Программное обеспечение Experion Process Knowledge System.....	56
5.2 Разработка оптической SMART-технологии дистанционного обучения распределённой системы управления Experion PKS и когнитивных мнемосхем.....	59

5.3 Создание технологии персонализированных когнитивных мнемосхем адаптивных под психофизические особенности оператора.....	63
5.3.1 Обычная мнемосхема технологического процесса ДК.....	63
5.3.2 Высокоэффективных мнемосхема технологического процесса ДК...	64
5.3.3 Когнитивная мнемосхема технологического процесса ДК.....	65
5.4 Разработка программного обеспечения для настройки регуляторов на базе алгоритма АСО.....	72
5.4.1 Инструкция по запуску программного обеспечения «АССО (Ant Colony for complex object)».....	75
5.5 Разработка цифрового двойника дистилляционной колонны в программном обеспечении «Honeywell Unisim Design».....	76
5.5.1 Модель дистилляционной колонны в установившемся состоянии...	78
5.5.2 Модель дистилляционной колонны в динамическом режиме.....	83
5.6 Выводы по пятому разделу.....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.....	90
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ З.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	115

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В диссертационной работе были использованы следующие стандарты:

1. МОН РК ВАК №377-3ж «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата».
2. СТ КазНИТУ-09-2017 «Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала».
3. СТ РК 2957-2017 «Фракция изобутановая. Технические условия».
4. ANSI/ISA-101.01-2015 «Human Machine Interfaces for Process Automation Systems».
5. ISO 10628-1-2014 «Diagrams for the chemical and petrochemical industry».
6. ISO 14617-5-2002 «Graphical symbols for diagrams».

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертационной работе используются следующие термины и определения:

SMART система	– система умного производства, подразумевающая по имеющейся информации об объекте управления установить конкретные цели управления, определить сроки реализации и наличие необходимого количества ресурсов
MIMO система	– система, содержащая множество входных и множество выходных переменных, включающая в себя перекрёстные взаимосвязи
SISO система	- система, содержащая одну входную и одну выходную переменную
Decoupling Control	– тип развязывающего управления, предназначенный для уменьшения влияния взаимосвязей на основные каналы многомерной и многосвязной системы управления.
Ребойлер (испаритель)	– теплообменный аппарат, предназначенный для образования пара в нижней части колонны.
Конденсатор (холодильник)	– теплообменный аппарат, предназначенный для конденсирования материального потока с верхней части дистиляционной колонны.
Тарелка	– устройство, предназначенное для выполнения массообменного процесса, расположенное внутри дистиляционной колонны.
HMI интерфейс	– human-machine interface, графическое представление технологического процесса в виде мнемосхем и операторских экранов
SCADA система	– система супервизорного управления, предназначенная для обеспечения в режиме реального времени процессов сбора, обработки, передачи, архивирования, визуализации информации по системе управления технологическим объектом.
DCS система	– распределённая система управления, которая в отличие от супервизорной системы имеет децентрализованную архитектуру сбора и обработки данных с предприятия.
Experion PKS	– распределённая система управления от компании Honeywell Process Knowledge System, чаще всего применяющаяся в нефтегазовой и энергетической отраслях.

Флегмовое число  
(reflux ratio)

- отношение количества жидкости, исходящей из конденсатора обратно в аппарат колонны, к количеству дистиллята, выходящего из процесса очистки.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДК	– дистилляционная колонна
ИИ	– искусственный интеллект
ИС	– интеллектуальная система
ПЛК	– программируемый логический контроллер
ПО	– программное обеспечение
ABC (Artificial bee colony)	– алгоритм пчелиной колонии
ACO (Ant colony algorithm)	– алгоритм оптимизации колонии муравьев
AFPID (Adaptive fuzzy proportional-integral-derivative)	– адаптивный нечеткий пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
AIS (Artificial immune systems)	– искусственные иммунные системы (ИИС)
ANFIS-IACO (Adaptive neuro-fuzzy inference system- improved ant colony)	– адаптивный нейро-нечёткий алгоритм оптимизации с улучшенным алгоритмом колонии муравьев
ANN (Artificial neural networks)	– искусственные нейронные сети
AVC (Active voltage correction)	– коррекция активного напряжения
AVR (Active voltage regulator)	– регулятор активного напряжения
BBO (Biogeography-based optimization)	– алгоритм оптимизации биогеографии
BFO (Bacterial foraging optimization)	– метод имитации поведения бактерий
BP-GA (Bin packing – genetic algorithm)	- алгоритм упаковки в контейнер на базе генетического алгоритма
CC (Coevolutionary algorithm)	– коэволюционный алгоритм
CPS (Cyber physic systems)	– кибер-физические системы
CS (Cuckoo search)	– алгоритм поиска кукушки
CS-PSO (Chaos search –particle swarm optimization)	– модифицированный алгоритм поиска хаоса и оптимизации роя частиц
CSA (Clonal selection algorithm)	- алгоритм клональной селекции
DA (Dragonfly algorithm)	– алгоритм стрекозы
DE (Differential evolution)	– алгоритм дифференциальной эволюции
DT (Digital twin)	– цифровой двойник предприятия
EGWO (Enhanced grey wolf optimizer)	– расширенный алгоритм оптимизации серого волка
ES (Evolution strategies)	– алгоритм эволюционных стратегий
FA (Firefly algorithm)	– алгоритм светлячка
FACTS (Flexible alternating current transmission systems)	– гибкие системы передачи переменного тока
FGA (Fuzzy genetic algorithm)	– нечеткий генетический алгоритм
FSS (Fish school search)	– алгоритм оптимизации, основанный на поведении косяка рыб
GA (Genetic algorithm)	– генетический алгоритм (ГА)
GP (Genetic programming)	– генетическое программирование
GSO (Group search optimizer)	– алгоритм оптимизации группового поиска

GWO (Grey wolf optimizer)	– алгоритм оптимизации серого волка
HMI (Human machine interface)	– человеко-машинный интерфейс
HUAV (Hovering autonomous underwater vehicle)	– беспилотный подводный аппарат
IAE (Integral absolute error)	– интегральная абсолютная ошибка
IAI (Industrial artificial intelligence)	– промышленный искусственный интеллект
IBDA (Industrial big data analysis)	– промышленный анализ больших данных
IIoT (Industrial internet of things)	– промышленный интернет вещей
IOSO (Indirect optimization on the basis of self-organization)	– алгоритм косвенной оптимизации на основе самоорганизации
ISE (Integral square error)	– интегральная квадратичная ошибка
ITAE (Integral time absolute error)	– интегральная по времени абсолютная ошибка
ITSE (Integral time square error)	– интегральная по времени квадратичная ошибка
IWO (Invasive weed optimization)	– алгоритм сорняковой оптимизации
LQR (Linear-quadratic regulator)	– линейно квадратичный регулятор
MFA (Model-free adaptive controller)	– безмодельный адаптивный контроллер
NSGA2 (Non-dominated sorting genetic algorithm 2)	– генетический алгоритм недоминантной сортировки 2
P-ACO (Population-based ant colony optimization)	– алгоритм колонии муравьев на базе популяции
PFA (Paddy field algorithm)	– алгоритм рисового поля
PSO (Particle swarm optimization)	– оптимизация роя частиц
RMSE (Root mean square error)	– среднеквадратическая ошибка
SCADA (Supervisory control and data acquisition)	– система супервизорного управления и сбора данных
SFLA (Shuffled frog leaping algorithm)	– алгоритм прыжка лягушки
SFS (Stochastic fractal search)	– алгоритм стохастического фрактального поиска
SGWO (Simplified grey wolf optimizer)	– упрощенный алгоритм оптимизации серого волка
SM (Smart manufacturing)	– умное производство
SPEA (Strength pareto evolutionary algorithm)	– эволюционный алгоритм Парето
TEO (Thermal exchange optimization)	– алгоритм оптимизации теплообмена
UPMR (Unrelated parallel machine scheduling with additional resource)	- несвязное параллельное машинное планирование с дополнительными ресурсами
UPQC (Unified power quality conditioner)	- унифицированный прибор показателя качества электроэнергии

VEGA (Vector evaluated genetic algorithm)	– генетический алгоритм с векторной оценкой
WCA (Water cycle algorithm)	– алгоритм водного цикла
WOA (Whale optimization algorithm)	– алгоритм оптимизации кита
WSA (Wolf search algorithm)	– алгоритм поиска волка

## ВВЕДЕНИЕ

**Оценка современного состояния решаемой научно-технической задачи и актуальность темы исследования.** В связи с ростом новых информационных технологий в настоящее время наблюдается значительный прогресс в сфере создания современных систем управления с помощью достижений в области искусственного интеллекта. Крупнейшие компании производители высокоэффективных систем управления, такие как Honeywell, Schneider Electric, Siemens, Yokogawa, Emerson, Allen-Bradley вкладывают денежные средства в развитие технологий умного производства, промышленного искусственного интеллекта, моделирование цифровых двойников предприятий и внедрение систем анализа больших данных. Введение в мире концепции четвертой промышленной революции или «Индустрия 4.0» подразумевает создание высокоэффективного, экологичного, гибкого и безопасного производства, которое ориентировано на цифровизацию современных средств управления с возможностью анализа потребительского поведения. Рост вычислительных мощностей персональных компьютеров и промышленных контроллеров позволяет решать сложные задачи управления производством, в которых необходимо учитывать большое количество параметров и ограничений, при этом позволяя менять стратегии управления в режиме реального времени. Современные системы моделирования технологических процессов дают возможность выполнять эксперименты на цифровых двойниках предприятия, исследовать и разрабатывать контуры управления в зависимости от текущего состояния технологического объекта и внедрять корректировки в системы супервизорного управления. В это же время аппаратная часть характеризуется высокой отказоустойчивостью, путём внедрения дополнительных каналов передачи данных, резервированных контроллеров и элементов управления. Гибкость такого оборудования заключается в возможности миграции в режиме реального времени программного обеспечения и масштабирования в случае увеличения объемов производства. Системы управления все чаще представляются с распределенной архитектурой, в которых каждый кластер работает независимо от центрального сервера управления.

Промышленный искусственный интеллект получил широкое применение в аэрокосмической, металлургической, химической, нефтегазовой и др. отраслях производства. Методы ИИ позволяют выполнять оптимизационные расчёты в случаях неполноты информации об объекте управления, успешно могут применяться для расчётов в многомерных и многосвязных объектах управления с большим количеством входных и выходных переменных процесса.

### **Основание и исходные данные для разработки темы.**

Основанием для научных исследований является выписка из протокола заседания кафедры «Автоматизация и управление» Института автоматики и информационных технологий КазНИТУ им. Сатпаева №1195-д от 29 сентября 2018 года, в которой утверждена тема докторской диссертации PhD, научных и зарубежный руководитель для специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление». Исходными данными для проведения научно-исследовательской

работы послужили научные публикации и монографии по проекту КН МОН РК №АР05130018 на тему «Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта» (2018-2020 гг), учебные материалы с тренинг-центра «Honeywell Automation College Amsterdam», технические регламенты с ТОО «Ханиуэлл – Автоматические системы управления».

**Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы.** Внедрение методов ИИ в промышленное производство сопряжено с рядом трудностей при вводе в эксплуатацию в реальное промышленное производство:

а) большинство работ по применению метаэвристических алгоритмов направлены на исследование SISO-систем, тогда как для МИМО-систем, с учётом влияния взаимосвязей проводится достаточно мало исследований;

б) используемые метаэвристические алгоритмы должны обладать следующими свойствами: простотой реализации; минимальными требованиями к вычислительным ресурсам; способностью обработки данных в реальном времени; низкими требованиями к памяти устройств.

Таким образом, существует необходимость в разработке технологии для внедрения методов ИИ при решении задач управления сложными МИМО-объектами в современные системы управления, например в PCY Honeywell Experion PKS.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, патентных исследованиях и выводы из них.** Моделирование процесса очистки газа в дистилляционной колонне и расчёт интеллектуальных регуляторов выполнен в пакете прикладных программ Mathwork MATLAB. Расчёт дистилляционной колонны и динамическое моделирование для проверки результатов выполнено в программном обеспечении Honeywell Unisim Design R470, включающий в себя библиотеку Peng Robinson. Разработка системы управления на базе контроллеров Honeywell C300 выполнено в продукте Honeywell Experion PKS R501 с использованием инструментов HMIWeb Display Builder для создания когнитивных мнемосхем, Configuration Studio для конфигурации оборудования сервера, Control Builder для разработки стратегий управления промышленным контроллером, Enterprise Model Builder для разработки модели предприятия, Quick Builder для настройки станции управления. Получены следующие авторские свидетельства: 1) авторское свидетельство №836 на программу для ЭВМ «АССО (Ant Colony for complex object)»; 2) авторское свидетельство №11354 на программу для ЭВМ «Реализация SMART-технологии построения системы управления для технологических процессов нефтегазовой отрасли».

**Актуальность темы диссертационного исследования.**

Внедрение технологий умного производства позволяют увеличить доходность предприятий, путем внедрения методов искусственного интеллекта в системы автоматического управления, увеличить безопасность и экологичность предприятий. Согласно исследованиям консорциума ASM по учёту внештатных ситуаций на производстве, экономика США каждый год

теряет более чем 20 миллиардов долларов из-за аварий на производстве, что равняется от 3 до 8% потерь промышленного потенциала. При этом говорится, что от 20 до 25% всех потерь можно избежать путем внедрения систем правильного управления сигнализациями и внедрению высокоэффективных дисплеев на производстве, для лучшей осведомленности персонала о ситуации на промышленном предприятии.

**Научная новизна темы исследования.** Диссертационная работа посвящена разработке интеллектуальной системы управления сложным промышленным объектом дистилляционной колонной на основе метаэвристических алгоритмов с целью внедрения в распределённую систему управления Honeywell, где используются классические ПИД-регуляторы.

Экспериментальные исследования и результаты моделирования получены на примере реального сложного промышленного объекта нефтегазовой отрасли - дистилляционной колонны.

Научной новизной проводимых исследований являются:

- Разработка модифицированных критериев качества для сложной ММО-системы управления реальным промышленным объектом дистилляционной колонной;

- Настройка параметров ПИ-регуляторов сложной ММО-системы с учётом предложенных модифицированных критериев качества на основе метаэвристических алгоритмов искусственного интеллекта.

- Внедрение полученных результатов в распределённую систему управления Experion PKS фирмы Honeywell.

- Разработка когнитивных НМИ-интерфейсов для операторов и инженеров станций распределенной системы управления с учётом психофизических особенностей человека.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Научно-исследовательская работа связана с ранее выполненными исследованиями по проекту грантового финансирования КН МОН РК №AP05130018 на тему «Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта» (2018-2020 гг).

**Цель работы** заключается в разработке инновационной Smart-технологии для системы управления сложным объектом нефтегазовой отрасли на основе подходов искусственного интеллекта, таких как: алгоритм колонии муравьёв (ACO), алгоритм стрекозы (DA), алгоритм оптимизации серого волка (GWO), алгоритма поиска кукушки (CS), генетического алгоритма (GA) и алгоритма искусственным иммунных систем на базе клональной селекции (CLONALG), а так же её реализация для распределенной системы управления Honeywell Experion PKS.

Решение поставленной цели достигается с помощью выполнения следующих задач, где необходимо:

1. Произвести анализ состояния и перспективы развития искусственного интеллекта в современном промышленном производстве.

2. Обосновать структуру SMART-системы управления.

3. Выполнить построение модели дистилляционной колонны и произвести операцию развязки для уменьшения влияния взаимосвязей многомерного и многосвязного технологического объекта.

4. Разработать модифицированные критерии качества для сложного объекта управления с целью обеспечения точности регулирования и стабильности переходных процессов.

5. Разработать программу для расчёта интеллектуальных ПИ регуляторов, включающая связь оптимизационных алгоритмов искусственного интеллекта, модифицированных критериев качества сложного объекта управления и модели процесса очистки газа с учётом матрицы развязки.

6. Выполнить сравнительный анализ рассчитанных регуляторов с помощью алгоритмов оптимизации ACO, GWO, DA, CS, GA, CLONALG для разработанных модифицированных критериев качества и выбрать наиболее подходящий вариант. Произвести расчёт дистилляционной колонны в программном продукте Unisim Design и выполнить динамическое моделирование колонны с учётом рассчитанных интеллектуальных ПИ-регуляторов. Обобщить результаты исследования.

7. Разработать стратегию управления процессом очистки газа с помощью ПИ-регуляторов в распределенной системе управления Experion PKS. Разработать когнитивные мнемосхемы для управления процессом очистки газа операторами или инженерами промышленного предприятия с учётом психофизических особенностей человека.

**Объект исследования.** Рассматривается процесс очистки газа в дистилляционной колонне на предприятии нефтегазовой отрасли.

**Предмет исследования.** Методы и алгоритмы интеллектуального управления многомерными и многосвязными технологическими объектами.

**Задачи исследований, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом.** Задача исследования заключается в реализации современных методов, подходов и алгоритмов ИИ, научные результаты которых успешно внедряются в реальное промышленное производство с целью реализации управления сложными технологическими объектами, характеризующимися многомерной и многосвязной структурой.

**Методологическая база исследований.** Исследовательская работа выполнялась путем выполнения практических исследований с учетом теоретических материалов. В ходе выполнения экспериментов рассматривались биоинспирированные алгоритмы искусственного интеллекта, такие как: алгоритм колонии муравьев; генетический алгоритм; алгоритм поиска кукушки; алгоритм стрекозы; алгоритм оптимизации серого волка; алгоритм искусственных иммунных систем на базе клональной селекции. Для реализации управления сложным объектом использовался метод развязывающего управления для многомерных и многосвязных процессов.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту докторской диссертации автором выносятся следующие положения:

1) Модель развязывающего управления для процесса очистки газа, реализованная в программном продукте MATLAB Simulink.

2) Разработанные модифицированные критерии качества ISE\_M, ITSE\_M, IAE\_M для управления многомерным процессом очистки газа в дистилляционной колонне.

3) Разработанная структура SMART-системы управления процессом очистки газа.

4) Алгоритм для расчёта коэффициентов ПИ-регуляторов с учетом модифицированных критериев качества с использованием алгоритмов ИИ. Расчёты и анализ регуляторов, выполненных с помощью алгоритмов искусственного интеллекта.

5) Динамическая модель и модель в устойчивом состоянии, с интеллектуальными регуляторами, реализованная в программном обеспечении Honeywell Unisim Design.

6) Разработанная стратегия управления для контроллера Honeywell Series C C300, модель предприятия с программно-аппаратной реализацией, когнитивные НМИ-мнемосхемы для управления объектом - дистилляционной колонны.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа «Разработка Smart-технологии для систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта» состоит из введения, пяти основных разделов, заключения, списка используемой литературы из 107 источников и 8 приложений. Работа содержит 118 страниц, 49 рисунков и 9 таблиц.

# **1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

Раздел посвящён обзору современных достижений в области управления промышленными технологическими процессами (на примере нефтегазовой отрасли) с применением методов искусственного интеллекта (ИИ). В настоящее время современные компании, лидирующие в области создания высокоэффективных распределённых и супервизорных систем управления сложными технологическими процессами, разрабатывают Smart-системы управления на базе искусственного интеллекта и успешно внедряют их в производство. Предлагается обзор современных разработок в области интеллектуальных систем управления за период 2017-2021 гг. построенных на основе метаэвристических алгоритмов искусственного интеллекта в промышленности.

## **1.1 Развитие искусственного интеллекта в сфере автоматизации технологических процессов**

Мировые тенденции в сфере разработок высокоэффективных распределённых систем управления направлены на внедрение современных достижений в области искусственного интеллекта в системы управления сложным промышленным производством, и получили название «Industrial Artificial Intelligence» (IAI). Задача данного направления заключается в применении интеллектуальных алгоритмов управления для технологических процессов с обеспечением заданного уровня производительности, экономической эффективности и устойчивости системы.

В настоящее время можно выделить следующие перспективные направления: разработка технологий умного производства (Smart Manufacturing, SM), применение алгоритмов анализа больших данных в промышленности (Industrial Big Data Analysis, IBDA), разработка цифровых двойников предприятий (Digital Twin, DT), применение технологий промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT), а также облачных вычислений (Cloud Computing, CC) [1]. Промышленный искусственный интеллект повсеместно внедряется в различные сферы человеческой жизнедеятельности, такие как – системы промышленной автоматизации нефтегазовой отрасли, химической, аэрокосмической промышленности, металлургии и т.д. Если рассматривать нефтегазовый сектор, где один день простоя производства ведёт к многомиллионным убыткам, использование ИИ имеет огромную экономическую значимость.

В соответствии с программой промышленной революции «Индустрия 4.0» происходит оцифровывание технологических процессов, автоматизация и роботизация систем управления с помощью искусственного интеллекта, где человек осуществляет функцию надзора над автономным производством [2]. Smart-система построенная в соответствии с концепцией «Индустрия 4.0» [3]

должна выполнять функции интеллектуального мониторинга предприятия, управления, планирования и логистики производства, начиная от процесса сбора данных с датчиков, заканчивая составлением расписаний рабочих смен и выдачей отчётов. Так, например, в работе [4] рассматривается Smart-система разработки нефтяных месторождений для обеспечения высокоэффективного и экологичного процесса добычи нефти путем цифровизации и интеллектуализации систем управления. Внедрение интеллектуальных Smart-систем управления позволяет реализовывать высокотехнологическое, надёжное, безопасное и экономически эффективное производство. При этом интеллектуальные системы управления реализуются как для непрерывного, так и для дискретного производства [5]. В умном производстве необходима разработка виртуального двойника предприятия, который способен выполнять функции анализа производственных данных, прогнозирования, а также коррекции управляющих воздействий над технологическими процессами в зависимости от состояния системы, тем самым повышая уровень производительности и эффективности [2].

В исследовании [6] цифровое производство представляется в виде киберфизической системы (CPS), состоящей из 5 уровней. Первый уровень отвечает за сбор данных с технологического объекта с помощью программируемых логических контроллеров и контрольно-измерительных приборов. На втором уровне производится обработка данных и выделение важной информации. Третий уровень посвящён передаче информации на программное обеспечение (ПО) распределённых и супервизорных систем (SCADA) для выявления нежелательных отклонений переменных процесса (например: температура, давление, скорость потока и т.д.), предаварийных ситуаций для принятия управляющих воздействий с целью предотвращения аварий. На четвёртом уровне создается человеко-машинный интерфейс (Human Machine Interface, HMI) для упрощённого взаимодействия инженера с оборудованием. На пятом уровне осуществляется самоконфигурация системы при изменении внешней среды.

Достоинствами методов искусственного интеллекта являются точность вычислений при решении сложных оптимизационных задач, высокая производительность и быстрое действие. Интеллектуальные системы (ИС) позволяют синтезировать цели управления, принимать решения, обеспечивать выполнение последовательности действий для достижения результата, выполнять функцию прогнозирования результатов в сопоставлении с реальными значениями параметров, создавать контур обратной связи и выполнять функцию управления или корректировки цели [7]. Для реализации задач интеллектуального управления часто используются биоинспирированные подходы, полученные путём научного познания и изучения процессов, происходящих в живой природе (например, передвижение колонии муравьёв от гнезда до источника пищи, реакция иммунитета организма на чужеродный антиген и т.д.). Особенностью таких биологических процессов является то, что они представляют собой надёжные и устойчивые системы, адаптирующиеся к изменениям окружающей среды [8].

Широко применяются метаэвристические подходы для решения сложных оптимизационных задач, на основе биоинспирированных алгоритмов ИИ, таких как: алгоритмы роевого интеллекта, эволюционные алгоритмы, экологические алгоритмы, мультиагентные алгоритмы и другие. В настоящее время количество статей, посвященных данной теме, увеличивается с каждым годом, тем самым подтверждая перспективность данного направления исследований.

На рисунке 1.1 представлена классификация метаэвристических подходов ИИ и их наиболее распространённые биоинспирированные алгоритмы [9-11]:

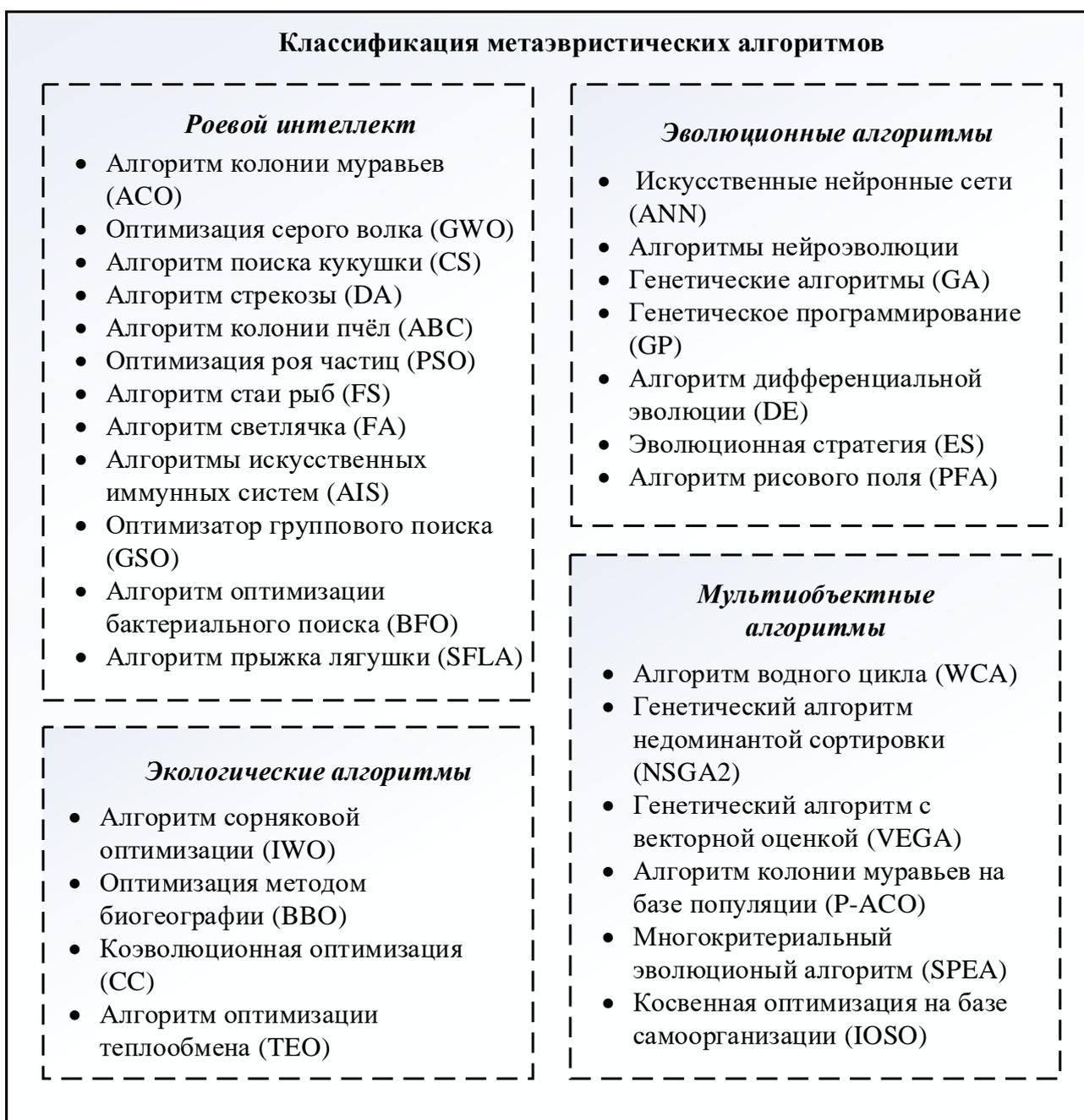


Рисунок 1.1 – Классификация метаэвристических алгоритмов ИИ

Алгоритмы, разработанные на базе поведения колонии муравьев (Ant Colony Optimization, ACO), часто применяются для решения задач управления.

Так, например, в научном труде [12] разработан нелинейный ПИД-регулятор на базе алгоритма АСО для оптимального управления вибрационными приводами микро-робота. Экспериментальные исследования показали преимущества нового регулятора в задаче достижения желаемого угла поворота объекта управления под действием внешних возмущений. В статье [13] сравнивается производительность ПИД-регуляторов тепловой системы различных конфигураций, рассчитанных с помощью алгоритма АСО для классических целевых функций: Integral Square Error (ISE), Integral Absolute Error (IAE), Integral Time Square Error (ITSE) и Integral Time Absolute Error (ITAE). В работе экспериментально доказано преимущество расчётов алгоритма ИИ для ITSE критерия, которое обеспечивает желаемый отклик системы и минимальное значение перерегулирования для простых и сложных конфигураций системы. Для решения проблемы уменьшения вибраций опор ветряной турбины в работе [14] метод оптимизации муравьиных колоний используется при проектировании оптимальных ПИД-регуляторов системы активного контроля вибраций ветрогенераторов. В зависимости от типа возмущений, предлагаемый метод управления уменьшает смещение башни ветрогенератора до 98% в сравнении с классическим методом Зиглера-Никольса, что позволяет повысить надёжность и долговечность установки. В исследовании [15] разработан адаптивный нечёткий регулятор (Adaptive neuro-fuzzy inference system- improved ant colony, ANFIS-IACO) на основе улучшенного алгоритма оптимизации колонии муравьёв для системы управления нелинейной траекторией движения беспилотного летательного аппарата. Модификация с помощью АСО позволяет уменьшить ошибку (Root Mean Square Error, RMSE) и увеличить сходимость нейронечёткого регулятора. Статья [16] посвящена актуальной задаче планирования оптимальных маршрутов для крупных транспортных систем на базе методов PSO и АСО, которые применяются для оптимизации рейсов грузового транспорта от склада готовой продукции до клиентов, в зависимости от спроса покупателей, расстояния и максимальной грузоподъёмности. Предложенный гибридный метод более эффективен в сравнении с классическим АСО и показывает лучшую скорость сходимости. Технология АСО также применяется для анализа больших данных в качестве рабочего инструмента, выполняющего процедуру классификации. В исследовании [17] представлен модифицированный алгоритм Ant-Miner PAE, который повышает скорость сходимости и уменьшает вероятность нахождения локального решения. Проведённые эксперименты над двенадцатью наборами данных показали, что предложенный улучшенный алгоритм имеет наибольшую среднюю точность прогноза в сравнении с алгоритмами CN2, Ant-Miner, PSO-ACO2, C4.5 и др. В статье [18] рассматривается задача минимизации затрат при бурении нефтяной скважины. Алгоритмы GA, АСО, ABC и PSO успешно применяются при проектировании конструкции скважины, продемонстрировав заданную точность вычислений.

Алгоритм оптимизации серого волка (Grey Wolf Optimizer, GWO) получил широкое распространение в решении оптимизационных задач за счёт простоты реализации, гибкости и малого количества настраиваемых параметров. В труде

[19] для реализации системы управления выработкой электричества на распределённой электростанции применяется упрощённый алгоритм серого волка (Simplified Grey Wolf Optimizer, SGWO) для настройки параметров адаптивного нечёткого регулятора (Adaptive Fuzzy Proportional Integral Derivative, AFPID). Результаты моделирования системы показывают преимущество разработанного контроллера в сравнении с классическим ПИД-регулятором. В работе [20] регулирование частотой вращения двигателя постоянного тока осуществляется на основе подхода GWO. Данный алгоритм используется для поиска оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка, где в отличие от классического ПИД-регулятора необходимо настраивать пять параметров. В сравнении с алгоритмами IWO, PSO и Stochastic Fractal Search (SFS) для целевой функции ITAE, регулятор, настроенный с помощью алгоритма оптимизации серого волка, имеет меньшее время регулирования, время нарастания переходного процесса и перерегулирование. Аналогично этому исследованию, статья [21] посвящена применению метода GWO для корректировки коэффициентов ПИД-регулятора бесщёточного двигателя постоянного тока и подтверждает перспективность применения данного метода. Для управления роботом-манипулятором с двумя степенями свободы в работе [22] рассматривается расширенный алгоритм оптимизации серого волка (Enhanced Grey Wolf Optimizer, EGWO). Новая стратегия позволяет эффективнее отслеживать траектории движения робота, описываемые нелинейными и сложными дифференциальными уравнениями, при этом оптимальное решение находится быстрее, в сравнении с классическим алгоритмом GWO.

Алгоритм GWO также применяется и для решения задач прогнозирования. Так, например, в исследовании [23] разработана искусственная нейронная сеть, где для обучения модели используется алгоритм оптимизации серого волка. Новый подход используется для прогнозирования количества выбросов углекислого газа в атмосферу. В сравнении с алгоритмом обучения обратного распространения ошибки, ANN-GWO показал на 32,23% меньшую среднюю относительную погрешность. С помощью модифицированного метода GWO [24] решается обратная задача кинематики робота-манипулятора, в которой может образоваться кинематическая неопределённость состояния и расчёты усложняются с увеличением числа степеней свободы. В сравнении с классическим методом оптимизации, новый подход показал лучшую скорость сходимости. В исследовании [25] предлагается использование улучшенного алгоритма GWO для эффективного управления выработкой электроэнергии на каскаде гидроэлектростанций в различные периоды эксплуатации. Управление такой системой является сложной нелинейной задачей оптимизации с большим количеством ограничений, реализация которой с помощью выбранного метода достигает необходимых результатов. В статье [26] с помощью алгоритма GWO реализуется ПИД-контроллер, регулирующий скорость движения автономного подводного аппарата (Hovering Autonomous Underwater Vehicle, HUAV). Моделирование интеллектуальной системы управления осуществлено в пакете прикладных программ MATLAB, где проанализированы такие параметры, как:

время регулирования, суммарная квадратичная ошибка и размер перерегулирования. По результатам исследования подтверждена актуальность использования метода GWO для задачи управления нелинейной системой NUAV за счёт лучшего быстродействия.

Одним из современных биоинспирированных методов искусственного интеллекта является алгоритм поиска кукушки (Cuckoo Search, CS), который основывается на поведении кукушки при откладывании яиц в чужие гнёзда. В настоящее время существует множество модификаций алгоритма CS [27]. Можно выделить такие как: гибридные, адаптивные, дискретные, параллельные, мульти-объектные и т.д., которые широко применяются для решения задач оптимизации. В работе [28] алгоритм CS используется для цифровых изображений, в задачах предварительной обработки, классификации, сжатия и сегментации изображений. Отмечается простота реализации оптимизационного алгоритма и высокое быстродействие. Для настройки ПИД-регулятора системы полуактивной подвески транспортного средства в исследовании [29] предлагается использовать метод CS с целью улучшения динамических характеристик автомобиля. Сравнительный анализ результатов экспериментального моделирования показывает, что значение среднеквадратической ошибки для классического ПИД-регулятора равно 0.3257, в то время как для метода CS составляет 0.2343. Отмечается повышение уровня плавности подвески при движении в результате применения интеллектуального ПИД-регулятора.

Особое место среди биоинспирированных алгоритмов занимают искусственные иммунные системы (Artificial Immune Systems, AIS), которые основаны на иммунологической реакции биологического организма на чужеродные антигены. Алгоритмы AIS широко используются в робототехнике, мехатронике, в промышленной автоматизации при управлении сложными объектами и позволяют решать задачи распознавания образов, поиска оптимального решения, диагностики оборудования, прогнозирования и принятия решений. В исследовании [30] рассматривается интеллектуальный метод управления системой с переменной структурой для отслеживания препятствий колёсным роботом и передвижения через них с учётом влияния внешних факторов. Алгоритм AIS позволяет эффективно управлять системой, находя оптимальное решение в режиме реального времени. В работе [31] для настройки линейного-квадратичного регулятора (Linear-quadratic regulator, LQR) используется алгоритм AIS. Разработана самонастраивающаяся система, которая позволяет изменять конфигурацию LQR-регулятора, в зависимости от состояния объекта управления. Экспериментальные исследования на лабораторном стенде маятника QNET подтверждают эффективность интеллектуального регулятора при решении задачи подавления внешних возмущений для различных режимов работы.

Для диагностики состояния промышленного оборудования в статье [32] разработан новый алгоритм AIS, основанный на оптимизации популяции антител (Antibody population optimization, APO), который уменьшает время обучения системы и позволяет работать при наличии внешних шумов. Данный

подход позволяет обнаруживать дефекты и отклонения при работе центробежных насосов и предотвращает непредвиденные поломки. Исследования [33] посвящены разработке системы диагностики и мониторинга конструкции летательного аппарата (от механических повреждений) на базе алгоритма AIS с негативной селекцией. Сконструирована экспериментальная установка, которая имитирует работу крыла самолёта. Алгоритм AIS используется для определения сигналов повреждений различной степени тяжести и поиска их месторасположения. Наилучшая оценка точности работы алгоритма равна 99.38%, что указывает на эффективность разработанной методики диагностики. В работе [34] предлагается использовать метод AIS для распознавания и блокировки хакерских атак и защиты серверов-хранилищ от Distributed Denial of Service (DDoS) атак, что является актуальной задачей. Произведён сравнительный анализ алгоритма AIS, искусственных нейронных сетей, метода опорных векторов и деревьев решений, где доказывалась эффективность алгоритма AIS в виду высокой точности обнаружения угроз, равной 96.56% и малого количества ложных определений. В исследовании [35] алгоритм AIS на базе клональной селекции используется для расчёта оптимального расположения электростанций с целью равномерного распределения энергоресурсов. Проверка работоспособности алгоритма выполнялась на тестовых системах распределения (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) радиального и кольцевого типов. Результаты экспериментов доказывают эффективность алгоритма AIS для решения данной оптимизационной задачи и уменьшение потерь энергии на линиях электропередачи.

Другим биоинспирированным подходом является алгоритм оптимизации стрекозы (Dragonfly Algorithm, DA), который успешно используется при оптимизации инженерных задач. В работе [36] рассматривается настройка каскадного контура управления частотой энергетической системы с помощью ПИ- и ПД-регуляторов дробного порядка. Целью исследования является разработка закона управления для систем с непрерывными изменениями нагрузки с помощью алгоритма DA и минимизация критерия качества ITAE. Предложенная интеллектуальная система управления имеет такие преимущества, как малое время переходного процесса и отсутствие перепадов мощности в энергосистеме. В исследовании [37] разработан модифицированный алгоритм стрекозы совместно с генетическим алгоритмом для системы управления передачей переменного тока по электросети на базе шин IEEE 33 и 69. В качестве оптимизационных параметров выбраны: стоимость и расположение оборудования (Unified power quality conditioner, UPQC), потери мощности в электросети и стабильность напряжения. Анализ разработанной модели на базе GA-DA показал лучшую скорость конвергенции по сравнению с алгоритмами GWO на 0,42%, ABC на 0.44%, алгоритма оптимизации кита (Whale Optimization Algorithm, WOA) на 0.60%. В работе [38] алгоритм DA применяется для оптимизации распределения нагрузки на серверах для достижения наименьшего энергопотребления вычислительной машины, выполняющих облачные вычисления. Задача алгоритма балансировки заключается в переносе

задач с перегруженной виртуальной машины на другую машину и в распределении инструкций для процессоров, позволяющих увеличить время отклика сервера. По результатам экспериментов предлагаемый интеллектуальный подход на базе ДА имеет лучшую производительность в сравнении с классическими методами динамической балансировки Dynamic Load Balancing (DLB), Histogram-based Dynamic Load Balancing (HDLB) и Honey Bee Behavior Load Balancing (HBB-LB).

Одними из самых распространённых методов ИИ, наравне с искусственными нейронными сетями, являются генетические алгоритмы (Genetic algorithm, GA). Область применения ГА охватывает практически все сферы, начиная от промышленности, инженерии и управления, заканчивая экономикой и финансами. Данные алгоритмы позволяют решать задачи оптимизации, классификации, синтеза интеллектуальных ПИД-контроллеров, выполняют функции обучения для нейронных сетей, составления расписаний и т.д. Например, в железнодорожной промышленности для создания системы интеллектуального управления поездом в работе [39] рассматривается многоцелевая оптимизация с помощью генетического алгоритма. Разработана модель кривой скорости поезда и критерии для оптимального движения, состоящие из: параметра пунктуальности, точности остановки поезда на станции, ограничения скорости на участках маршрута. Выявлено преимущество генетического алгоритма при решении нелинейной задачи оптимизации, что позволяет успешно применять его на практике. Также в нефтегазовой отрасли широко применяются алгоритмы ГА для решения оптимизационных задач. В исследовании [40] для технологического процесса впрыска воды и газа в нефтяной пласт (Water Alternating Gas Injection, WAG) предлагается использовать интеллектуальный подход ГА для нахождения оптимальных режимов работы объекта управления, а именно скорости и времени впрыска воды и газа. Результаты экспериментов доказывают эффективность метода ГА при решении комбинаторных задач оптимизации. В энергетической промышленности для оптимизации процесса обслуживания газотурбинной установки Siemens SGT600 в работе [41] разработана интеллектуальная технология на базе алгоритма ГА, которая позволяет уменьшить время простоя оборудования и минимизировать количество затрат на 80 процентов. В статье [42] рассматривается моделирование асинхронного двигателя, управляющегося с помощью ПИД-регулятора, в ПО Mathwork Matlab (Simulink). Параметры контроллера оптимизированы алгоритмом ГА с целью улучшения скорости отклика системы. В связи с тем, что классический ПИД-регулятор имеет постоянные коэффициенты, не меняющиеся в процессе эксплуатации двигателя (что приводит к ухудшению качества регулирования со временем), актуально использование интеллектуального регулятора, который периодически обновляет коэффициенты регулятора в зависимости от состояния объекта управления.

Увеличение объемов электрификации городского транспорта в городах ведёт к необходимости создания дополнительных станций зарядных устройств для электромобилей. В работе [43] разработано программное обеспечение на базе генетического алгоритма для расчёта оптимального местоположения

зарядных станций в городе Салоники, Греция. По результатам исследования определено 15 оптимальных точек, которые позволят на 80% удовлетворить спрос на электроэнергию для транспортных средств. В исследовании [44] для оптимального проектирования конструкции подвесных мостов, в которых несущие элементы выполнены из стальных кабелей, представлена процедура поиска оптимальной конфигурации кабельной сети с помощью генетического алгоритма, с учётом ограничения на площадь поперечного сечения и силы натяжения. Результаты моделирования успешно используются для предварительного проектирования подвесного моста. В статье [45] рассматривается использование генетического алгоритма с нечёткой логикой (Fuzzy Genetic Algorithm, FGA) для определения рабочих параметров технологического процесса производства пенометалла, отличающегося высокой жесткостью и низкой теплопроводностью, с целью получения продукции желаемого качества. Обоснована практическая значимость алгоритма FGA для моделирования сложных технологических процессов и подчёркивается эффективность метода при наличии неопределенностей в модели. В работе [46] генетический алгоритм не доминирующей сортировки с элитной стратегией (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm With Elite Strategy, NSGAI) предлагается использовать для составления графиков персонала и расписания ротации рабочих мест на предприятиях при выполнении операций с грузами. Рассматривается эргономика рабочих мест, монотонность работы и интервалы между рабочими сменами как факторы, негативно влияющие на здоровье и трудоспособность работников. Модель на базе ГА позволяет уменьшить количество несчастных случаев на производстве, увеличить уровень продуктивности работника и улучшить его психофизическое состояние при монотонной работе. В исследовании [47] ГА применяется как инструмент для поиска оптимальных решений при управлении транспортными потоками во время планирования обратной логистики на предприятиях. Исходными параметрами работы алгоритма являются: количество автомобилей, грузоподъёмность, максимальная скорость движения, стоимость вызова автотранспорта и максимальное количество заявок. Разработанное программное обеспечение подключается к системе облачного производства CM и позволяет наладить сотрудничество между производителями. Полученный интеллектуальный планировщик транспортировки на базе алгоритма ГА повышает эффективность применения транспортных средств и снижает затраты. В статье [48] с помощью гибридного алгоритма ГА решается проблема масштабируемости промышленного производства в зависимости от спроса на продукцию. В качестве объекта исследования рассматривается увеличение производства блока цилиндров на предприятии с 25 тысяч деталей в год до 38 тысяч. Использование интеллектуального подхода ГА позволяет в короткие сроки изменять конфигурацию производственных мощностей с минимальными затрачиваемыми ресурсами. В труде [49] гибридный генетический алгоритм (Bin Packing-Genetic Algorithm, BP-GA) применяется для решения проблемы параллельного несвязного планирования рабочих групп с ограничениями (Unrelated Parallel Machine Scheduling with Additional Resource, UPMR) с целью

уменьшения времени ручного изготовления детали. Дополнительными ограничениями системы являются проблемы замены персонала в рабочих группах с разными специализированными навыками. Для оценки результатов исследования выбраны следующие параметры: время расчёта алгоритма и процент относительного отклонения от оптимального решения. В статье отмечается превосходство алгоритма BP-GA в сравнении с классическим генетическим алгоритмом для систем с большой размерностью. В работе [50] подход искусственных нейронных сетей и генетический алгоритм применяются для определения оптимальных рабочих параметров процесса сварки низколегированной стали марки 15CDV6, таких как: ток, напряжение, расход газа и скорость сварки. Рассчитанные интеллектуальным методом параметры влияют на качество сварного шва, что ведёт к улучшению механических характеристик на растяжение и повышают устойчивость к коррозии. Это позволяет использовать данный способ сварки при конструировании аэрокосмических аппаратов.

В настоящее время широкое распространение получили алгоритмы на базе метода роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). Алгоритм PSO наиболее часто применяется при решении оптимизационных задач, в системах обработки сигналов, робототехнике, фармацевтике, в системах интеллектуального управления производством, а также используется при разработке рабочих расписаний и создании инженерных приложений. В труде [51] рассматривается процесс настройки ПИД-регуляторов с использованием метода роя частиц для двух объектов: системы коррекции активного напряжения (Active Voltage Correction, AVC) и для системы регулирования активного напряжения (Active Voltage Regulator, AVR), которые позволяют обезопасить энергоустановки предприятий от скачков напряжений и аномалий при подаче питания на промышленное оборудование. Сравнительный анализ скорости сходимости алгоритма PSO и ГА при решении поставленной задачи показывает преимущество алгоритма роя частиц. Также подчёркивается достоинство ПИД-регуляторов PSO при оценке переходных характеристик напряжения сети и баланса мощности. Актуальны исследования, посвящённые гибридизации алгоритмов PSO, что позволяет повысить эффективность данных алгоритмов оптимизации. В работе [52] рассматривается модификация алгоритма PSO с алгоритмом дифференциальной эволюции (Differential Evolution, DE), что позволяет увеличить разнообразие решений и исключить вероятность попадания алгоритма в локальный экстремум. В качестве технологического процесса выбрана система биохимической очистки сточных вод. ПИД-регуляторы, настроенные с помощью интеллектуальной оптимизации PSO-DE, показали лучшую производительность в сравнении с алгоритмом PSO. Статья [53] посвящена разработке системы управления двигателем постоянного тока с возбуждением постоянными магнитами с помощью алгоритма PSO. В работе рассчитываются коэффициенты интеллектуального ПИД-регулятора и осуществляются эксперименты над параметрами алгоритма, такими как: изменение количества частиц, итераций и инерционных весов PSO. В результате исследования переходных характеристик работы регулятора получено

перерегулирование процесса менее 2% при приемлемом времени установившегося режима. В исследовании [54] предлагается решение комбинаторной задачи оптимизации (класса Non-deterministic polynomial, NP) на основе алгоритма оптимизации роя хаотических частиц (Chaos Search-Particle Swarm Optimization, CS-PSO). Алгоритм поиска хаоса защищает алгоритм PSO от преждевременной сходимости. Моделирование показывает, что алгоритм CS-PSO находит глобальное решение при наименьшем количестве итераций по сравнению с классическим PSO. В статье [55] рассматривается применение алгоритма PSO в химической промышленности для процесса полимеризации поливинилхлорида (ПВХ), который является нелинейным процессом, характеризующимся большим запаздыванием. При конфигурации параметров адаптивного регулятора (Model-Free Adaptive Controller, MFA) применяется алгоритм PSO для контроля температуры полимеризации. Проведённые эксперименты доказывают высокую эффективность данного алгоритма при управлении химическим процессом. В исследовании [56] решается проблема определения оптимальных параметров системы передачи переменного тока (Flexible AC transmission systems, FACTS) с помощью алгоритма PSO и метода поиска Хука-Дживса (Pattern Search, PS). Предложенный подход позволяет объединить достоинства двух алгоритмов и снизить общую стоимость выработки электроэнергии за счёт уменьшения реактивных потерь и обеспечения стабильного напряжения в сети. Моделирование для системы IEEE 30-bus демонстрирует перспективность использования предлагаемого подхода. В работе [57] рассматривается гибридный алгоритм роя частиц с дифференциальной эволюцией (Particle swarm optimization with differential evolutionary, PSO-DV) для уменьшения размерности модели линейной системы. Сокращение порядка модели с помощью PSO-DV легко реализуется и имеет хорошую производительность по критерию ISE при задании единичного ступенчатого воздействия по сравнению с другими подходами. Исследования [58] посвящены сравнительному анализу различных метаэвристических подходов при моделировании процесса регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока в условиях неопределенности параметров. Рассматриваются различные алгоритмы ИИ, такие как: DE, PSO, GA, AC, FA алгоритм летучей мыши (Bat Algorithm, BA), алгоритм поиска волка (Wolf Search Algorithm, WSA) и их модификации. Оценка алгоритмов осуществляется по следующим критериям: точность регулирования скорости вращения, быстродействие алгоритма и количество потребляемой энергии двигателем. Моделирование в ПО «R software» в пакете «Irace» показало эффективность использования гибридных алгоритмов, таких как: алгоритм оптимизации муравьиной колонии совместно с алгоритмом роя частиц (AC-PSO) и алгоритм оптимизации муравьиной колонии совместно с дифференциальной эволюции (AC-DE).

Таким образом, проведённые исследования показывают актуальность применения биоинспирированных подходов искусственного интеллекта для управления промышленным производством.

## **2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ ГАЗА В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ КАК СЛОЖНЫЙ ОБЪЕКТ**

Наиболее распространённым инструментом для процесса очистки природного газа от различных примесей и получения конечного продукта в нефтегазовой отрасли является дистилляционная колонна (ДК). В разделе рассматривается технологическая схема процесса очистки газа, элементы и агрегаты, участвующие в процессе дистилляции, различные типы и конфигурации ДК.

### **2.1 Технология обработки природного газа в дистилляционных колоннах в нефтегазовой отрасли**

В нефтеперерабатывающей промышленности природный газ используется как источник энергии в виде топлива и как сырьё для нефтехимических предприятий. Выделяют следующие основные операции над природным газом: очистка от примесей, сепарация на ключевые компоненты (например, получение пропана, бутана, этана, гелия и др.) и разжижение газа для транспортировки на расстояние или длительное хранение [59]. Сырой газ, содержит такие компоненты как: вода, пропан, изобутан, нормальный бутан, изопентан, пентан, гексан, гептан, метан, углекислый газ, сульфид водорода, азот, цикло пентан и др. После операции обработки сырого газа, в зависимости от типа установки, получают следующие компоненты: товарный газ, этан, пропан, гелий, азот и т.д. Состав природного газа варьируется в зависимости от месторождений, однако для получения товарного газа существуют стандарты, относительно которых определяются концентрации компонентов в смеси. При получении изобутановой фракции природного газа согласно ГОСТ СТ РК 2957-2017 для высшей категории продукта массовая доля компонентов должна содержать: не менее 98% изобутана, не более 1.3% пропана, не более 0.7% нормального бутана, отсутствие тяжёлых углеводородов ( $C_5$  и выше). При этом массовая доля сероводорода и серы не должна превышать 0.005%. Существуют спецификации эффективности товарного газа, которые характеризуют качество горения газа, и вероятность коррозии трубопроводов и их закупоривания [59].

Под дистилляционной колонной понимают сложный промышленный агрегат, предназначенный для очистки жидкостей и газов от примесей, который получил своё применение в нефтегазовой, химической, пищевой промышленности и др.

На рисунке 2.1 схематически изображена структура типовой дистилляционной колонны, которая состоит из: вертикального аппарата колонны, в которой располагаются тарелки или насадки; ребойлера (котла для повторного нагрева), подающего пар в нижнюю секцию колонны; конденсатора; резервуара с рефлюксной жидкостью, в котором хранится конденсированный пар с верхней части колонны и поступает обратно в аппарат.

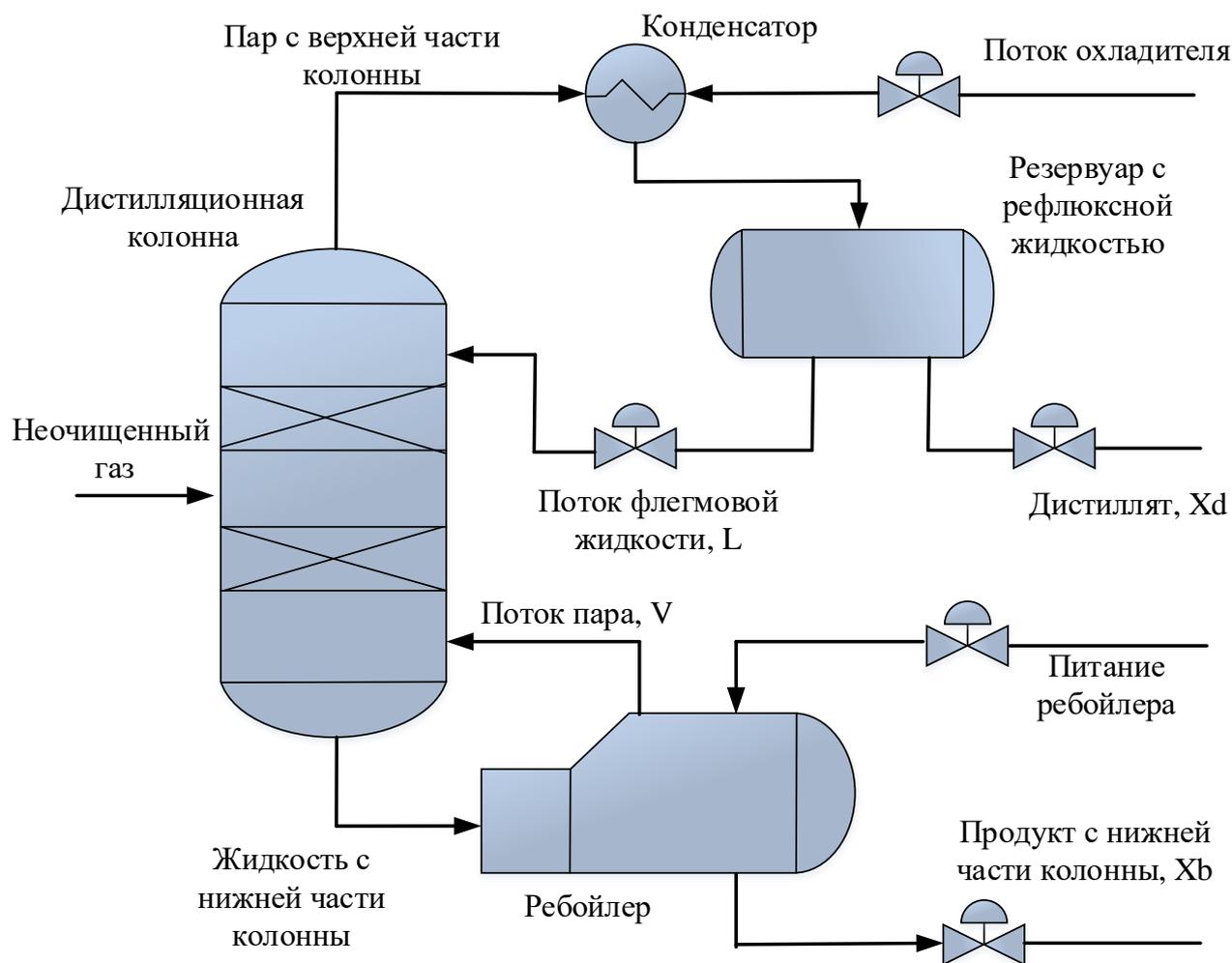


Рисунок 2.1 – Типовая схема дистилляционной колонны

Входной материальный поток в ДК содержит ключевые компоненты [60] (на примере сырого газа, это может быть бутан, пентан) и примеси других компонентов, концентрации которых необходимо минимизировать или исключить из продукта. Ключевые компоненты делятся на тяжелые и легкие: первые осаждаются в нижней части колонны, другие собираются с верхней части колонны в виде дистиллята.

Классификация колон [61] зависит от типа внутренних устройств, по которым будет протекать жидкостная и паровая фаза процесса, а именно от тарелок, насадок или лотков. В тарельчатых колоннах [62] используют колпачковые, клапанные, ситчатые, волнистые, решётчатые, трубчатые и другие тарелки.

Тарелки колонны предназначены для операции барботирования, то есть процесса перемешивания жидкости и газа при определённом давлении. Количество тарелок характеризует количество стадий процесса. Пар или газ проходящий через стадию  $i$ , поднимается на тарелку  $i+1$ , в то время как жидкость стекает на стадию  $i-1$  (рисунок 2.2). Движение пара осуществляется из-за перепада давления между нижней и верхней частями колонны. Изменение

давления в колонне зависит от таких параметров, как: плотность и скорость движения пара; типа тарелок; геометрии и количества отверстий в тарелке [63].

Все тарелки в зависимости от принципа действия делятся на две группы:

1. Тарелки, имеющие сливные устройства, для протекания жидкости с верхней стадии в нижнюю по специальным каналам.

2. Провальные тарелки, в которых движение потоков пара и жидкости осуществляется через одни и те же отверстия, расположенные в основании агрегата.

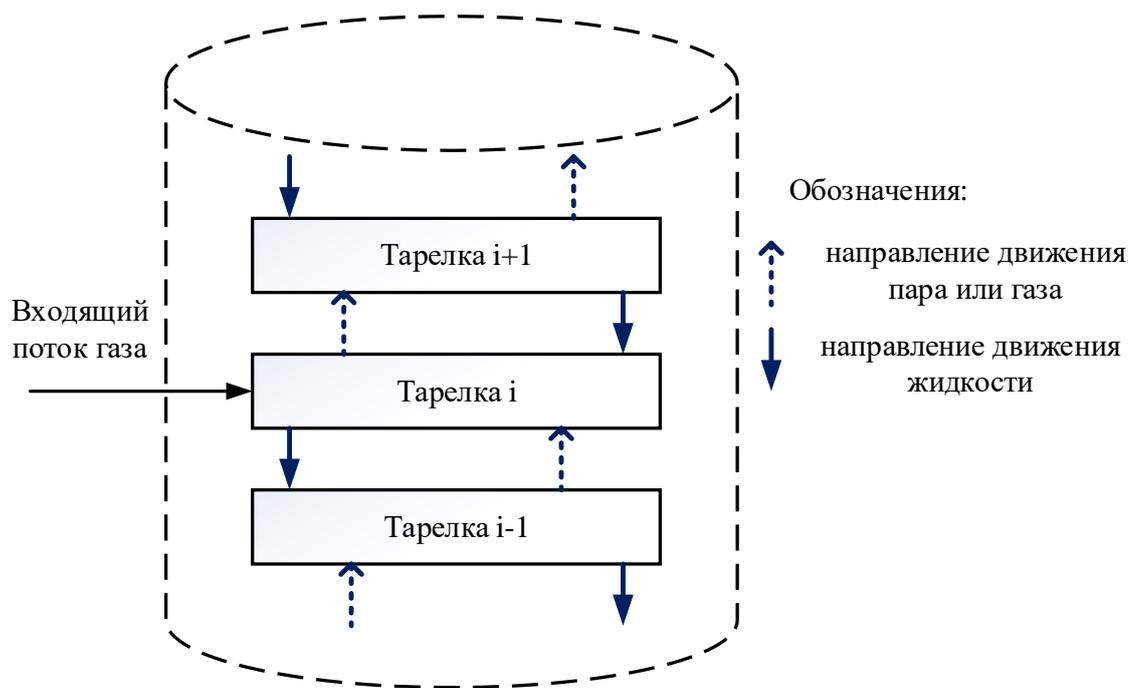


Рисунок 2.2 – Распределение жидкости и пара внутри ДК

Насадочная колонна [61] состоит из крепления, на которое высыпают специальные элементы в форме колец, пружин, сёдел, представляющих собой насадки, в которых происходит фазовый контакт жидкости и пара.

Определение 2.1. Конденсатор [64] это теплообменник, который применяется для охлаждения пара с верхней части ДК при постоянном давлении путём отвода тепла с помощью хладагента и превращения в конденсат. Полученная рефлюксная жидкость попадает в резервуар, где основная часть транспортируется на выход как продукт-дистиллят, а некоторая часть уходит назад в колонну в качестве орошения. Существует два основных вида конденсаторов [64]: общие и частичные (рисунок 2.3). В полном конденсаторе пар, исходящий из верхней части колонны, полностью конденсируется в жидкость, часть которой выводится в виде продукта-дистиллята. В частичном конденсаторе наоборот, только часть пара преобразовывается и используется как рефлюкс, а остаток выходит в виде продукта-дистиллята. Также имеется поток исходящего пара из резервуара с рефлюксной жидкостью.

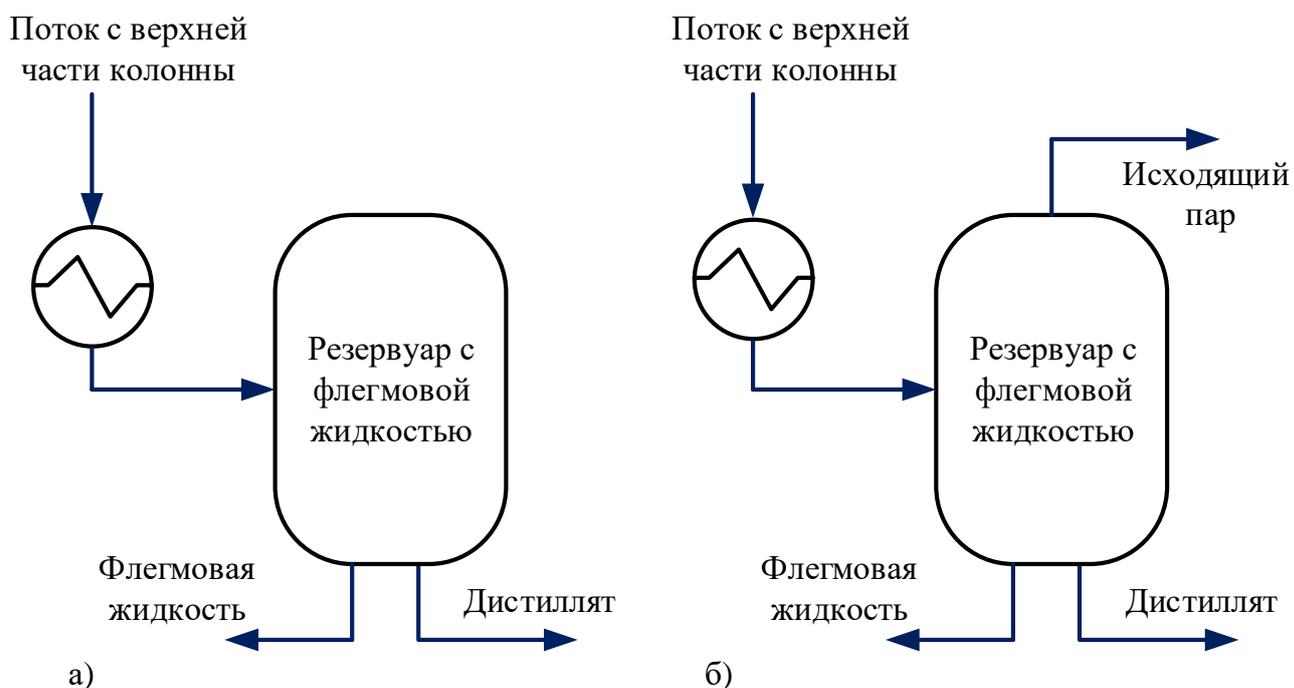


Рисунок 2.3 – Конфигурации конденсаторов в установке ДК: а) общий конденсатор, б) частичный конденсатор

Определение 2.2. Ребойлер [65] - вид теплообменника, который подсоединяется к нижней части ДК и выполняет функцию генерации пара путём рециркуляции жидкости с нижней части колонны. В процессе дистилляции широко распространены ребойлеры котельного типа, изображённые на рисунке 2.4. Подача жидкости с ДК происходит в нижнюю часть котла, а пар, возвращаемый обратно, исходит сверху агрегата.

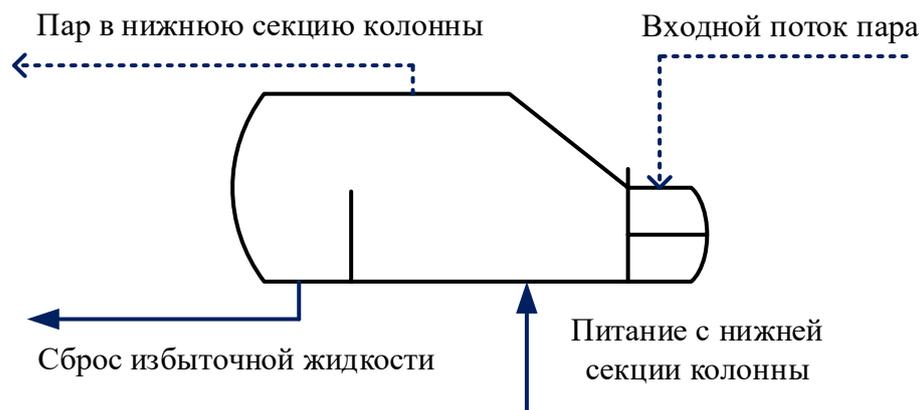


Рисунок 2.4 – Типовая структура ребойлера котельного типа

Определение 2.3. Орошение колонны — это объём жидкости, который возвращается назад в дистилляционную колонну с конденсатора. Материальный поток, поступающий назад в ДК, называется флегмовой жидкостью (рефлюксом). Ключевым параметром при управлении дистилляционной

колонной является флегмовое число (reflux ratio), которое рассчитывается как отношение объёма возвращаемой в дистилляционную колонну жидкости к количеству продукта, выходящего из технологической установки.

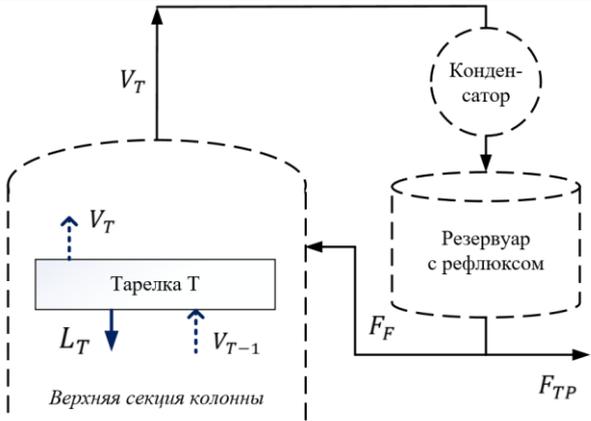
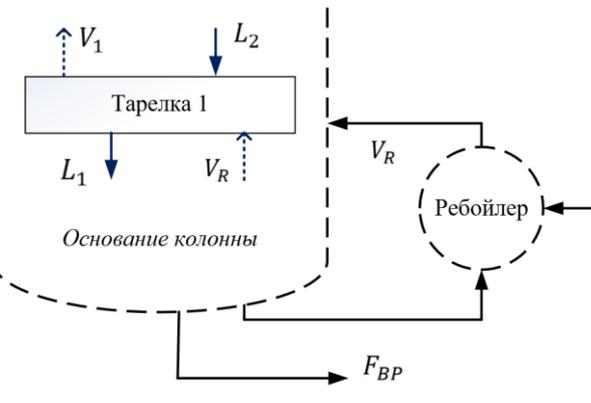
Определение 2.4. Точка росы (dew point) — это температура (при постоянном давлении) в дистилляционной колонне, при которой конденсируется охлаждаемый газ или пар [60]. Температура точки росы (ТТР) считается одним из ключевых параметров при определении качества газа.

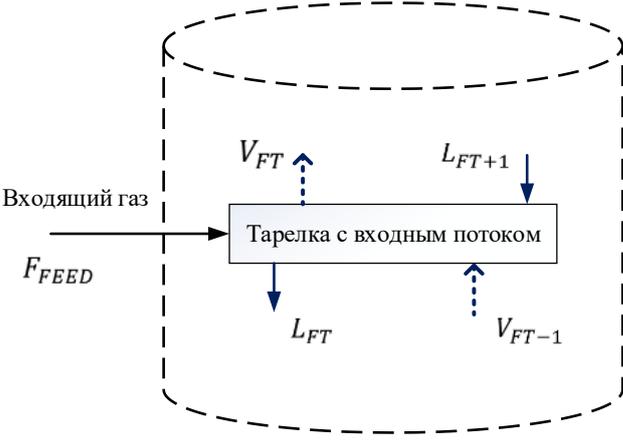
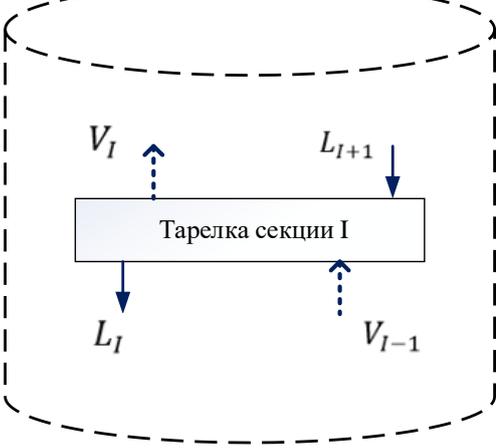
В предлагаемом исследовании рассматривается дистилляционная колонна с производительностью 130000 тон выпускаемого продукта в год. Основными исходными параметрами для расчёта колонны являются: КПД колонны, концентрация продукта-дистиллята, исходящего из верхней части колонны, и концентрация продукта из нижней части колонны.

## 2.2 Математическая модель динамической системы управления процессами дистилляционной колонны

Рассмотрим математическую модель, описывающую динамику ДК, в которой спроектировано 14 тарелок [66], представленную в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Математическое описание элементов дистилляционной колонны

Математическая модель	Схематическое отображение секции колонны
<p style="text-align: center;">1</p> <p>Верхняя секция ДК:</p> $\frac{dM_T}{dt} = (V_{T-1} + F_F) - (V_T + L_T), \quad (2.1)$ <p>где <math>\frac{dM_T}{dt}</math> — изменение материального баланса;</p> <p><math>V_T, V_{T-1}</math> — массовый поток пара в тарелках <math>T</math> и <math>T-1</math>;</p> <p><math>F_F</math> — массовый поток рефлюкса;</p> <p><math>L_T</math> — массовый поток жидкости, стекающей с тарелки <math>T</math>.</p>	<p style="text-align: center;">2</p>  <p>Верхняя секция колонны</p>
<p>Основание ДК:</p> $\frac{dM_{BT}}{dt} = L_1 - (V_R + F_{BP}), \quad (2.2)$ <p>где <math>\frac{dM_{BT}}{dt}</math> — изменение материального баланса основания ДК;</p> <p><math>L_1</math> — массовый поток жидкости, стекающей с тарелки 1;</p> <p><math>V_R</math> — массовый поток пара с ребойлера;</p> <p><math>F_{BP}</math> — массовый поток продукта с нижней части колонны.</p>	 <p>Основание колонны</p>

1	2
<p>Тарелка с входным потоком сырого газа:</p> $\frac{dM_{FT}}{dt} = (F_{FEED} + L_{FT+1} + V_{FT-1}) - (V_{FT} + L_{FT}), \quad (2.3)$ <p>где <math>\frac{dM_{FT}}{dt}</math> – изменение материального баланса в секции питания ДК;  <math>F_{FEED}</math> – массовый поток сырого газа;  <math>L_{FT}, L_{FT+1}</math> – входной и выходной массовый поток жидкости тарелки питания ДК;  <math>V_{FT}, V_{FT-1}</math> – входной и выходной массовый поток пара тарелки питания ДК.</p>	
<p>Тарелка секции I:</p> $\frac{dM_I}{dt} = (L_{I+1} + V_{I-1}) - (V_I + L_I), \quad (2.4)$ <p>где <math>\frac{dM_I}{dt}</math> – изменение материального баланса в секции I;</p>	

В соответствии с таблицей 2.1 в дистилляционной колонне должно соблюдаться парожидкостное равновесие (Vapour-liquid equilibrium, VLE), где скорость превращения жидкости в пар должна равняться скорости конденсации на молекулярном уровне.

Структура L-V (L это скорость потока дистиллята, V это скорость потока пара) может рассматриваться как стандартная структура управления для дистилляции с контролем состава. В такой управляющей структуре скорость потока жидкости L и скорость потока пара V являются управляющими входами [67]. Задача системы управления состоит в том, чтобы с помощью промышленных регуляторов поддерживать желаемые концентрации продуктов  $x_B, x_D$  на выходе агрегата.

Модель дистилляционной колонны может быть представлена системой с двумя входами и двумя выходами [68], что соответствует ММО-системе управления:

$$\begin{cases} \frac{\chi_D(s)}{dt} = \frac{87.8}{75s + 1}L(s) + \frac{-86.4}{75s + 1}V(s) \\ \frac{\chi_B(s)}{dt} = \frac{108.2}{75s + 1}L(s) - \frac{-109.6}{75s + 1}V(s) \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $L(s)$  – скорость потока флегмовой жидкости через оператор Лапласа;

$V(s)$  – скорость потока пара через оператор Лапласа;

$\chi_D$  – концентрация продукта в дистилляте;

$\chi_B$  – концентрация продукта в нижней части колонны.

Определение 2.5. МИМО-система (Multi-input multi-output, МИМО) это многомерная система управления, которая имеет более одной контролируемой переменной [69]. То есть для достижения номинальных рабочих условий объекта управления необходимо регулировать несколько ключевых переменных процесса (например, давление, температура, соотношение расходов и т.д.). Отличительной особенностью таких систем является наличие перекрёстных связей между входными и выходными переменными процесса, что делает невозможным применение законов управления одномерных систем, так как влияние отдельного контура может привести к неустойчивости всей системы.

Предлагаемая математическая модель отражает основную динамику процессов, которые проходят в ДК. Модель (2.5) отражает инерционную зависимость изменения во времени нескольких выходных сигналов  $\chi_D$  и  $\chi_B$  от изменения во времени выходных управляющих сигналов и взаимосвязей между каналами управления. Это определяет систему (2.5), как МИМО-объект управления, который является линейным, стационарным и непрерывным во времени. Управление процессом затрудняется из-за наличия взаимосвязей на основные каналы.

Многосвязная структура математической модели (2.5) представлена на рисунке (2.5). На схеме  $G_{11}, G_{12}, G_{21}, G_{22}$  являются передаточными функциями модели (2.5),  $u_L$  и  $u_V$  – входные управляющие сигналы,  $y_L$  и  $y_V$  – выходные сигналы объекта управления. Элементы  $G_{12}, G_{21}$  представляют собой перекрестные связи, указывающие на взаимное влияние первого входа на второй и наоборот.

Основываясь на выражении (2.5) передаточные функции системы равны:

$$G_{11} = \frac{87.8}{75s + 1}, \quad (2.6)$$

$$G_{12} = -\frac{86.4}{75s + 1}, \quad (2.7)$$

$$G_{21} = \frac{108.2}{75s + 1}, \quad (2.8)$$

$$G_{22} = -\frac{109.6}{75s + 1}. \quad (2.9)$$

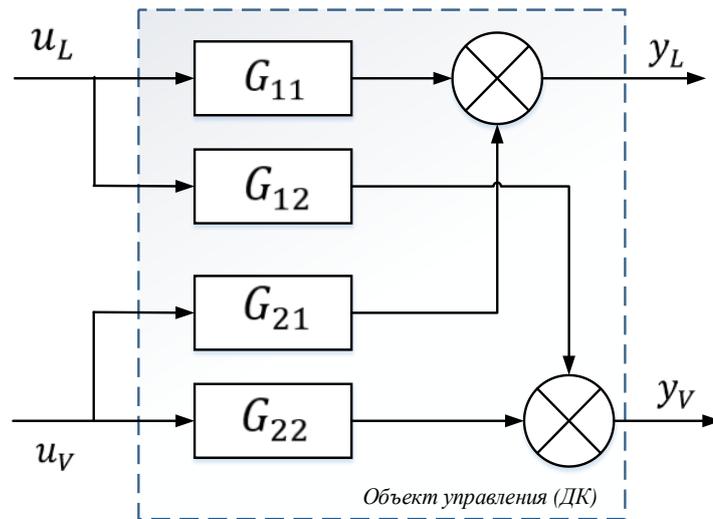


Рисунок 2.5 – Структурная схема дистилляционной колонны

На рисунке 2.6 изображено влияние взаимосвязей на основные каналы  $G_{11}$ ,  $G_{22}$  по переходной характеристике системы (2.5).

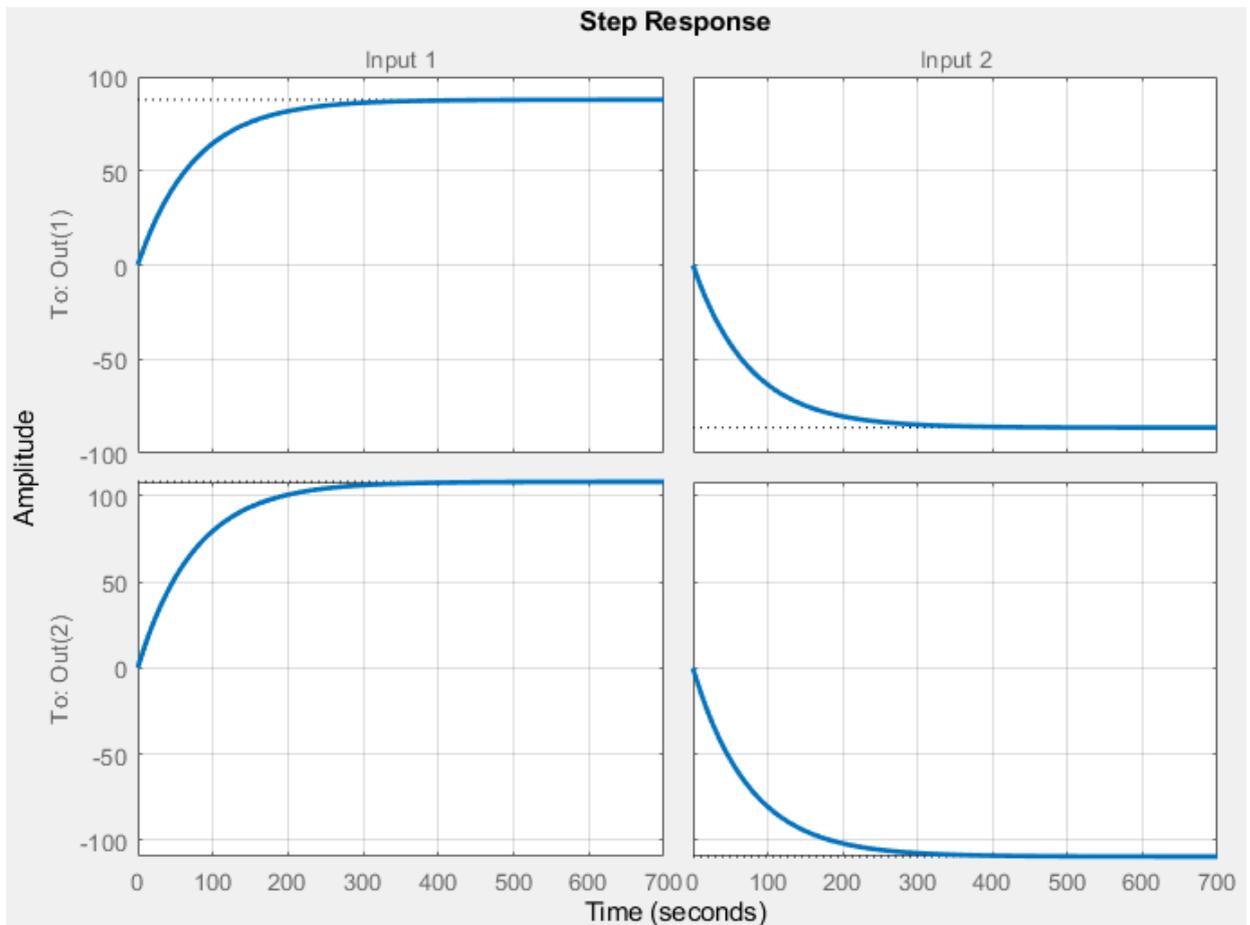


Рисунок 2.6 – Переходные характеристики дистилляционной колонны

Для достижения заданных технологических требований необходимо реализовать управление с целью обеспечения таких заданных показателей качества, как перерегулирование, время нарастания и время установившейся ошибки. Вопросы устойчивости модели (2.5) более подробно рассмотрены в работе [67].

Для решения проблемы с уменьшением влияния взаимосвязей подсистем математической модели (2.5) предлагается применить операцию развязывания (decoupling control), которая реализуется в следующем разделе.

### **2.3 Выводы по второму разделу**

Основные положения, рассматриваемые в разделе приведены ниже:

1. В разделе описана технология очистки газа в дистилляционной колонне и приведена типовая схема процесса. Рассмотрены конфигурации типовых структур ребойлера и конденсатора. Даны определения понятий орошение колоны, точки росы и ММО-объекта.

2. Рассмотрен ГОСТ 2957-2017 СТ РК по требованиям к массовой доле компонентов, получаемых в процессе очистки газа.

3. Приведена математическая модель ДК в двух видах: в виде дифференциальных уравнений и преобразования Лапласа. Рассмотрены передаточные функции многомерного объекта управления ДК.

4. В ходе произведённого моделирования получены переходные характеристики ОУ ДК в пакете прикладных программ MATLAB и определена цель управления процессом очистки газа в ДК по регулированию ключевых переменных.

### 3 ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

В исследовании решается задача разработки схемы развязывающей системы управления и расчёта параметров для многомерной системы очистки газа в ДК. Для этого предлагается использовать метод «decoupling», позволяющий уменьшить влияние периферийных связей на основные каналы. Для правильного функционирования многомерного объекта управления ДК в разделе выполняется синтез модифицированных критериев качества, необходимых для создания программы расчёта ПИ-регуляторов. Для поиска оптимальных параметров регулятора предлагается использовать биоинспирированные алгоритмы, такие как оптимизация колонией муравьёв, алгоритм поиска кукушки, алгоритм стрекозы, алгоритм оптимизации серого волка, генетический алгоритм и алгоритм искусственных иммунных систем на базе клональной селекции. В разделе рассматриваются блок-схемы алгоритмов, их математическое описание и исследуются преимущества каждого отдельного метода.

#### 3.1 Разработка развязывающего управления для ММО-объекта ДК

Для того, чтобы избавиться от влияния перекрёстных связей при построении системы автоматического управления (САУ) с двумя регуляторами предлагается произвести операцию развязки (decoupling control). Затем решается многопараметрическая задача оптимизации [68], при которой производится интеллектуальная настройка параметров ПИ-регуляторов для двух контуров управления. Метод развязки позволяет убрать влияние перекрестных связей на основные каналы системы и не влияет на отклик выхода динамической системы.

При развязке процесс должен иметь диагональную матрицу передаточной функции:

$$F(s) = D(s)G(s), \quad (3.1)$$

где  $D(s)$  – передаточная функция развязывающего элемента,  $G(s)$  – передаточная функция многосвязного объекта управления,  $F(s)$  – развязывающее управление.

Для дистилляционной колонны, математическая модель которой представлена в (2.5), коэффициенты развязывающей матрицы находятся как решение задачи оптимизации и имеют следующий вид:

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.8038 \\ 1.206 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

На рисунке 3.1 представлена структурная схема системы автоматического управления на базе алгоритмов ACO, DA, CS, GWO с элементами развязывающего управления  $D(s)$ .

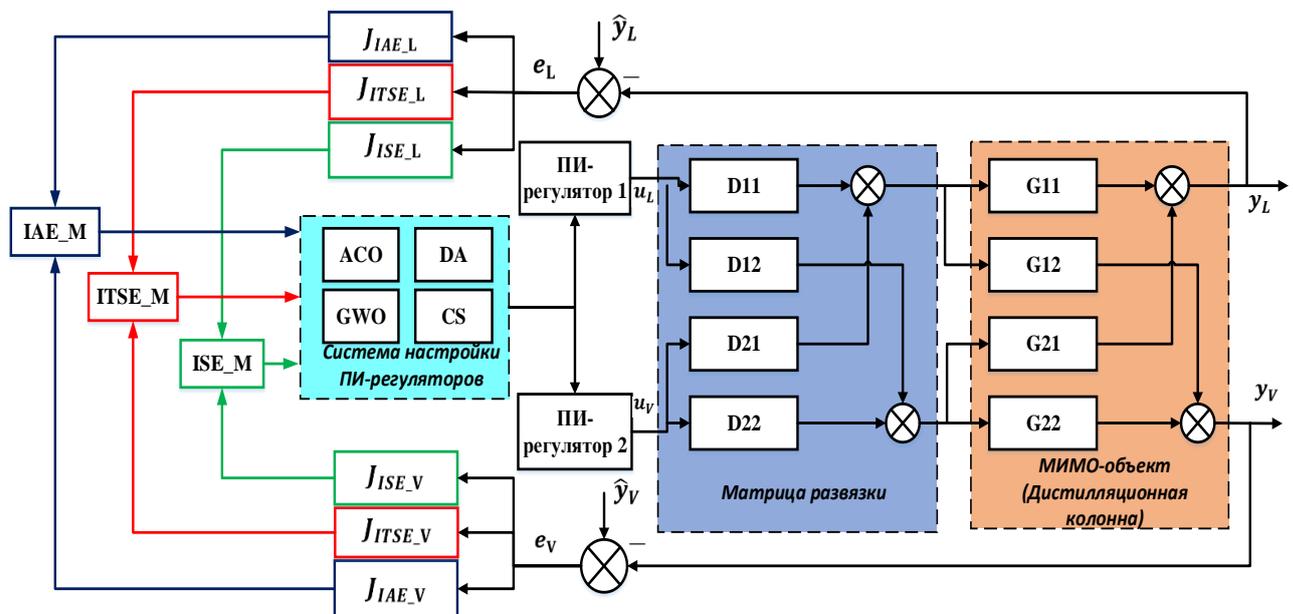


Рисунок 3.1 – Структурная схема развязывающей системы для МИМО-объекта ДК

Здесь  $G_{11}, G_{12}, G_{21}, G_{22}$  – передаточные функции объекта ДК;  $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$  – элементы развязывающего управления; ACO, DA, GWO, CS – алгоритмы ИИ для решения задачи оптимизации;  $J_{IAE_L}, J_{IAE_V}$  – критерии интегральной абсолютной ошибки контуров L и V;  $J_{ITSE_L}, J_{ITSE_V}$  – критерии интегральной по времени квадратичной ошибки контуров L и V;  $J_{ISE_L}, J_{ISE_V}$  – критерии интегральной квадратичной ошибки контуров L, V; IAE\_M, ITSE\_M, ISE\_M – модифицированные критерии качества многомерной системы ДК;  $e_L, e_V$  – ошибки рассогласования между желаемым значением переменной и текущими показаниями;  $\hat{y}_L, \hat{y}_V$  – желаемые характеристики контуров L и V;  $y_L, y_V$  – выходные сигналы контуров L и V соответственно;  $u_L, u_V$  – управляющие сигналы контуров L и V.

В соответствии со структурной схемой задача алгоритмов ИИ заключается в многопараметрической оптимизации двух регуляторов L-V структуры управления дистилляционной колонной для минимизации новых модифицированных критериев качества.

### 3.2 Разработка модифицированных критериев для управления дистилляционной колонной

Постановка задачи исследования формулируется следующим образом: для SMART-системы управления объектом ДК (2.5) необходимо разработать новые модифицированные критерии качества, для обеспечения номинальных рабочих характеристик процесса очистки газа.

Разработаны три модифицированных критерия качества, ограничивающих перерегулирование контуров управления не более 5%, представлены ниже.

1. Модифицированный среднеквадратичный критерий качества ISE-M:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{ISE_L} = \int_{t=0}^n (\hat{y}_L - y_L)^2 dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_L - \hat{y}_{LO}\} dt \\ J_{ISE_V} = \int_{t=0}^n (\hat{y}_V - y_V)^2 dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_V - \hat{y}_{VO}\} dt \\ ISE_M = J_{ISE_L} + J_{ISE_V} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где  $J_{ISE_L}, J_{ISE_V}$  – критерии качества для контуров управления L и V соответственно,  $y_L, y_V$  – текущее значение переменной процесса ( $\chi_D$  и  $\chi_B$ , соответственно),  $\hat{y}_L, \hat{y}_V$  – соответствующие желаемые характеристики,  $\hat{y}_{LO}, \hat{y}_{VO}$  – допустимый уровень перерегулирования,  $K_{\infty}$  – бесконечно высокий коэффициент усиления,  $ISE_M$  – общий критерий качества ММО-объекта ДК,  $t = 0, \dots, n$  – время моделирования технологического процесса.

2. Модифицированный интегральный среднеквадратичный критерий качества  $ITSE_M$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{ITSE_L} = \int_{t=0}^n t(\hat{y}_L - y_L)^2 dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_L - \hat{y}_{LO}\} dt \\ J_{ITSE_V} = \int_{t=0}^n t(\hat{y}_V - y_V)^2 dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_V - \hat{y}_{VO}\} dt \\ ITSE_M = J_{ITSE_L} + J_{ITSE_V} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

где  $J_{ITSE_L}, J_{ITSE_V}$  – критерии качества для контуров управления L и V,  $ITSE_M$  – общий критерий качества ММО-объекта ДК.

3. Модифицированный интегральный по абсолютной ошибке критерий качества для контуров L и V.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{IAE_L} = \int_{t=0}^n |\hat{y}_L - y_L| dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_L - \hat{y}_{LO}\} dt \\ J_{IAE_V} = \int_{t=0}^n |\hat{y}_V - y_V| dt + \int_{t=0}^n K_{\infty} \cdot \max\{0, y_V - \hat{y}_{VO}\} dt \\ IAE_M = J_{IAE_L} + J_{IAE_V} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

где  $J_{IAE_L}, J_{IAE_V}$  – критерии качества для контуров управления L и V соответственно,  $IAE_M$  – общий критерий качества ММО-объекта ДК.

Предложенные модифицированные критерии качества (3.3), (3.4), (3.5) позволяют учесть взаимосвязи между подсистемами сложного ММО-объекта ДК и ограничить перерегулирования на контурах управления до 5%.

Описание интеллектуальных алгоритмов, применяемых при расчёте регуляторов в исследовании представлены ниже.

### 3.3 Биоинспирированные алгоритмы оптимизации

Рассмотрим математическое описание и структуру алгоритмов ИИ, которые наиболее подходят для решения оптимизационных задач расчёта регуляторов сложных объектов автоматизации.

#### 3.3.1 Алгоритм оптимизации колонии муравьев

Алгоритм колонии муравьев (АСО) является эффективным инструментом для решения сложных задач многопараметрической оптимизации [70]. Механизм работы алгоритма связан с поведением муравьев в процессе прокладки оптимальных путей между муравьиным гнездом и источником пищи при помощи выделения феромонов. Маршрут с большим количеством выделенных феромонов является приоритетным и превращается в феромоновую тропу, в то время как на длинных маршрутах происходит испарение феромонов и исчезновение пути [71]. Увеличение количества начальной популяции искусственных муравьев позволяет увеличить вероятность нахождения глобального оптимума. Следует отметить особенности алгоритма АСО, такие как [72]: возможность параллельного поиска в многомерном пространстве решений, адаптация к изменениям и гарантированная сходимость. Структурная схема алгоритма [73] изображена на рисунке 3.2.

Вероятность того, что искусственный агент муравья выберет определённый переход рассчитывается по формуле [74]:

$$P_{m,n}^{Ant}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{m,n}(t)]^\alpha [\mu_{m,n}]^\beta}{\sum_{m,n} ([\tau_{m,n}(t)]^\alpha [\mu_{m,n}]^\beta)}, & \text{когда } m, n \in W^{Ant} \\ 0, & \text{когда } m, n \notin W^{Ant} \end{cases}, \quad (3.6)$$

где  $\mu_{i,j}$  – функция видимости, предназначенная для выбора муравьём ближайших узлов и игнорирование слишком дальних;  $\tau_{i,j}(t)$  – интенсивность прохода муравья по маршруту;  $\alpha, \beta$  – два параметра, показывающие влияние феромона на интенсивность прохода и видимость;  $W^{Ant}$  – текущий выбранный искусственным агентом муравьём путь;  $m, n$  – путь между муравьиным гнездом и источником пищи.

Для избавления от неоптимальных маршрутов и уменьшения количества путей, применяется операция испарения феромонов на сгенерированных путях [74], представленная в выражении (3.4).



Рисунок 3.2 – Структурная схема алгоритма муравьиных колоний

$$\tau_{m,n}(t+1) = \gamma\tau_{m,n}(t) + \sum_{Ant=1}^N \Delta\tau_{m,n}^{Ant}(t), \quad (3.7)$$

где  $\Delta\tau_{m,n}^{Ant}$  является количеством оставляемого муравьем феромона на выбранном пути,  $N$  – общее количество муравьев, применяемых в алгоритме,  $\gamma$  – коэффициент испарения (минимум 0, максимум 1).

### 3.3.2 Алгоритм поиска кукушки

Алгоритм поиска кукушки (CS) относится к метаэвристическим методам оптимизации и является высокоэффективным для решения задач управления технологическими процессами по сравнению с генетическим алгоритмом и алгоритмом роя частиц [75]. Алгоритм поиска кукушки базируется на поведении особи в процессе репродукции. Кукушка откладывает яйца в чужие гнёзда, тем самым увеличивая шанс на размножение [76]. В случае, если хозяин гнезда обнаруживает, что яйца не принадлежат ему, то он уничтожает их, либо сам переселяется в другое гнездо. В связи с этим, некоторые виды кукушек эволюционировали таким образом, что способны мимикрировать (подстраиваться под цвет и узор яйца) для схожести с яйцами хозяина гнезда, тем самым увеличивается шанс на воспроизведение собственного потомства [77].

Алгоритм поиска кукушки основан на методе полёта Levy flights [77] и представляется в следующем виде:

$$x_m^{k+1} = x_m^k + \alpha \times Levy(s, \mu), \quad (3.8)$$

где

$$Levy(s, \mu) = \frac{\mu \Gamma(\mu) \sin(\frac{\pi \mu}{2})}{\pi} \frac{1}{s^{1+\mu}} \quad (3.9)$$

Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 3.3 [78].

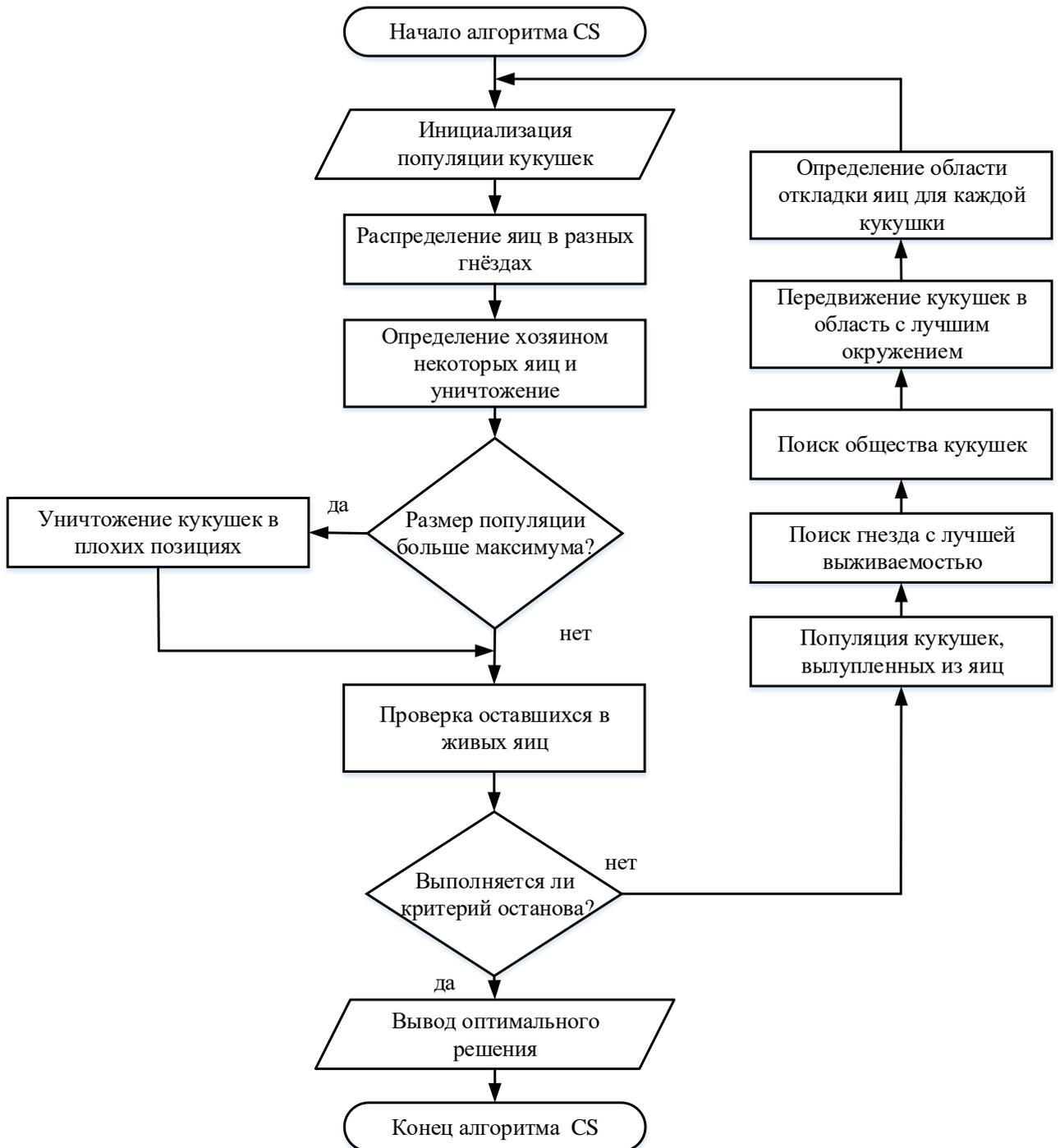


Рисунок 3.3 – Структурная схема работы алгоритма поиска кукушки

Необходимо отметить, что каждая кукушка откладывает только одно яйцо за итерацию, гнезда с яйцами с большей выживаемостью переносятся в следующую итерацию и вероятность обнаружения яйца кукушки владельцем гнезда варьируется от 0 до 1 [79].

Выделяются следующие преимущества алгоритма CS [80]: процесс рандомизации лучше, по сравнению с GA и алгоритма PSO, из-за того, что шаг итераций может быть, как мелким, так и большим. Также алгоритм имеет меньшее количество параметров для настройки, при этом решает многомерные задачи оптимизации.

### 3.3.3 Алгоритм оптимизации стрекозы

Алгоритм оптимизации стрекозы (DA) является одним из современных методов роевого интеллекта, который основан на особенном поведении группы стрекоз при переселении большими скоплениями и охоты на мелких насекомых [81]. Во время охоты в окружающей среде рой стрекоз разделяется на группы с целью поиска источников пищи. Структурная схема алгоритма DA изображена на рисунке 3.4.

Всего выделяют пять манер поведения особи стрекозы [82].

1) Сепарация. Процесс отделения особи от роя представляется в виде:

$$Se_{(n,t)} = - \sum_n^N Y_{(n,t)} - Y_{(m,t)}, \quad (3.10)$$

где  $n$  – особь стрекозы,  $m$  – соседняя особь,  $t$  – номер итерации,  $N$  – количество окружающих особей,  $Y_{(n,t)}$  – вектор расположения особи на текущей итерации,  $Y_{(m,t)}$  – вектор расположения соседней особи на текущей итерации.

2) Выравнивание скорости движения стрекозы в рое:

$$Al_{(n,t)} = \frac{\sum_m^N v_{(m,t)}}{N}, \quad (3.11)$$

где  $v_{(m,t)}$  – скорость движения соседней особи на текущей итерации,  $Al_{(n,t)}$  – стабилизация скорости движения особи на текущей итерации.

3) Движение когезии (связанное движение между особями):

$$Co_{(n,t)} = \frac{\sum_m^N Y_{(m,t)}}{N} - Y_{(n,t)}. \quad (3.12)$$

4) Движение стрекозы к найденному источнику пищи:

$$F_{(n,t)} = X_{(f,t)} - X_{(n,t)}, \quad (3.13)$$

где  $X_{(f,t)}$  - расположение источника пищи на итерации  $t$ ,  $X_{(n,t)}$  - движение  $n$ -ой особи стрекозы к пище.

5) Защитная реакция от нападения хищников:

$$D_{(n,t)} = D_{(\text{хищник},t)} + X_{(n,t)}, \quad (3.14)$$

где  $D_{(\text{хищник},t)}$  - позиция хищника на итерации  $t$ ,  $X_{(n,t)}$  - отвлекающее движение  $n$ -ой стрекозы от хищника на итерации  $t$ .

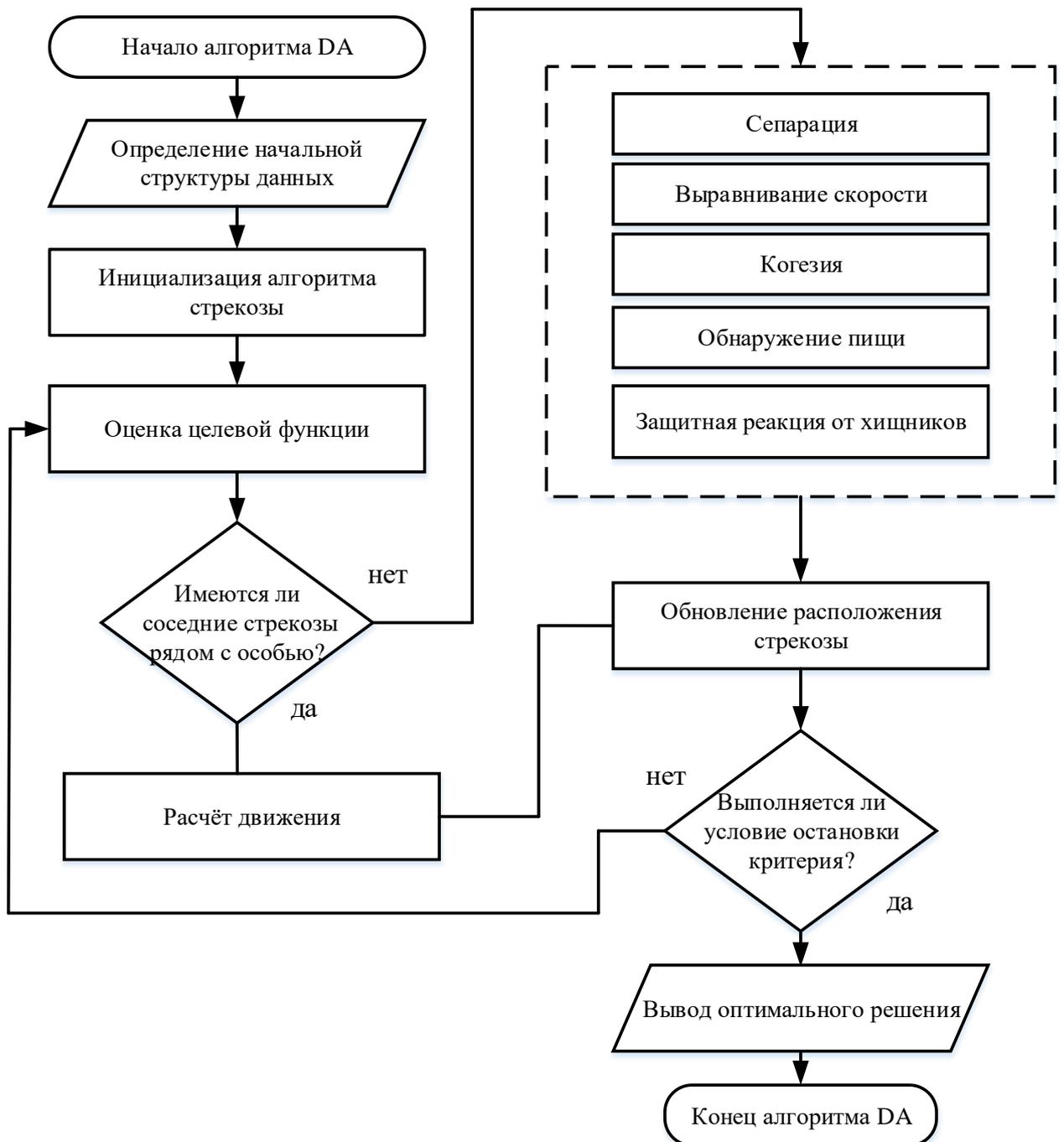


Рисунок 3.4 – Структурная схема алгоритма стрекозы

Шаг корректирующего движения стрекозы для каждой итерации будет иметь вид:

$$\Delta Y_{(n,t+1)} = (se * Se_{(n,t)} + al * Al_{(n,t)} + co * Co_{(n,t)} + f * F_{(n,t)} + d * D_{(n,t)}) + \omega * Y_{(n,t)}, \quad (3.15)$$

где  $se$ ,  $al$ ,  $co$ ,  $f$ ,  $d$ ,  $\omega$  – весовые коэффициенты каждой составляющей.

Следующая позиция движения особи в окружающей среде просчитывается при помощи формулы:

$$Y_{(n,t+1)} = Y_{(n,t)} + \Delta Y_{(n,t)}, \quad (3.16)$$

где описать  $\Delta Y_{(n,t)}$  – шаг изменения позиции в пространстве на итерации  $t$ .

Алгоритм стрекозы подходит для решения бинарных и многокритериальных задач оптимизации, а также имеет высокий уровень сходимости [83]. Выделяются следующие преимущества алгоритма стрекозы [84], такие как устойчивость и простота реализации с небольшим количеством настраиваемых параметров, что позволяет успешно применять данную методику для решения различных задач.

### 3.3.4 Алгоритм оптимизации серого волка

В алгоритме оптимизации серого волка (GWO) рассматривается поведение стаи волков во время охоты на добычу. В алгоритме существует четыре типа волка: альфа волк - принимает решение об охоте и координирует движение других волков; бета волк – выдвигается в роли помощника альфы при принятии решения; дельта и омега волки подчиняются по иерархии вышестоящим типам волков [85]. Стая волков вначале окружает добычу (которая является оптимальным решением) и преследует её до тех пор, пока жертва не устанет, только потом волки атакуют, таким образом появляется возможность охотиться на больших особей [86]. Структурная схема алгоритма [87], изображённая на рисунке 3.5, показывает основные компоненты алгоритма.

Математическая модель алгоритма GWO представлена ниже [88]:

$$\vec{Y}(k+1) = \overrightarrow{Y_{\text{Добычи}}}(k) - \vec{N} \times \vec{D}, \quad (3.17)$$

где  $\vec{Y}(k)$  – позиция волка на итерации  $k$ ,  $\overrightarrow{Y_{\text{Добычи}}}(k)$  – позиция жертвы волка на итерации  $k$ ,  $\vec{N}$  – коэффициент уровня разведки,  $\vec{D}$  – дистанция между добычей и волком.

Дистанция между жертвой и волком высчитывается следующим образом:

$$\vec{D} = |\vec{R} \times \overrightarrow{Y_{\text{добычи}}} - \vec{Y}(k)|, \quad (3.18)$$



Рисунок 3.5 – Блок-схема реализации алгоритма оптимизации серого волка

$$\vec{N} = 2 \times \vec{a} \times \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad (3.19)$$

$$\vec{R} = 2 \times \vec{r}_2, \quad (3.20)$$

где  $\vec{a}$  – параметр для определения уровня разведки,  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  – случайные элементы, генерируемые в области от 0 до 1,  $\vec{R}$  – это вектор коэффициентов  $[0...1; 0...1]$ .

Параметр  $a$  изменяется в зависимости от текущей итерации и определяется по формуле:

$$a = 2 - k \left( \frac{2}{K} \right), \quad (3.21)$$

где  $k$  – текущая итерация,  $K$  – максимальное количество итераций.

Основными преимуществами алгоритма оптимизации серого волка являются высокая скорость и точность поиска, по сравнению с другими биоинспирированными алгоритмами, а также простота реализации [89].

### 3.3.5 Генетический алгоритм оптимизации

В основе генетического алгоритма (GA) оптимизации заложены принципы эволюционного отбора. Алгоритм GA является адаптивным, стохастическим методом поиска оптимального решения на базе биологического подхода естественного отбора [90]. При разработке генетического алгоритма используются термины из области биологии: популяция, хромосома, кроссинговер, мутация и др. Под популяцией понимают множество решений, среди которых есть особи с наиболее приспособленными хромосомами (оптимальные решения) к окружающей среде и наименее приспособленные, которые не должны обеспечивать будущее потомство. Согласно теории естественного отбора Чарльза Дарвина в конкурентной борьбе остаются сильнейшие особи, следующие поколения которых будут заимствовать ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота, хранящая в себе биологическую информацию об организме) родителей. Под мутацией понимают случайное изменение генома особи, что позволяет наследовать особые признаки. При решении задачи оптимизации механизм мутации позволяет предостеречь алгоритм от преждевременной сходимости и попадания в локальный экстремум. Стандартная структурная схема генетического алгоритма представлена на рисунке 3.6.

Для получения начальной популяции необходимо использовать генетический оператор селекции [92]. Наиболее распространёнными операторами селекции являются: метод турнирного отбора и метод вращения колеса рулетки. Турнирный выбор заключается в повторяющемся отборе случайным образом  $n$ -го количества особей, лучшие из которых переносятся в промежуточную популяцию. При отборе методом рулетки у каждой особи определяется функция пригодности для заполнения секторов круга рулетки. Чем выше пригодность особи к новой популяции, тем шире площадь сектора в рулетке, и тем больше вероятность его попадания в инициализируемую популяцию. Затем производится вращение колеса рулетки в зависимости от количества особей в новой популяции. Формула расчёта сектора рулетки определяется по формуле (3.22):

$$P(n) = \frac{f(n)}{\sum_{n=1}^N f(n)}, \quad (3.22)$$

где  $P(n)$  - вероятность отбора особи,  $f(n)$  – функция пригодности  $n$ -ой особи,  $N$  – размер популяции.

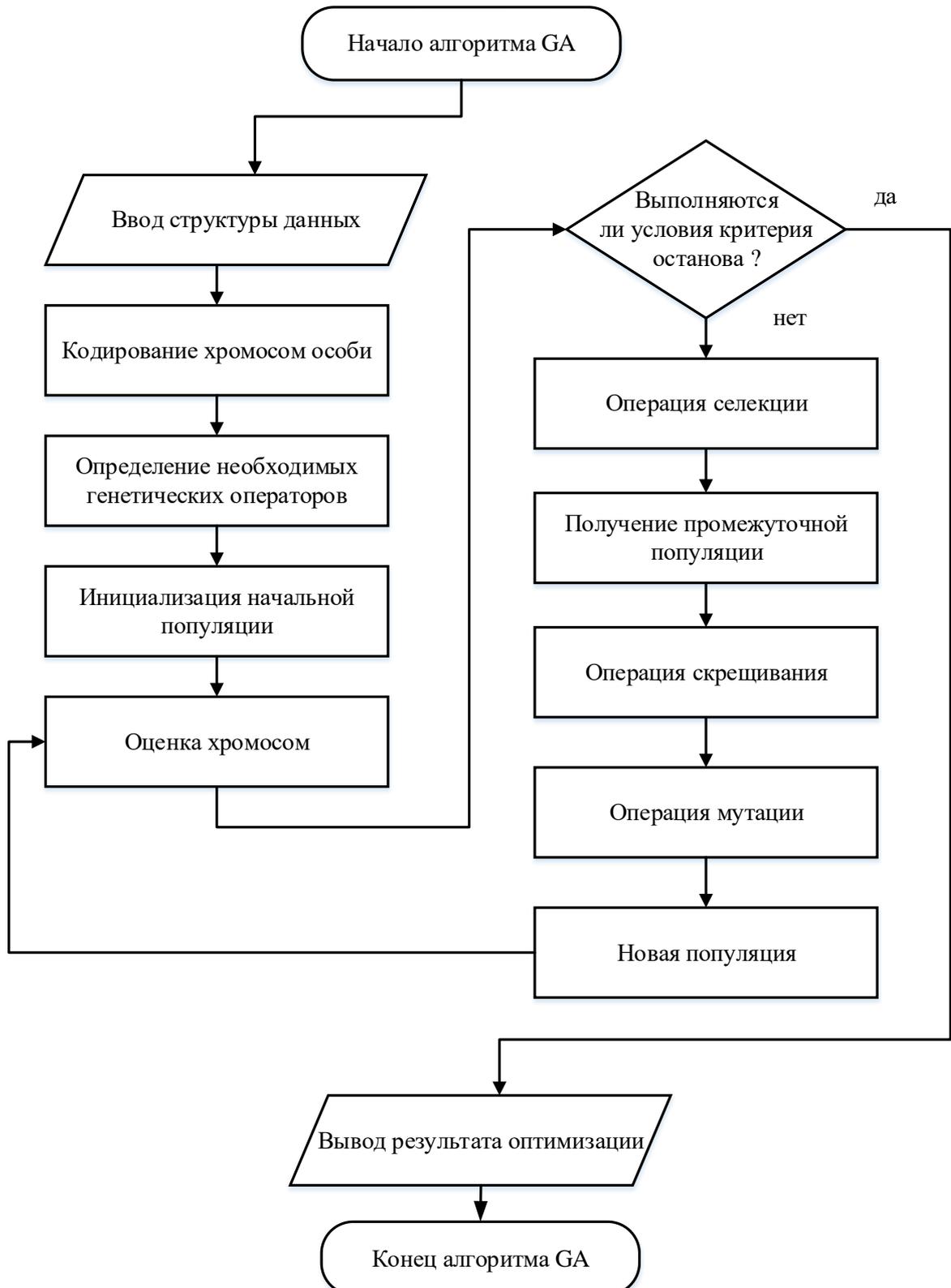


Рисунок 3.6 – Структурная схема генетического алгоритма оптимизации

Операция кроссинговера заключается в создании нового решения путём рекомбинации двух родительских хромосом. Различают разные вариации кроссинговера: точечный (замена одного участка хромосомы), многоточечный (замена нескольких участков хромосомы), триадный и другие.

### 3.3.6 Алгоритм искусственных иммунных систем на основе клональной селекции

Алгоритм искусственных иммунных систем на основе клональной селекции (CSA) описывает особенности клеток иммунитета биологического организма распознавать чужеродные антигены с целью выработки большого количества антител. Особенностью алгоритма является наличие клеточной памяти о ранее найденных антигенах. Структурная схема алгоритма CSA представлена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Блок-схема реализации алгоритма CSA

Аффинностью антигена называется мера близости антитела  $Ag$  с антигеном  $Ab$  [92], которые представлены в виде координат (3.24), (3.25):

$$Ab = (ab_1, ab_2, ab_3, \dots, ab_n), \quad (3.24)$$

$$Ag = (ag_1, ag_2, ag_3, \dots, ag_n), \quad (3.25)$$

Чем меньше дистанция между антигенами и антителами, тем больше аффинность.

Математическое описание алгоритма представлено в виде функции (3.26). Антитела  $Ab$  в CSA представляют собой набор решений системы, а антигенами  $Ag$  являются критерии качества следующего вида:

$$CSA = (Ag, Ab, G, Sel, Cl, M, n, i), \quad (3.26)$$

где  $Ag$  – представление антигенов,  $Ab$  – вырабатываемые антитела,  $G$  – пространство решений,  $Sel$  – оператор селекции,  $Cl$  – оператор клонирования,  $M$  – оператор мутации популяции,  $n$  – количество антител, подлежащих замене,  $i$  – текущая итерация (поколение).

В операторе мутации алгоритма CSA используются схожие с генетическим алгоритмом методы (например, многоточечная мутация). Данный оператор предназначен для защиты алгоритма от преждевременной конвергенции.

Так как промышленное применение алгоритмов искусственного интеллекта накладывает свои ограничения с точки зрения желаемых оценок качества управления сложными объектами, а также возникают дополнительные сложности при интеграции с распределённой системой управления, актуально использование тех алгоритмов искусственного интеллекта, которые обеспечивают желаемую динамику ММО-системы.

### 3.9 Выводы по третьему разделу

В разделе решены следующие основные задачи:

1. Разработана и описана структурная схема SMART-системы управления процессом очистки газа в ДК с применением метода развязывающего управления и оптимизации с помощью алгоритмов искусственного интеллекта.

2. Разработаны модифицированные критерии качества для многомерного и многосвязного объекта ДК с целью оптимального управления процессом с учётом ограничений. Данные критерии качества учитывают взаимосвязи ММО, что является важнейшей задачей при анализе и синтезе ММО-систем. Также в критерии качества включена суммарная составляющая, которая позволяет настраивать регуляторы с целью уменьшения перерегулирования.

3. Произведён расчёт матрицы развязки для минимизации влияния взаимосвязей на систему управления.

4. Приведены математические модели на основе алгоритмов ИИ и рассмотрены их преимущества при решении задач оптимизации. Выбранные метаэвристические алгоритмы обладают следующими свойствами:

- простота реализации;
- минимальные требования к вычислительным ресурсам;
- способность обработки данных в реальном времени;
- низкие требования к памяти устройств;
- соответствие разработанным модифицированным критериям качества с учётом динамики сложной ММО-системы.

## 4 СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ SMART УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ ГАЗА В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ

В данном разделе осуществляется разработка программного обеспечения для расчёта параметров ПИ-регуляторов с учётом модифицированных критериев качества на базе алгоритмов искусственного интеллекта. Моделируется процесс очистки газа в дистилляционной колонне с помощью пакета прикладных программ Mathwork MATLAB (Simulink) и осуществляется анализ эффективности алгоритмов ИИ. Выбрана лучшая комбинация разработанного критерия качества и алгоритма ИИ по параметрам: время регулирования, перерегулирование, время нарастания системы, а также среднеквадратической ошибке расчёта алгоритма.

### 4.1 Разработка модели системы управления дистилляционной колонной в Simulink

Одним их широко используемых в настоящее время программным обеспечением для решения различных технических проблем является Mathwork MATLAB [93]. С помощью данного программного продукта с успехом решаются задачи: моделирования, идентификации, оценки эффективности алгоритмов и т.д.

Постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо рассчитать параметры ПИ-регуляторов для многомерной системы управления контурами L и V дистилляционной колонны (2.5) путем использования оптимизационных алгоритмов ИИ: ACO, GWO, DA, CS с целью минимизации модифицированных критериев качества ISE\_M (3.3), IESE\_M (3.4) и IAE\_M (3.5), выполнить моделирование и проанализировать результаты.

Законы управления для ПИ-регуляторов имеют следующий вид:

$$u_L(t) = Kp_L e_L(t) + Ki_L \int_{t=0}^{\infty} e_L(t) dt, \quad (4.1)$$

$$u_V(t) = Kp_V e_V(t) + Ki_V \int_{t=0}^{\infty} e_V(t) dt, \quad (4.2)$$

где L и V – контуры управления,  $Kp_L, Kp_V, Ki_L, Ki_V$  – соответственно пропорциональный, интегральный коэффициенты ПИ-регулятора для соответствующих контуров управления,  $e_L(t), e_V(t)$  – сигналы ошибки между желаемым значением технологической переменной и текущим значением по контурам L и V,  $u_L(t), u_V(t)$  – управляющие сигналы по контурам L и V.

Построена модель процесса очистки газа в ДК с учётом взаимосвязей и системой развязывающего управления с помощью Simulink (рисунок 4.1). Модель с помощью блоков reference и output соединяется со скриптами алгоритмов оптимизации и целевой функцией для расчёта коэффициентов блока PID(s).

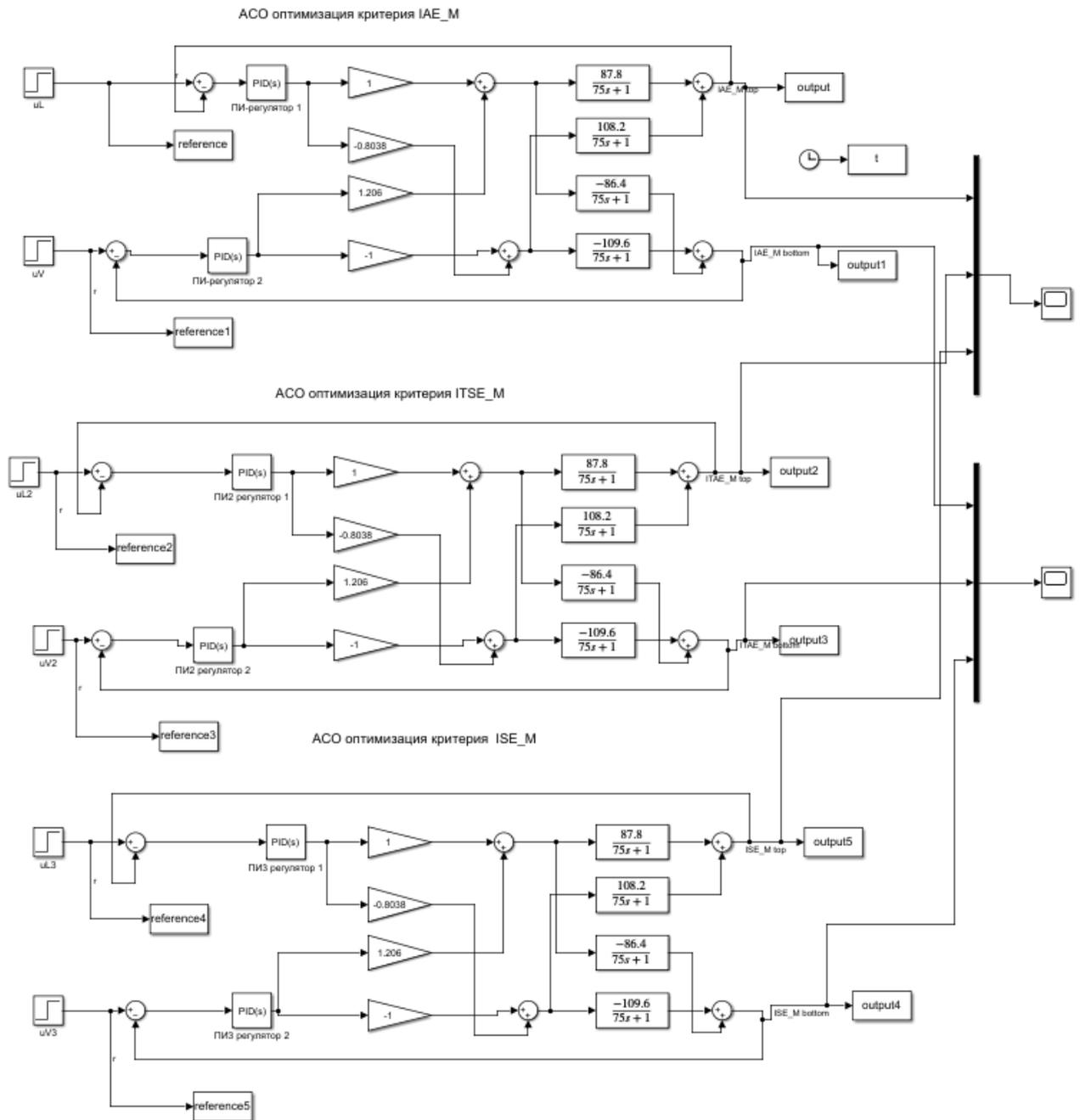


Рисунок 4.1 – Моделирование процесса очистки газа в ДК в Matlab, Simulink

Общие параметры настройки для алгоритмов оптимизации: количество поисковых переменных – 4, количество итераций – 100, нижние границы для переменных – 0.01, верхние границы для переменных – 30.

Начальные параметры:

а) для муравьиного алгоритма: количество муравьев – 400, коэффициент альфа – 0.8, коэффициент бета – 0.2, коэффициент скорости испарения – 0.7;

б) для алгоритма стрекозы: максимальное количество генераций – 100, количество поисковых агентов – 25;

в) для алгоритма поиска кукушки: количество гнёзд – 25, скорость обнаружения хозяином яиц – 0.25;

г) для алгоритма серого волка: количество волков – 100.

В таблице 4.1 представлены результаты расчётов коэффициентов ПИ-регуляторов по критериям качества (3.3), (3.4), (3.5).

Таблица 4.1 – Рассчитанные коэффициенты ПИ-регуляторов

Алгоритм	Критерий качества	Первый контур управления, L		Второй контур управления, V	
		$K_{pL}$	$K_{iL}$	$K_{pV}$	$K_{iV}$
Ant Colony Optimization	IAE-M	5,6876	0,1249	21,614	0,0100
	ITSE-M	3,2522	0,0459	14,511	0,1209
	ISE-M	5,7656	0,0279	26,391	0,0399
Dragonfly Algorithm	IAE-M	11,4935	0,3352	30,000	0,3239
	ITSE-M	7,1921	0,1373	30,000	2.2926
	ISE-M	4,8406	0,1030	29,5761	0,5759
Cuckoo Search	IAE-M	1,2951	0,1201	6,3392	0,0100
	ITSE-M	20,8673	0,2785	25,7686	16,059
	ISE-M	19,6164	0,5127	29,3209	21,306
Gray Wolf Optimization	IAE-M	4,8060	0,100	29,9472	0,1000
	ITSE-M	4,9463	0,1078	30,0000	0,2918
	ISE-M	4,9012	0,0811	30,0000	0,0100

Статистические оценки основных критериев качества (перерегулирование, время установившегося режима, время нарастания) представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Производительность работы интеллектуальных алгоритмов

Алгоритм	Критерий качества	Перерегулирование, %	Время нарастания, сек	Время установившегося режима, сек
Первый контур управления L с ПИ-регулятором 1				
ACO	ISE-M	4.994	7.499	46.017
	ITSE-M	0.354	9.859	39.479
	IAE-M	5.077	7.469	45.684
GWO	ISE-M	5.866	7.494	42.387
	ITSE-M	2.807	9.078	41.393
	IAE-M	6.003	8.389	30.526
DA	ISE-M	0.065	17.531	65.906

	ITSE-M	0.002	13.243	36.065
	IAE-M	3.115	12.890	43.176
CS	ISE-M	1.610	47.572	73.318
	ITSE-M	1.886	47.461	72.946
	IAE-M	0.536	47.814	74.056
Второй контур управления V с ПИ-регулятором 2				
ACO	ISE-M	7.533	8.667	29.207
	ITSE-M	7.020	10.532	32.244
	IAE-M	6.652	7.976	28.499
GWO	ISE-M	11.312	7.453	28.046
	ITSE-M	9.636	7.770	27.877
	IAE-M	4.914	10.034	50.357
DA	ISE-M	3.324	19.924	44.975
	ITSE-M	28.569	6.087	33.507
	IAE-M	27.560	5.792	32.714
CS	ISE-M	2.055	49.234	66.725
	ITSE-M	2.869	49.192	66.995
	IAE-M	2.472	49.247	66.404

На рисунках (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) представлены переходные характеристики для контуров управления L, V с элементами развязки и ПИ-регуляторами, настроенными с помощью ACO, DA, CS, GWO соответственно. На входы каждого контура управления подано единичное ступенчатое воздействие  $u(t) = 1$  для анализа динамики системы.

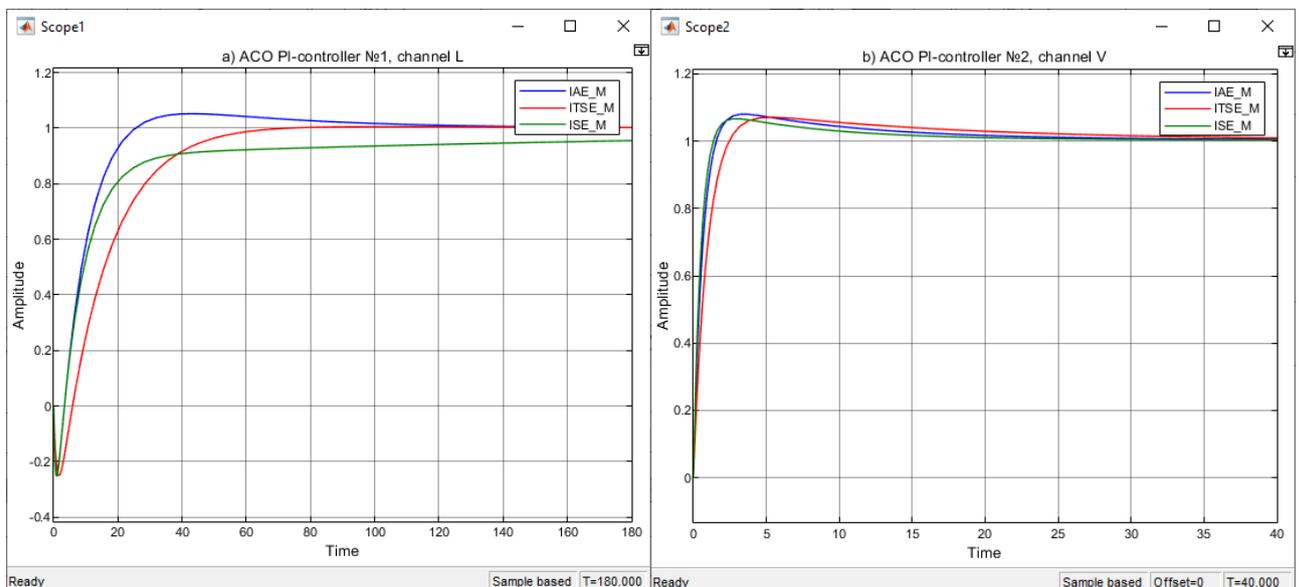


Рисунок 4.2 - Переходные характеристики подсистем с ПИ-регуляторами, настроенными с помощью алгоритма ACO:  
 а) первый контур L; б) второй контур V

Для успешного поиска решения по алгоритму АСО сто итераций оказалось недостаточно, чтобы найти оптимальное решение для заданного критерия качества с ограничениями. Это сказывается на перерегулировании более чем 5% для второго контура управления (таблица 4.1).

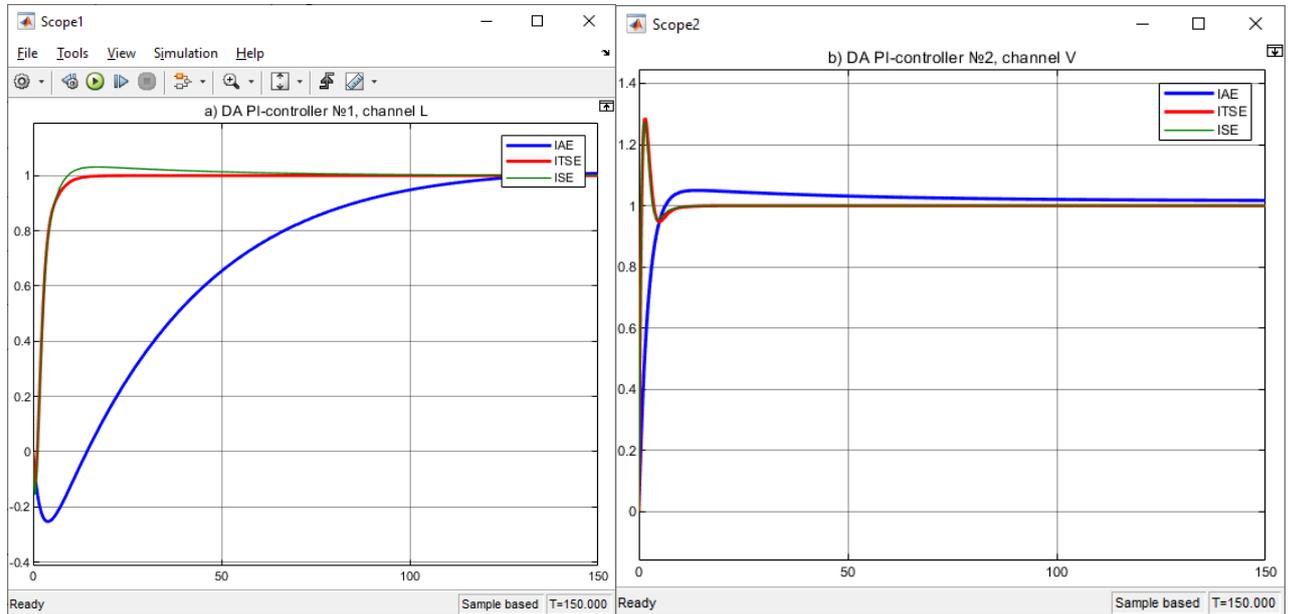


Рисунок 4.3 – Переходные характеристики подсистем с ПИ-регуляторами, настроенными с помощью алгоритма DA: а) первый контур L; б) второй контур V

Расчёт ПИ-регуляторов с помощью алгоритма DA показал нестабильные результаты при использовании критериев ITSE-M, ISE-M (рисунок 4.3). Однако расчёт для критерия IAE-M показал наилучший результат.

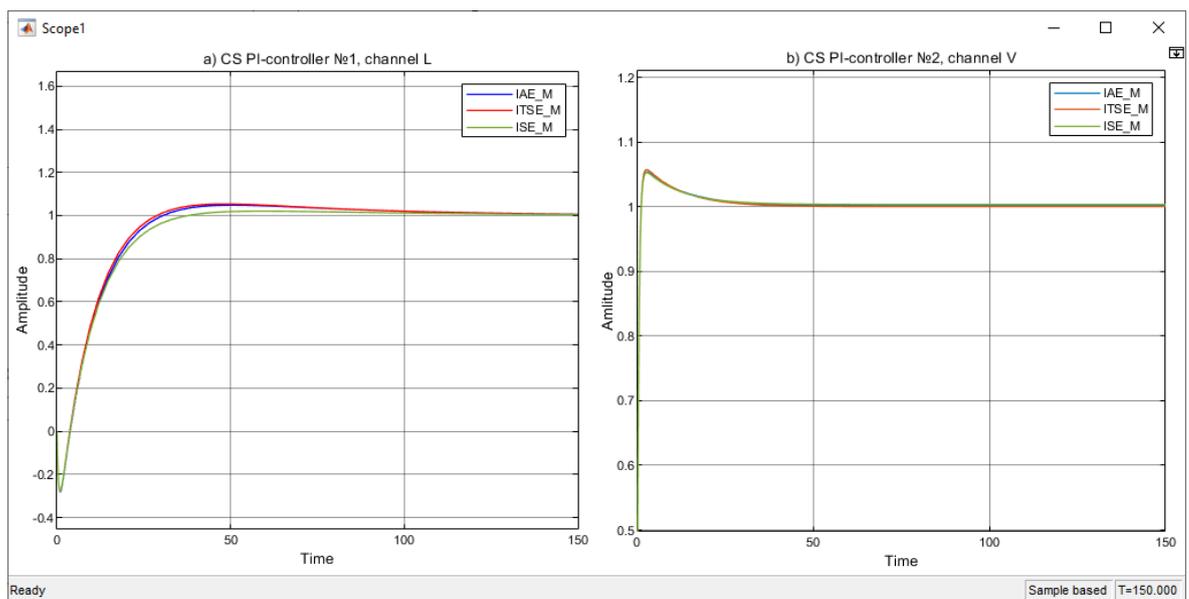


Рисунок 4.4 – Переходные характеристики подсистем с ПИ-регуляторами, настроенными с помощью алгоритма CS: а) контур L; б) контур V

Моделирование системы с регуляторами, настроенными с помощью алгоритма CS показало высокую стабильность в соответствии с заданными ограничениями.

На рисунке 4.5 представлено моделирование процессов, настроенных с помощью алгоритма GWO. Следует отметить высокое быстродействие для второго контура управления с приемлемым уровнем перерегулирования.

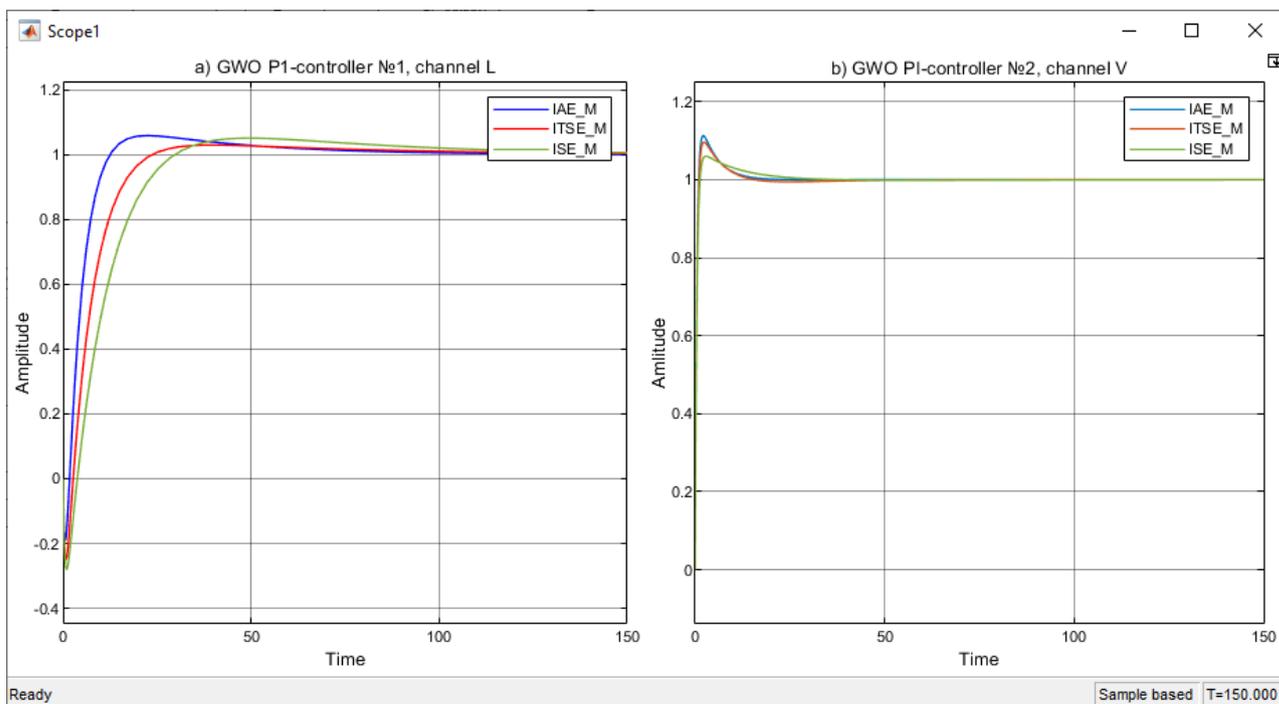


Рисунок 4.5 – Переходные характеристики подсистем с ПИ-регуляторами, настроенными с помощью алгоритма GWO:  
а) первый контур G11; б) второй контур G22

По результатам моделирования и анализа переходных характеристик (таблица 4.1) лучшим методом настройки ПИ-регуляторов для процесса очистки газа в дистилляционной колонне (2.5) является алгоритм DA с критерием качества IAE-M. Неплохие результаты показывает алгоритм CS, однако он имеет большее время регулирования, но при этом – меньшую величину перерегулирования.

Чтобы подтвердить эффективность выбранных метаэвристических алгоритмов, необходимо выполнить статистический анализ на базе средней абсолютной процентной ошибки (Mean Absolute Percentage Error, MAPE). Оценка эффективности алгоритмов ИИ приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Статистическая оценка эффективности алгоритмов для модифицированных критериев качества

Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE, %)						
Алгоритм	IAE-M		ITSE-M		ISE-M	
	Контур L	Контур V	Контур L	Контур V	Контур L	Контур V
ACO	0.1477	0.4205	0.16	0.05	4.11	0.25
GWO	0.1206	0.0116	0.39	0.01	0.63	0.02
DA	0.8677	1.7230	0.01	0.01	0.09	0.01
CS	0.6525	0.1615	0.60	0.02	0.51	0.34

Размер ошибки MAPE в основном не превышает 1%, за исключением расчёта алгоритма ACO для критерия ISE-M (контур L), и алгоритма DA для критерия IAE-M (контур V).

В Приложении Е приведён код на языке MATLAB для реализации расчётов параметров ПИ-регуляторов с помощью алгоритмов ИИ по разработанным модифицированным критериям качества.

Сравнительный анализ показал, что применение данных алгоритмов ИИ эффективно для задачи управления технологическим процессом ДК.

## 4.2 Выводы по четвертому разделу

Основными результатами исследований являются:

1. Разработана модель в Simulink для настройки параметров ПИ-регуляторов сложной МИМО-системы на базе метаэвристических алгоритмов ИИ для модифицированных критериев качества, которые обеспечивают желаемую динамику и устойчивость системы.

2. Осуществлён сравнительный анализ алгоритмов ИИ для разработанных модифицированных критериев качества, который показал, что алгоритм DA обеспечивает лучшие оценки качества для МИМО-объекта дистилляционной колонны (2.5).

3. Выполнена оценка эффективности выбранных четырёх алгоритмов: ACO, GWO, DA, CS по критерию MAPE.

## **5 РАЗРАБОТКА SMART-СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ФИРМЫ HONEYWELL**

В разделе рассматривается вопрос интеграции интеллектуальной системы управления многомерным и многосвязным объектом управления – дистилляционной колонны на базе метаэвристических алгоритмов (ACO, GWO, DA, CS) в распределённую систему управления Experion PKS компании Honeywell. Оборудование данной компании широко применяется в промышленных предприятиях нефтегазового сектора: начиная от процессов добычи углеводородов в месторождениях Каспийского моря (Казахстан), заканчивая задачами транспортировки и переработки нефтепродуктов. Практическая значимость состоит в реализации интеллектуальной системы управления в реальное промышленное производство. Промышленная реализация полученных ПИ-регуляторов осуществляется с помощью DCS Experion PKS R500 с использованием следующих утилит: HMI Web Display Builder, Control Builder, Enterprise Model Builder.

### **5.1 Архитектура SMART-системы на базе оборудования Honeywell. Программное обеспечение Experion Process Knowledge System.**

В настоящее время для управления промышленным производством широко используется Experion Process Knowledge System, которая является современной распределённой системой управления (PCU). Отличительной особенностью такой системы от SCADA заключается в децентрализованном управлении. Современные PCU отличаются повышенной отказоустойчивостью, безопасностью передачи данных, распределённой архитектурой, гибкостью и масштабированием. Применение облачных технологий позволяет управлять предприятием с любой точки мира с применением технологий виртуализации.

Функционирование разработанной SMART-системы управления сложными объектами состоит из 4 этапов, структурная схема которой изображена на рисунке 5.1.

Этап 1. Сбор и обработка данных с технологического объекта дистилляционной колонны через распределённую систему управления Experion PKS, включает в себя:

- показания с полевых датчиков, сгенерированные аварийные сигналы и сигналы событий;
- информация о рабочих характеристиках и параметров программируемого логического контроллера (ПЛК). Например, информация о загрузке центрального процессора, сетевых каналов связи, температуры модулей ПЛК и т.д.

Этап 2. Заключается в настройке ПИ-регуляторов для сложной системы управления ММО-объектом с использованием расчётов оптимальных коэффициентов алгоритмами ИИ.

Этап 3. Моделирование технологического процесса на базе регуляторов, настроенных на этапе 2 в программном продукте Unisim Design [94]. Данное ПО

представляет собой инструмент для статического и динамического анализа технологических процессов нефтегазовой отрасли и химической промышленности.

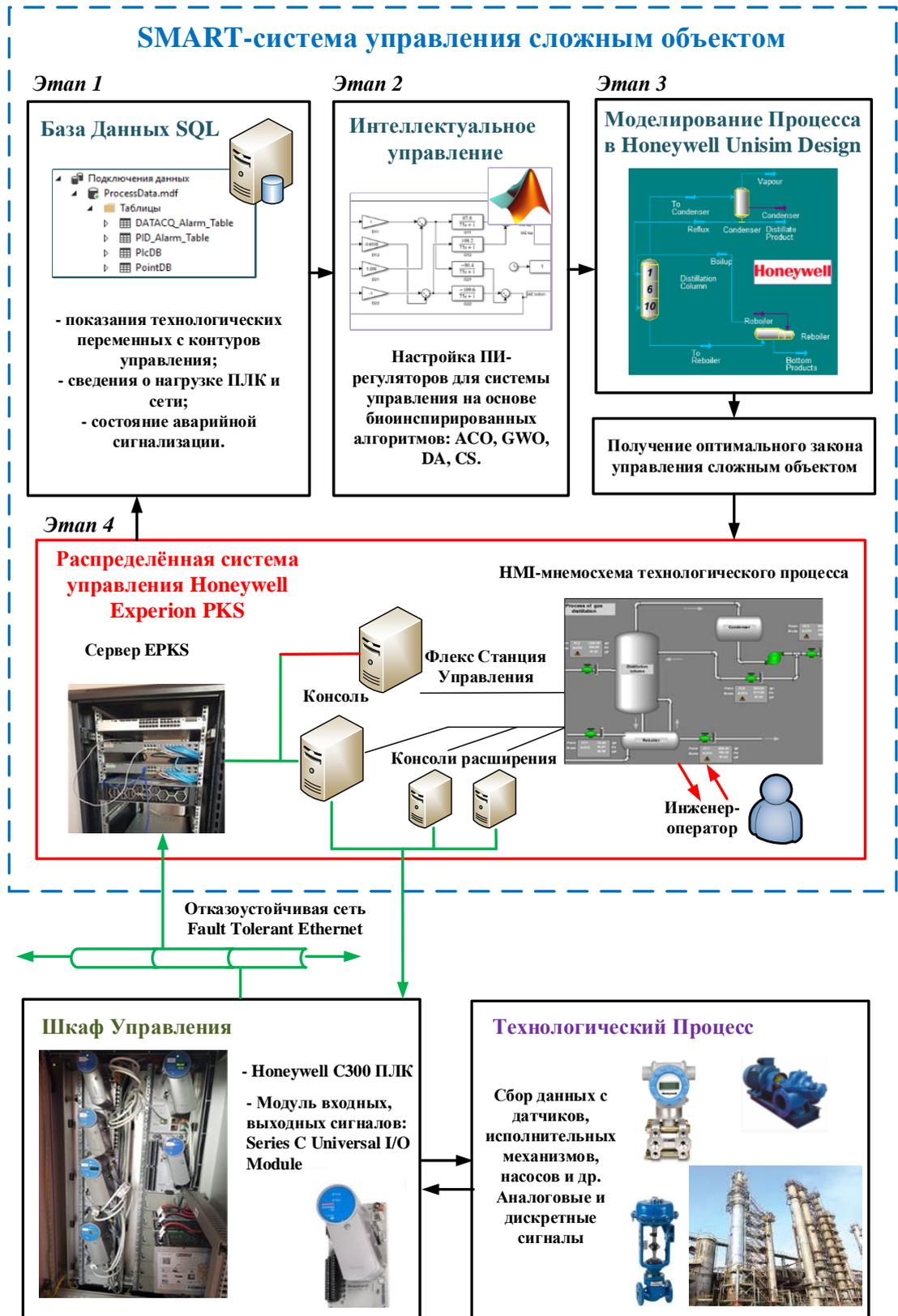


Рисунок 5.1 – Структурная схема взаимодействия компонентов SMART-системы управления ММО-объектом управления

Согласно опросу клиентов компании Honeywell [95], применение программного продукта Unisim Design позволяет снизить капитальные затраты на разработку на более чем 10%, сократить время на разработку на 10%, и увеличить доходность предприятия на 3-8%.

Этап 4. Внедрение системы управления в Honeywell Experion PKS. Для реализации SMART-системы управления в DCS необходимо настроить модель производства, топологию сети, сконфигурировать промышленный контроллер Honeywell C300 в приложении Control Builder и настроить логику управления. Затем необходимо реализовать подключение к станции управления, разработать HMI-интерфейс технологического процесса в программе HMI-Web Display Builder. В заключении необходимо настроить систему аварийного оповещения и автоматизированного создания отчётов.

Для связи модели дистилляционной колонны с реализованным интеллектуальным ПИ-управлением и распределённой системой управления Honeywell Experion PKS предлагается использовать OPC-подключение [96]. Технология OPC (Open Platform Communication) – это инструмент обмена данными между оборудованием и сетями различных производителей. Общая топология взаимодействия программного обеспечения с системой PCU представлена на рисунке 5.2.

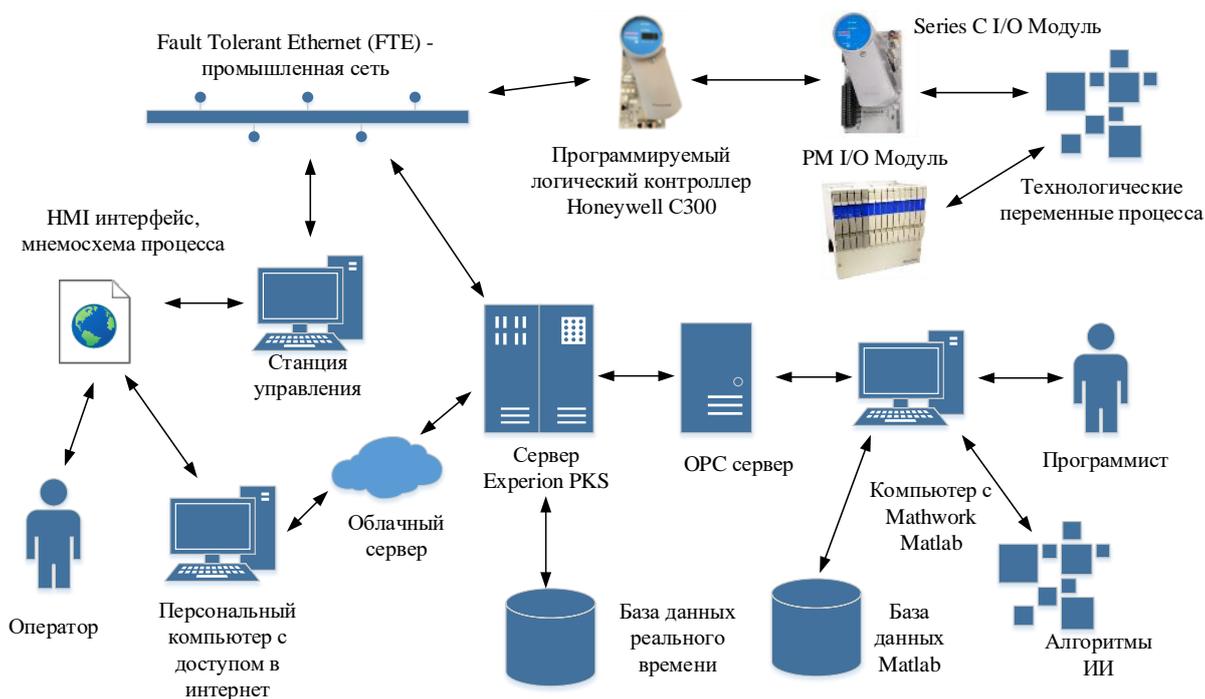


Рисунок 5.2 – Взаимодействие элементов SMART-системы с аппаратными средствами компании Honeywell

Сбор данных с технологического процесса осуществляется через аналоговые и дискретные модули Honeywell Серии С или Process Manager. Затем посредством технологии IOLink модули входных/выходных сигналов соединяются с контроллером модели C300 или C200E. Безопасность передачи

данных и контроль трафика в сети осуществляется через модуль Control Firewall. Для соединения ПЛК с сервером Honeywell EPKS необходимо использовать топологию сети Fault Tolerant Ethernet (FTE) с протоколом передачи данных TCP/IP. Особенностью FTE является высокая отказоустойчивость передачи информации с применением резервированного канала связи («зеленый» и «жёлтый» switch). На сервере EPKS расположена база данных реального времени, в которой хранится текущая конфигурация PCU, информация о состоянии оборудования, показания с технологических точек процесса (process points). Инженер или оператор системы Experion PKS получает доступ о состоянии технологического процесса посредством консоли через станцию управления, либо через облачные сервисы, т.е. подключается к серверу Experion PKS через персональный компьютер. Передача интеллектуальной логики управления производится через OPC-соединение, где OPC-драйвер устанавливается в ПО Mathwork Matlab (в качестве клиента) на персональном компьютере и затем, подключается к серверу OPC Server установленного в дистрибутив Experion PKS.

Определение 5.1. Технологической точкой (process point) является структура данных, содержащая информацию о переменной процесса. В системе Experion PKS выделяют аналоговые, статусные и аккумуляторные точки. Например, аналоговая точка LC01 (регулятор уровня жидкости позиции 01) имеет особую структуру данных, включающую в себя до 8 переменных, основные из которых: PV (process value) – значение переменной процесса, OP (process output) – выходной сигнал регулятора, SP (set point) – уставное значение, MODE – режим работы регулятора, MODE Attribute – атрибут режима работы регулятора. Для визуализации данных с технологических точек будет разработана мнемосхема процесса для управления ДК с учётом когнитивных особенностей восприятия информации оператором.

В настоящее время актуальна разработка учебных тренажёров для дистанционного обучения оборудованию и управлению технологическими процессами и подготовки высококвалифицированных технических кадров. Так, например в России на законодательном уровне промышленным предприятиям необходимо создавать тренажёрные симуляторы для обучения персонала, чтобы снизить риски аварийных ситуаций на производстве. Остро стоит вопрос в недостатке компаний разработчиков для решения данной проблемы.

## **5.2 Разработка оптической SMART-технологии дистанционного обучения распределённой системы управления Experion PKS и когнитивных мнемосхем**

Управление сложным технологическим процессом, содержащим множество наблюдаемых переменных с высокой скоростью обработки внештатных событий является актуальной проблемой. Основные функции оператора PCU Honeywell состоят в мониторинге динамики протекания технологического процесса с помощью НМІ-интерфейсов (включающих в себя мнемосхемы установок), настройке режимов работы П, ПИ, ПИД-контуров регулирования, генерации

отчётов по окончанию рабочей смены или при образовании внештатных ситуаций на предприятии, проверка работоспособности оборудования и т.д.

Автоматизация технологического процесса оборудованием компании Honeywell включает в себя разработку графических мнемосхем. Существуют различные виды мнемосхем, которые имеют иерархическую структуру взаимодействия и в основном делятся на 4 уровня. Первый уровень дисплеев включает в себя общую картину предприятия, на которой выведены индикаторы ключевых переменных процесса, таблицу сигнализации и навигационное меню для переключения между мнемосхемами. Второй уровень дисплеев предназначен для отображения технологической установки и используются операторами и инженерами для реагирования на аварийные ситуации. Данный тип дисплеев содержит необходимую информацию и интерактивные элементы для управления отображаемой установкой. Третий уровень дисплеев содержит более детальное описание технологической установки и включает полную информацию о всех её частях. На них отображаются все контуры регулирования и предназначены для управления насосами, клапанами, вентиляторами и т.д. Четвертый уровень дисплеев является дополнительным и содержит вспомогательные дисплеи для программного управления последовательностью действий (например, установки, в которой за один рабочий цикл последовательно выполняется несколько операций). Помимо этого, существуют дисплеи аварийного останова оборудования (Emergency shutdown display), дисплеи пожарной и газовой безопасности (Fire&Gas display) и др.

При обозначении оборудования на мнемосхемах используются стандарты ISA-101-2015, ISA-5.5, которые определяют графическое изображение насосов, клапанов, и т.д. С помощью цветовой палитры отображается состояние работы оборудования для того, чтобы оператор, следящий за процессом, смог в короткий промежуток времени определить аварийную ситуацию. Таким образом, различают 3 вида аварийной сигнализации – неотложная (отображается фиолетовым цветом), серьёзная (отображается жёлтым или красным цветом), сигнализация низкого приоритета (отображается голубым цветом). Мерцающий индикатор значит, что сигнализация не подтверждена оператором, и её необходимо квитировать.

Мнемосхема, должна иметь цветовую гамму, которая не будет нести нагрузку на зрительный аппарат оператора, который на протяжении рабочей смены следит за динамикой процесса. В работе [97] произведено исследование (таблица 5.1), в котором рассматривается эффективность операторов при работе с обычными мнемосхемами, и с высокоэффективными (high performance human-machine interface, HP HMI). Результаты анализа времени простоя оборудования и аварийных ситуаций на заводе по производству этилена показали, что внедрение высокоэффективных мнемосхем на производстве экономит 800 тыс. долларов США ежегодно.

Для повышения скорости обнаружения и обработки предаварийных режимов работы операторов в системе Exregion PKS предлагается разработка когнитивной оптической SMART-технологии. Оптотехнология, основанная на психофизиологическом восприятии объектов на HMI-дисплее, заключается в

применении знаний особенностей восприятия цветовых палитр зрением человека для отображения элементов мнемосхем в соответствии с состоянием объекта управления. Для этого используются результаты исследований в области когнитивных психологических технологий.

Таблица 5.1 – Преимущество использования высокоэффективных дисплеев

Действие оператора	Обычная мнемосхема	Высокоэффективная мнемосхема
Успешная обработка нештатной ситуации	70%	96%
Время, необходимое для обработки нештатной ситуации	1086 секунд	636 секунд

Чтение информации с дисплея монитора имеет определённую стратегию перемещения фокуса зрения на объекты распознавания начиная со стартовой точки и по траектории движения [98]. Экспериментальным путем выявлено, что для эффективного распознавания информации лучше всего располагать информацию в центральной области экрана слева направо. Размер объекта также влияет на время распознавания, чем больше объект – тем легче его определить.

Особую роль при создании когнитивных мнемосхем занимает цветовосприятие. Любой цвет [99] имеет следующие параметры: длина световой волны (или цветовой фон), насыщенность (сатурация), яркость (близость рассматриваемого цвета к белому цвету). Цвета можно классифицировать на две категории: ахроматические, представляющие из себя серый цвет различной светлоты, и хроматические, которые представлены оттенками красного, зелёного и голубого цветов (англ. Red-Green-Blue, RGB). При проектировании когнитивных НМД-дисплеев нужно учитывать особенности отдельного человека в восприятии цвета, такие как возраст, пол, острота зрения, психофизическое состояние.

Для определения персонализированных настроек мнемосхемы необходимо выполнить тестирование оператора-инженера для определения психологического паттерна человека. Тест психофизического состояния [100] на примере цветовых выборов, разработанный учёным М. Люшером, подходит для решения поставленной задачи. По результатам опроса можно выделить психотип человека, которому предпочтителен определённый цвет [101], например для холерика – синий цвет с длиной световой волны в размере от 440 до 485 Нм, для сангвиника – зелёный цвет в диапазоне от 510 до 565 Нм, для флегматика свойственен красный цвет в диапазоне от 630 до 760 Нм, а для меланхолика предпочтителен желтый цвет в диапазоне 565 – 590 Нм.

В настоящее время большинство людей имеют проблемы со зрением. Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения в мире можно насчитать не менее 2,2 миллиардов случаев нарушения зрения у населения.

Различные заболевания влияют на восприятие информации, такие как миопия (близорукость), гиперметропия (дальнозоркость), дальтонизм различных видов - тринатопия, дейтеранопия, протанопия. В мире 10% мужского населения и 1% женского страдают от нарушения цветовосприятия.

На рисунке 5.4 представлена классификация нарушений цветового восприятия органами зрения человека. Дальтонизм представляет собой уменьшение чувствительности зрительного аппарата к отдельным диапазонам световой волны. На сетчатке глаза расположены фоторецепторы в виде колбочек [102], которые позволяют распознавать оттенки красного, синего и зелёных цветов. Отсутствие пигмента эритролаба на фоторецепторах ослабляет восприятие оттенков красного цвета, откуда и появляется заболевание – протанопия. Человек (протаноп) не способен отличить оттенки зелёного цвета от оттенков красного цвета. Если на колбочках фоторецепторов отсутствует пигмент хлоролаб, то у человека диагностируется заболевание – дейтеранопия. У такого человека светло-зелёный цвет воспринимается тёмно-красным, пурпурный цвет как серый, а фиолетовый цвет как голубой. Для диагностики пациентов с дейтеранотопией используются специальные полихроматические таблицы Рабкина, состоящие из изображений в виде кружков различного цвета, на которых изображены цифры или геометрические фигуры. Человек с заболеванием дейтеранотопией не способен выделить цифры и объекты на таких изображениях, так как они будут сливаться друг с другом. В ходе тестирования представляют несколько обычных изображений, которые могут определяться всеми людьми, для проверки достоверности восприятия исследуемого пациента.

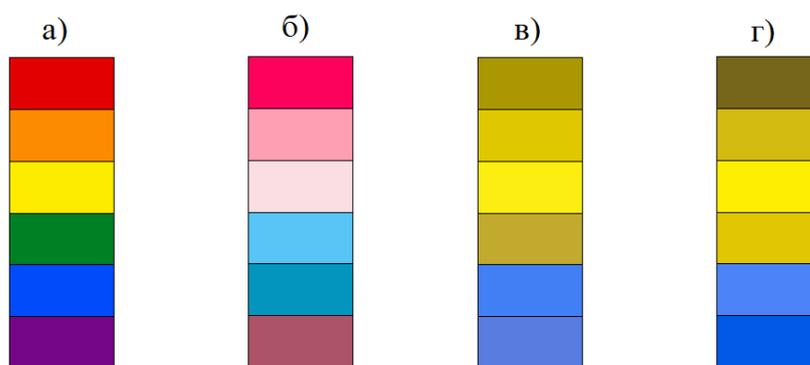


Рисунок 5.4 – Виды нарушения цветового восприятия зрением человека: а) нормальное восприятие б) тринатопия в) протанопия г) дейтеранопия

Отсутствие пигмента цианолаба в фоторецепторах говорит о нарушении цветовосприятия, называемого тринатопией, и заключается в восприятии оттенков фиолетового и синего цветов в виде оттенков красного и зелёного цветов. Важно учитывать наличие дальтонизма у оператора при работе с системами аварийной сигнализации.

Острота зрения является существенным фактором при восприятии информации с экранов дисплеев. Наиболее распространённое отклонение - близорукость (миопия) [103] характеризуется проецированием изображения перед сетчаткой, тем самым человек плохо различает объекты вдали. Обратное

явление – дальность зрения или гиперметропия, описывается хорошим изображением предметов вдали, но плохим на близкой дистанции. При миопии желательнее расположение важной информации в верхнем левом углу дисплея, а при гиперметропии в нижнем правом углу [104].

### 5.3 Создание технологии персонализированных когнитивных мнемосхем адаптивных под психофизические особенности оператора

Были разработаны 3 варианта НМИ-мнемосхем: обычная, высокоэффективная и когнитивная. Рассматриваются отличительные особенности различных видов дисплеев и их влияние на когнитивные функции человека, а также выполнен экспериментальный опрос среди респондентов по функциям цветовосприятия информации на операторских экранах.

#### 5.3.1 Обычная мнемосхема технологического процесса ДК

На базе технологической схемы процесса очистки газа в дистилляционной колонне (рисунок 2.1) разработана обычная мнемосхема для мониторинга и управления, созданная в утилите Honeywell HMIWeb Display Builder с помощью встроенных инструментов (рисунок 5.5).

Важно отметить цветовую гамму, состоящую из оттенков серого цвета, которая обычно используется для проектирования мнемосхем.

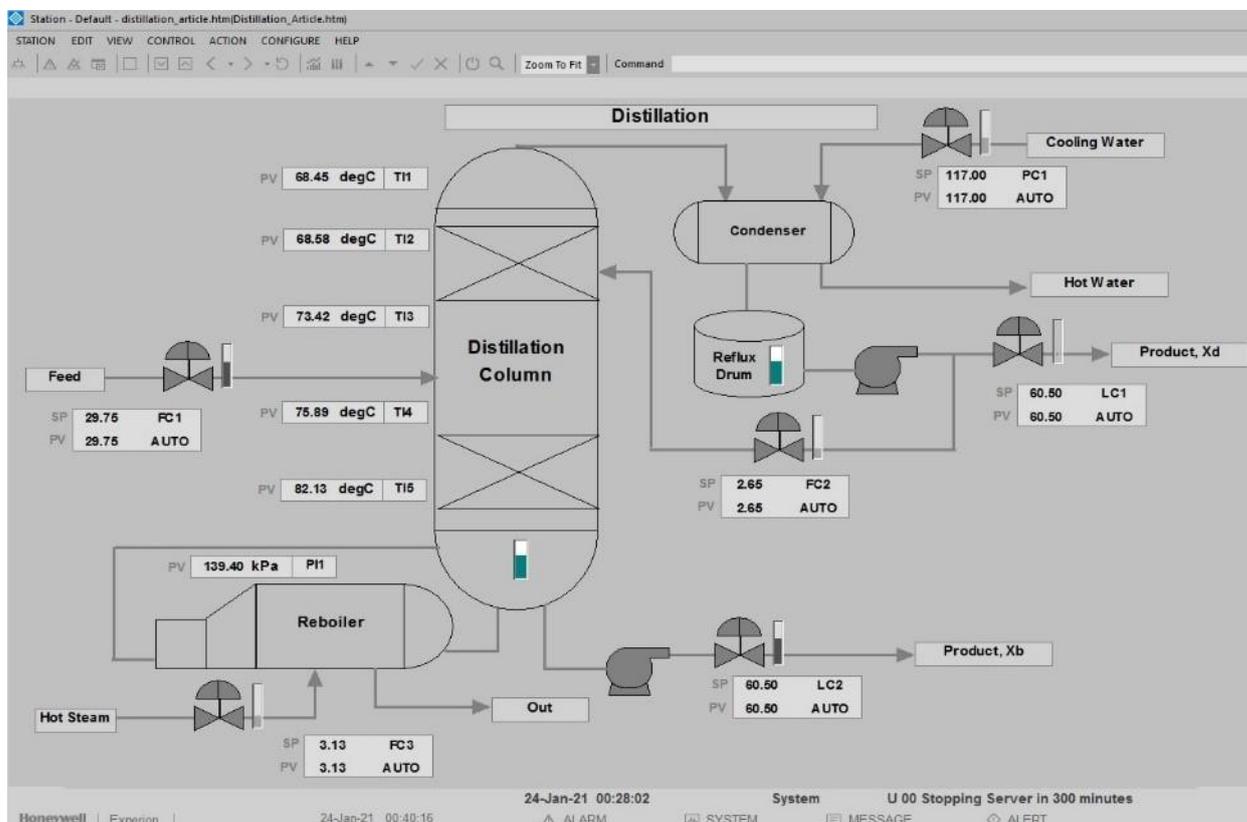


Рисунок 5.5 – Обычная мнемосхема функционирования ДК используемая на производстве

### 5.3.2 Высокоэффективная мнемосхема технологического процесса ДК

Для реализации высокоэффективных мнемосхем современные дисплеи ведущих производителей систем автоматизации (Honeywell, Rockwell, Allen Bradley) создаются с учётом стандартов ANSI/ISA 101.01.2015 «Человеко-машинные интерфейсы для автоматизации процессов» и ANSI/ISA 18.2-2016 «Управление системами сигнализации для промышленности». В данных стандартах содержится информация о цветовых палитрах, принципах отображения объектов, которые требуют незамедлительного внимания операторов, например сигнал об аварийной ситуации, или об изображении ключевых критических параметров системы, которые должны быть максимально удобными и простыми в распознавании, для того чтобы инженер или оператор смог выбрать правильное решение по устранению неполадки. Стандарт ISO 9241 210-2010 объясняет принципы построения и рекомендации для реализации систем человеко-машинного взаимодействия.

Изображение разработанных высокоэффективных операторских дисплеев установки дистилляционной колонны с использованием компонентов ASM приведены на рисунках 5.6 и 5.7 для различных условий эксплуатации.

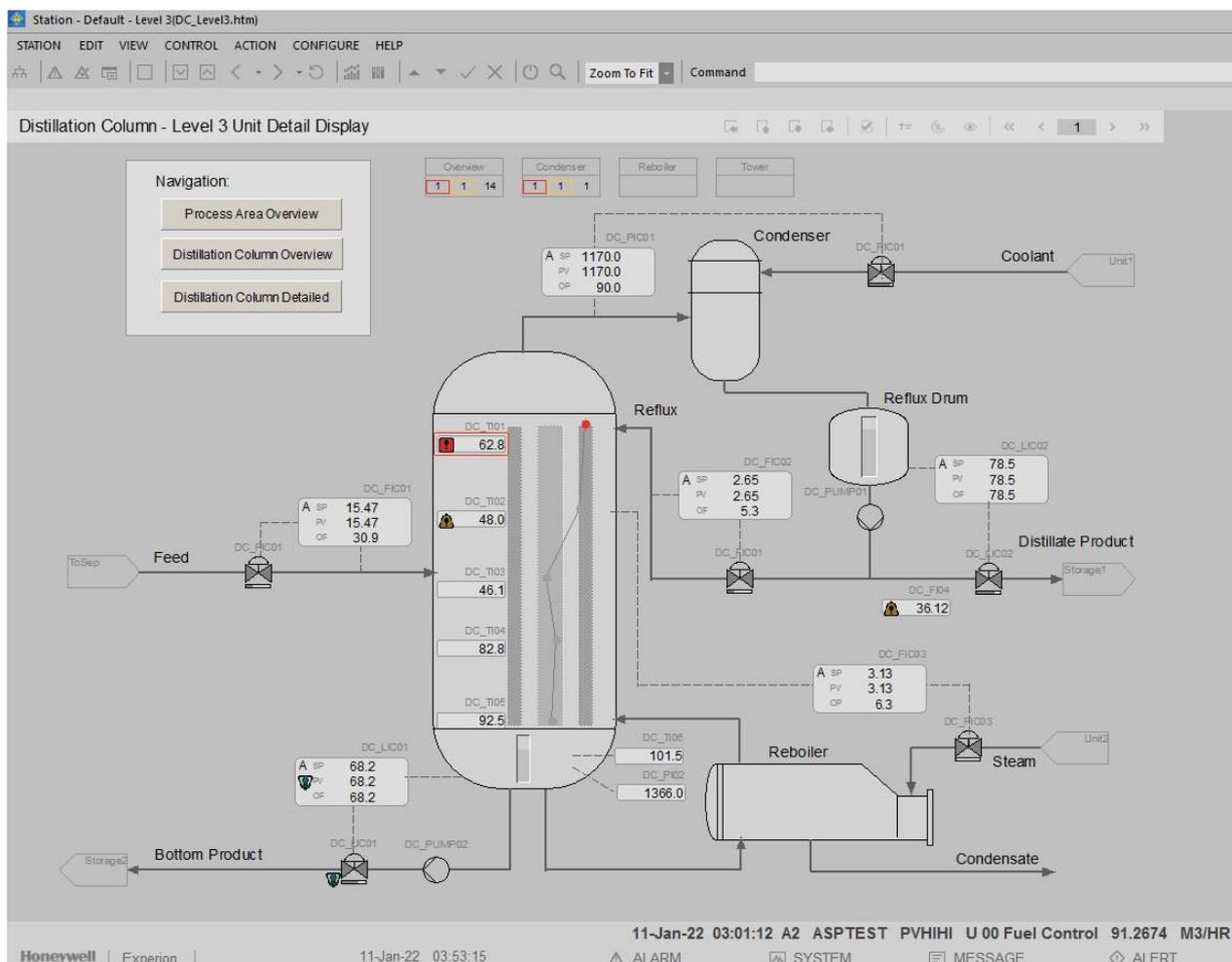


Рисунок 5.6 – Высокоэффективная мнемосхема функционирования ДК в светлом исполнении

Согласно консорциуму «Abnormal Situation Management» (ASM) в дистрибутив Experion PKS включен инструмент HMIWeb Advanced Solution Pack, что является лицензируемой функцией, которая предназначена для создания операторских дисплеев максимально безопасного и эффективного использования.

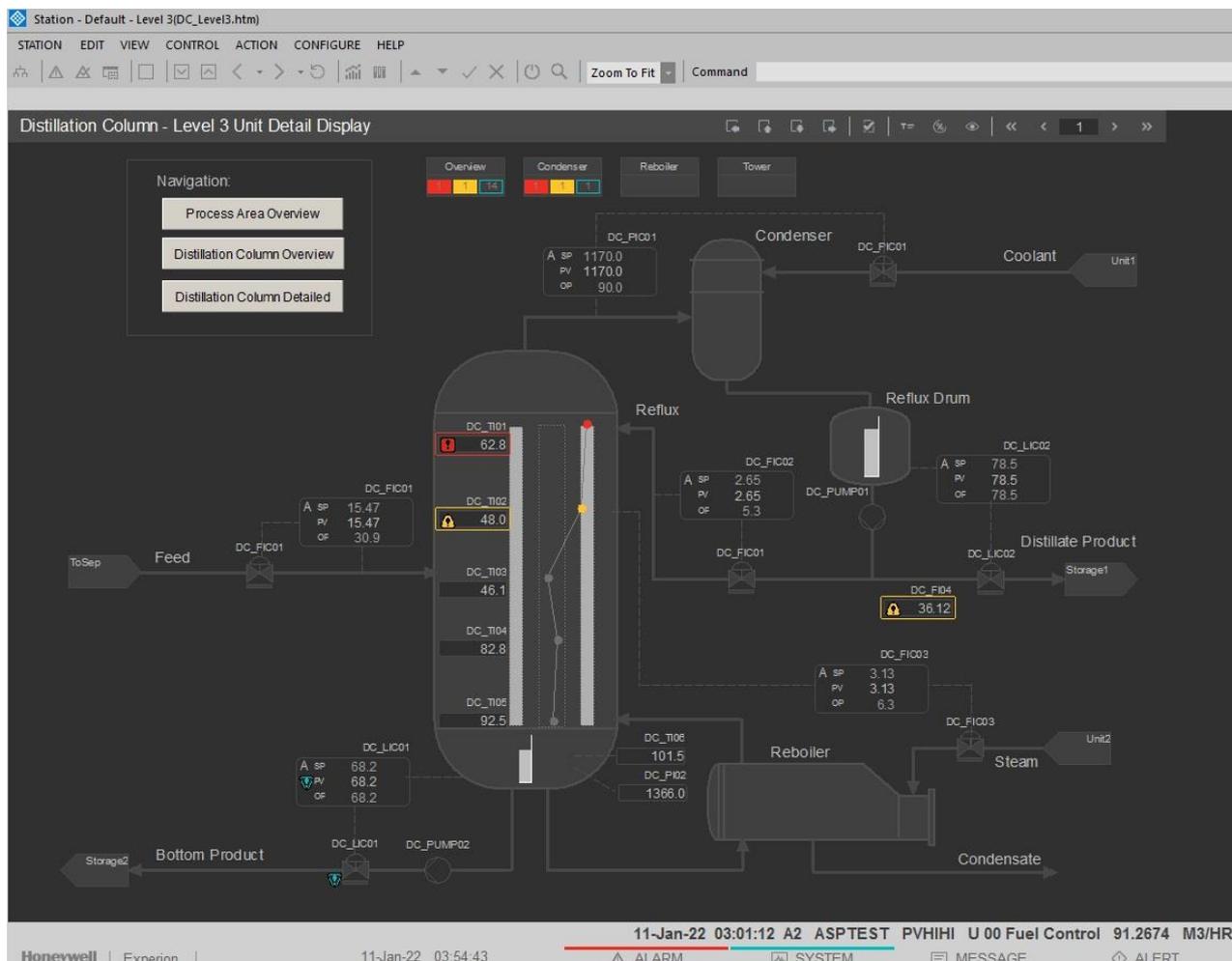


Рисунок 5.7 – Высокоэффективная мнемосхема функционирования ДК в тёмном исполнении

Отображение температурного профиля внутри объекта дистилляционной колонны с помощью ломанных линий позволяет лучше отслеживать оператором номинальные рабочие характеристики объекта управления и решать вопросы по ликвидации аварий при внештатных ситуациях.

### 5.3.3 Когнитивная мнемосхема технологического процесса ДК

Проведены исследования по визуальному восприятию информации с мнемосхем для студентов и преподавателей Акционерного Общества «Казахстанско-Британского Технического Университета». В опросе участвовало 162 человека из них 44.4% женщин и 55.6% мужчин в возрасте от 18 до 31 года. Результаты эксперимента позволили выявить закономерности в области

фокусировки человеческого зрения на операторский экран. Разработана дистанционная методика анкетирования и тест, состоящий из вопросов на тему «Когнитивное восприятие информации». При разработке когнитивных мнемосхем впервые учитываются особенности восприятия информации у дальтоников, а также людей, владеющих правой или левой рукой в качестве основной.

В результате эксперимента определено, что проблемы со зрением существует у 67.3 % опрошенных, из них 34.6% со слабой миопией, 27.8% с сильной миопией и 3% с гиперметропией. Помимо этого, 1.9% опрошенных имеют цветовую слепоту (дальтонизм).

Перед респондентами (вне зависимости от состояния зрения) были представлены НМІ дисплеи с операторскими мнемосхемами и предложено указать какой графический объект определён в первую очередь. На рисунке 5.7 предложен вариант мнемосхемы (разделённой условно на семь областей) для определения фокусировки внимания обучающимся.

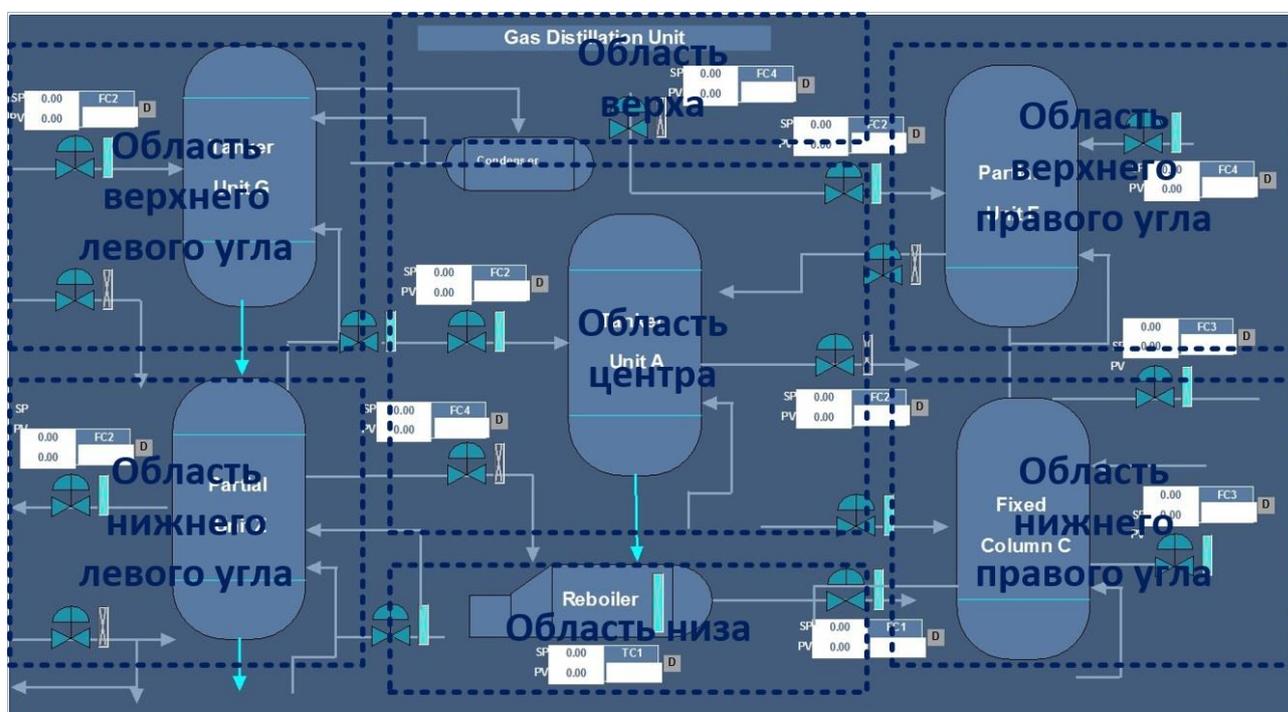


Рисунок 5.7 - Вариант мнемосхемы для определения фокусировки внимания по семи областям

В исследованиях [105,106] говорится, что большинство людей с нормальной остротой зрения воспринимают информацию следующим образом: лучше всего усваивается информация расположенная на дисплее в правом верхнем углу (33% внимания), левый верхний угол учебного поля (28%), правый нижний (23%) и левый нижний угол (16 %).

На рисунке 5.8 представлены результаты опроса, которые показывают процентное соотношение областей, привлёкшее внимание в первую очередь.

**Какой объект на мнемосхеме был прочтён в первую очередь? (162 ответа)**

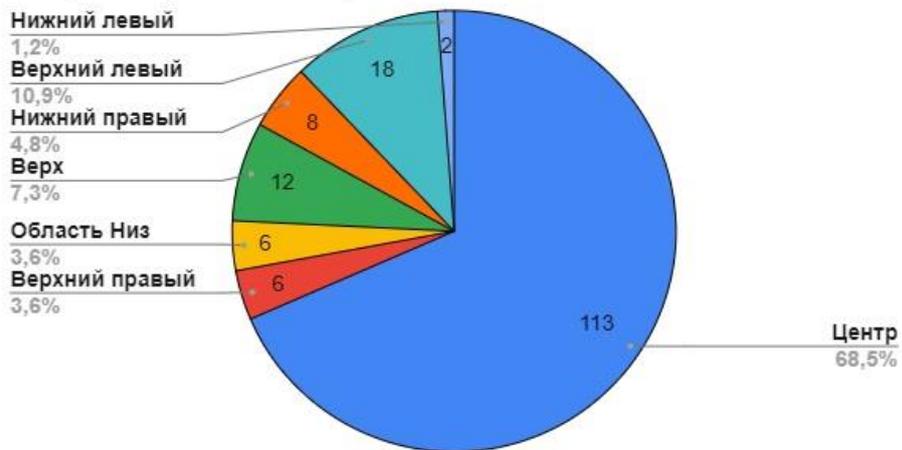


Рисунок 5.8 - Процентное соотношение фокусировки внимания для семи областей мнемосхемы

Наибольшее внимание притягивает центр мнемосхемы (68,5%), затем верхний левый угол (10,9%), область верха по середине экрана (7,3%) и т.д. Меньше всего внимания привлекает нижний левый угол (1,2%).

Далее на рисунке 5.9 предлагается вариант мнемосхемы (разделённой условно на четыре области) для определения фокусировки внимания.

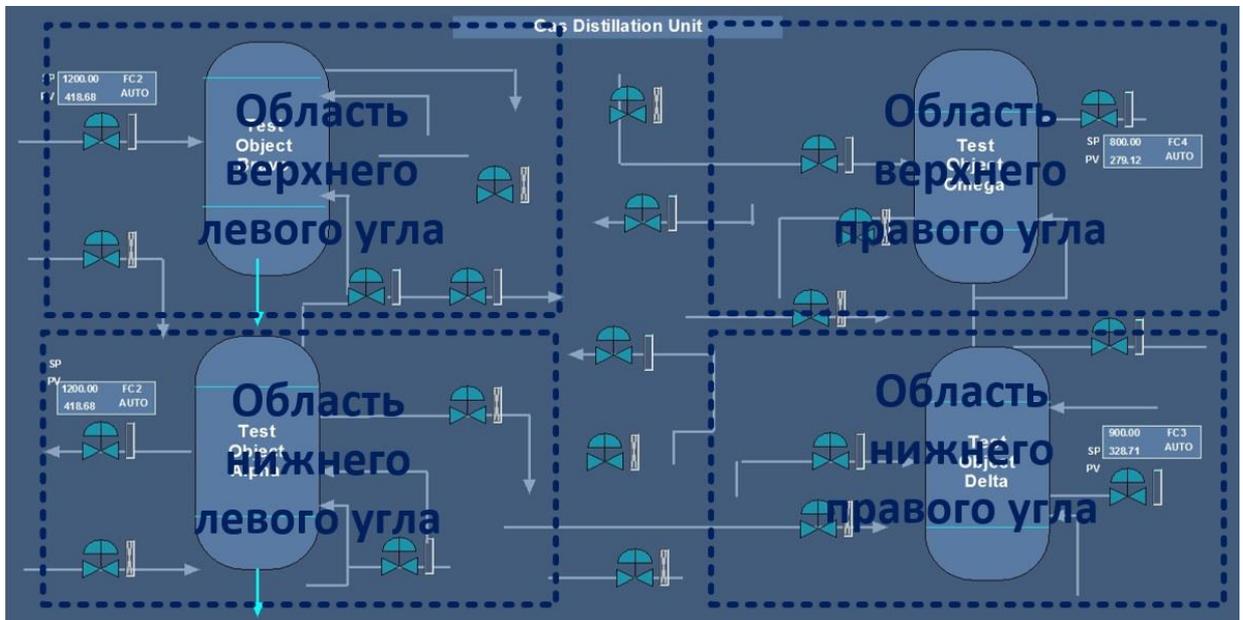


Рисунок 5.9 - Вариант мнемосхемы для определения фокусировки внимания по четырём областям

На рисунке 5.10 показано процентное соотношение фокусировки внимания. Определено, что ярко выражено внимание к верхнему левому углу операторского экрана (45,5%) и верхнему правому углу (42,4%). Таким образом,

нижняя область экрана неинформативна и не предназначена для расположения критически важной информации.

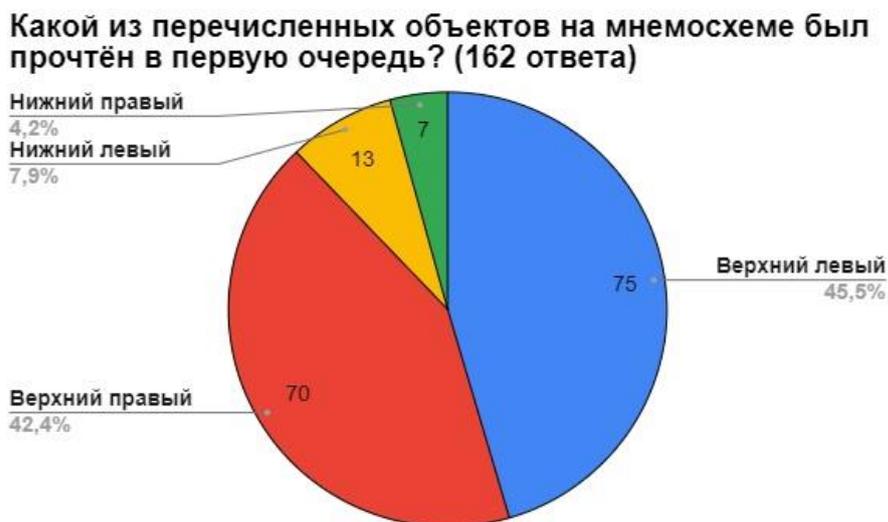


Рисунок 5.10 - Процентное соотношение фокусировки внимания для четырёх областей мнемосхемы

Рассмотрим статистику для людей, имеющих проблемы со зрением. На рисунке 8 представлены статистические данные для людей с миопией.

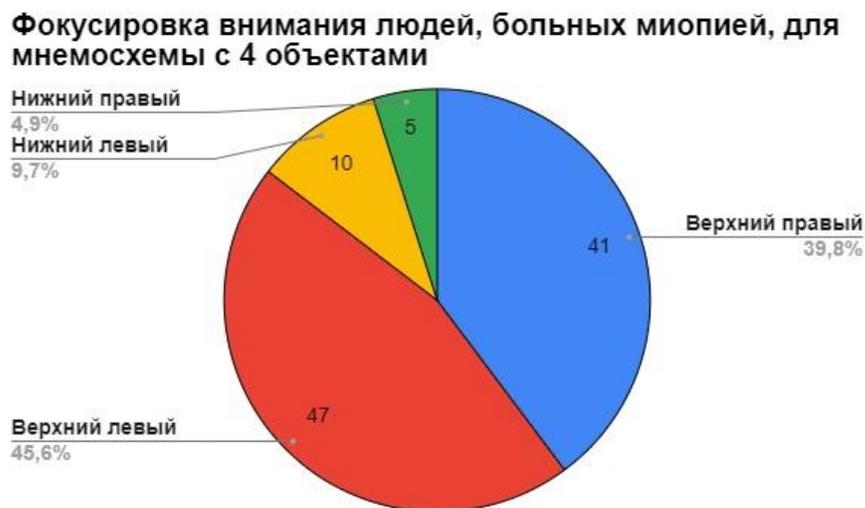


Рисунок 5.11 - Фокусировка внимания на мнемосхеме у людей с миопией

Как видно из круговой диаграммы, у людей с близорукостью внимание акцентируется на верхнюю левую область НМІ-дисплея (45,6% опрошенных) и чуть менее на верхнюю правую область (39,8%). По результатам анализа опроса можно заключить, что расположение наиболее важной информации на мнемосхеме для людей с миопией предпочтительно располагать в верхнем левом углу монитора.

Также получены результаты по восприятию графической информации у людей сенестралов (леворуких) и декстралов (праворуких). Из 162 респондентов

оказалось 4,9% сенестралов, 92% декстралов и 3,1% владеющих двумя руками (амбидекстры). В зависимости от того, является ли человек сенестралом или декстралом (для мнемосхемы с четырьмя объектами) статистика выглядит следующим образом: люди, владеющие левой рукой, заостряли внимание на верхний правый угол в 87,5% случаев. В тоже время у респондентов - декстралов наоборот преобладает левый верхний угол в 47,3% случаях.

На рисунках 5.12 и 5.13 приведены процентные соотношения восприятия информации у сенестралов и декстралов.

**Восприятие объектов у сенестралов на мнемосхеме с четырьмя объектами**

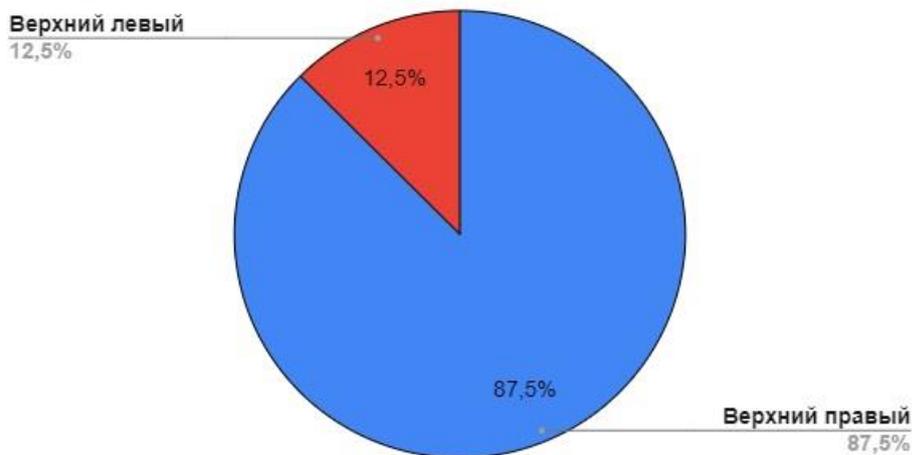


Рисунок 5.12 - Восприятие объектов на мнемосхеме у сенестралов

**Восприятие объектов у декстралов на мнемосхеме с четырьмя объектами**

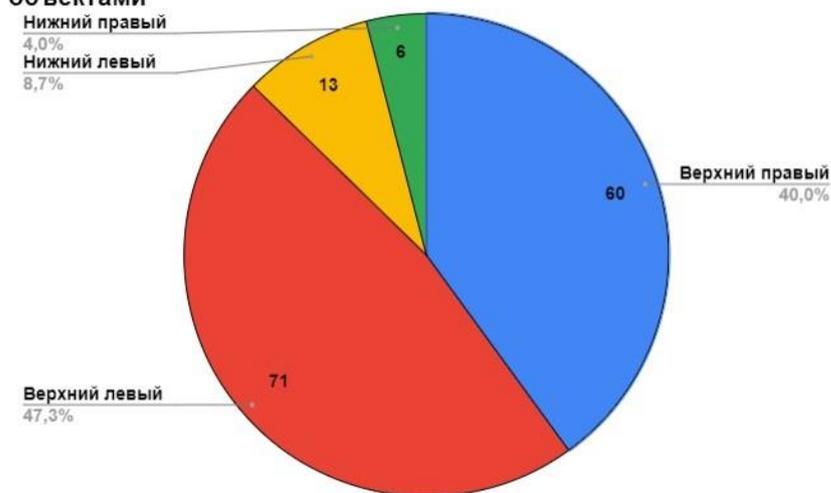


Рисунок 5.13 - Восприятие объектов на мнемосхеме у декстралов

Для поиска наиболее подходящей световой гаммы, респондентам представили два варианта оформления мнемосхемы: стандартный серый (вариант 1 на рисунке 5.14) и цветной (вариант 2 на рисунке 5.14). Обучающимся предложили определить какой вариант наиболее приемлем для длительного визуального контакта.

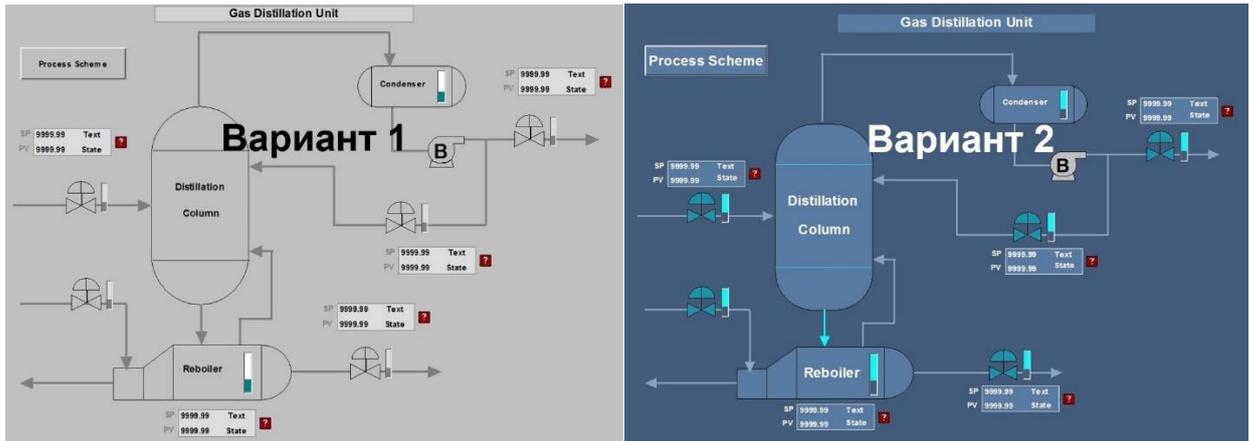


Рисунок 5.14 - Когнитивная мнемосхема для определения лучшей цветовой гаммы

По результатам опроса выявлено, что 81.8% опрошенных предпочли цветной вариант мнемосхемы, оформленный синими тонами, несущий меньшую нагрузку на зрительный аппарат, что подтверждает ранее проведённые исследования [11].

Так как больше половины обучающихся имеют различную степень миопии, то актуальна разработка когнитивных мнемосхем с учётом этих особенностей зрения. На рисунке 12 приведён пример разработанной когнитивной мнемосхемы для операторов с миопией.

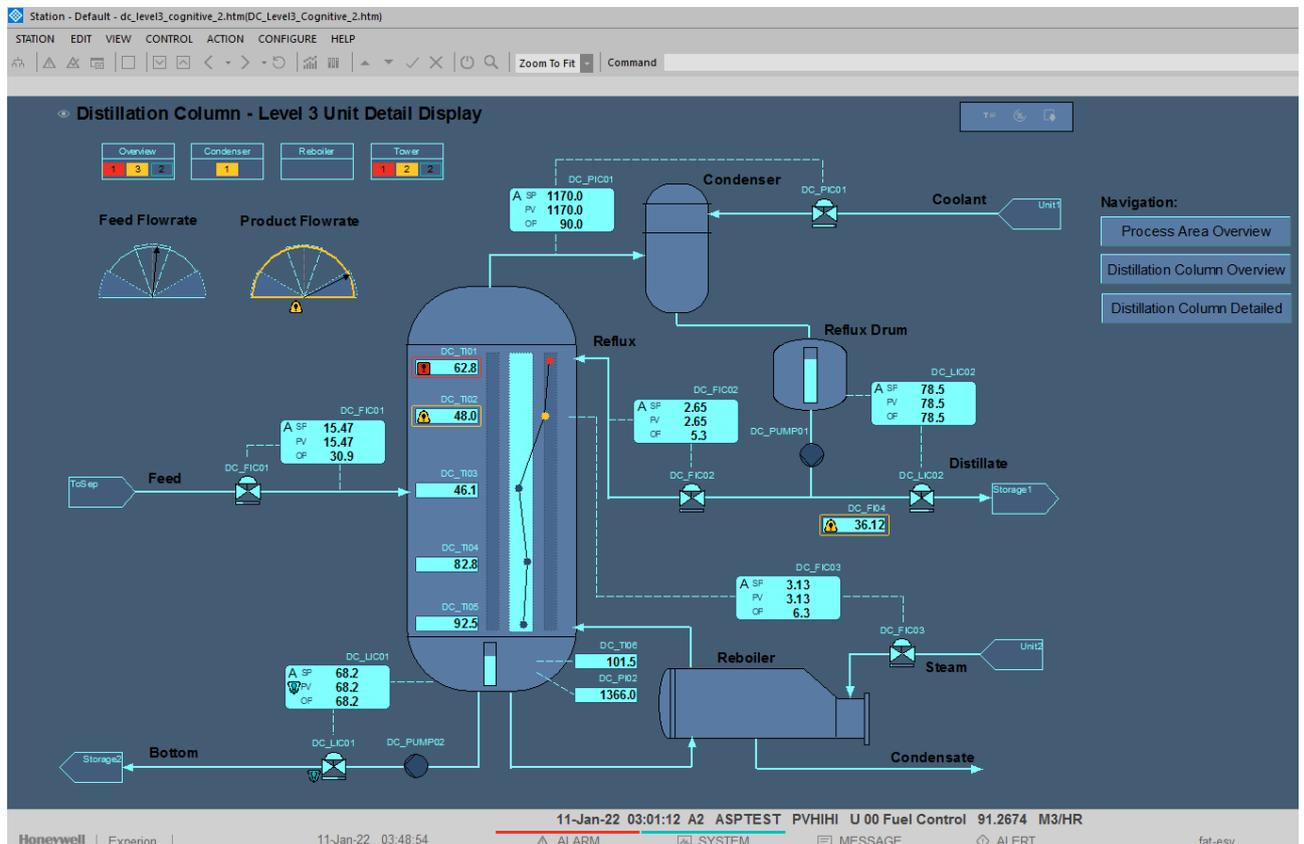


Рисунок 5.14 - Когнитивная мнемосхема для людей с миопией

Наиболее важная информация при миопии если оператор является-декстралом, согласно проведённым экспериментам, располагается в верхнем левом углу. Однако, если обучающийся является сенестралом, то лучше важную информацию сместить в правый верхний угол. Таким образом, разработка когнитивных мнемосхем, основанных на особенностях обработки визуальной информации человеком, позволит существенно снизить риски аварийных ситуаций при длительном наблюдении за несколькими консолями. Таблица каскадных стилей визуального оформления когнитивной мнемосхемы описывается в Приложении И, где используются цветовые оттенки из таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Цветовая палитра для когнитивной персонализированной мнемосхемы людей с учетом миопии и психофизических особенностей

Элемент CSS	Цвет RGB	Шестнадцатеричный цвет CSS
Заливка фона мнемосхемы	67; 92; 123	#435C7B
Заливка объектов оборудования, колонн	89; 122; 163	#597AA3
Заливка клапанов, насосов (в рабочем состоянии), линий трубопроводов, линий сигналов, рабочих границ индикаторной линии, цвет заголовка тэга	128; 255; 255	#80FFFF
Заливка точки на температурном профиле, отключённого состояния насоса	41; 75; 103	#294B67
Заливка аварийных границ индикатора температурного профайла, индикатора расходомера	72; 103; 142	#48678E
Цвет заголовков дисплея, оборудования и материальных потоков, индикатора стрелки	0; 0; 0	#000000
Цвет неотложной аварийной сигнализации (Hi-Hi Alarm)	255; 0; 0	#FF0000
Цвет аварийной сигнализации (Hi-Alarm)	255; 255; 0	#FFFF00
Цвет сигнализации низкого приоритета (Lo Alarm)	0; 206; 209	#00CED1

Разработанная когнитивная мнемосхема направлена на уменьшение нагрузки на зрительный аппарат человека и увеличение скорости распознавания образов в контексте генерируемых аварийных сигналов и событий в PCS Experion PKS.

## 5.4 Разработка программного обеспечения для настройки регуляторов на базе алгоритма АСО

Для удобной работы с алгоритмом муравьиных колоний предлагается создать программное обеспечение для задачи синтеза ПИД-регуляторов при наличии данных об объекте управления, ограничениях на коэффициенты регулятора и параметров алгоритма АСО. В качестве среды разработки будет применено приложение Mathworks Matlab с библиотекой Simulink и системой создания графического интерфейса GUIDE.

Общая структура программы представлена на рисунке 5.15.

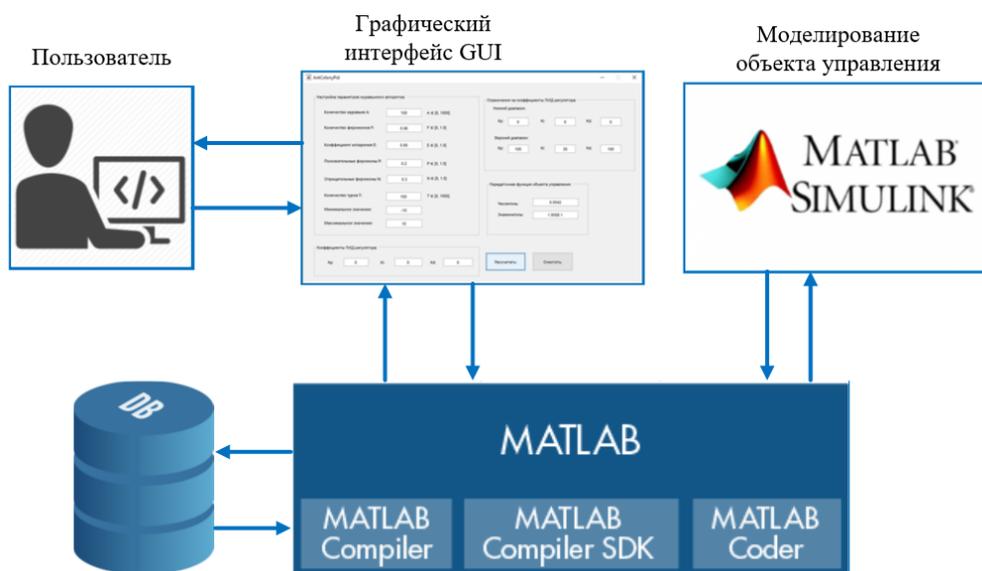


Рисунок 5.15 – Структура элементов программы АССО

Программное обеспечение MATLAB от компании Mathworks является одновременно высокоуровневым языком программирования и визуальной средой разработки для выполнения вычислительных расчётов и представления результатов в графическом виде. Особенностью MATLAB, как языка программирования является то, что выполнение кода на данной платформе позволяет сократить временные расходы на создание типовых математических задач, методов и алгоритмов.

MATLAB Simulink представляет собой современную среду имитационного моделирования, представляющую широкие возможности в области построения дискретных, непрерывных, линейных и нелинейных моделей технических систем.

Пользователь ПО взаимодействует с графическим интерфейсом, разработанным с помощью MATLAB GUIDE, где он определяет структуру объекта управления при помощи описания передаточной функции ОУ, задает параметры алгоритма, такие как количество муравьев, количество туров и т. д., а также определяет диапазон изменения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ .

Сразу же после запуска алгоритма включается симуляция модели системы, выполненной в среде Simulink, после чего компилятор MATLAB начинает обработку скрипта m-файла aso.m и aso\_cost.m. Алгоритм выполняется итерационно, после каждого шага обновляя коэффициенты блока PID (рисунок 4). Выходной сигнал (Output) поступает в MATLAB Workspace (рисунок 5.16) который взаимодействует с m-файлами алгоритма АСО. В Workspace хранятся все входные и выходные переменные и параметры модели, которые при необходимости можно передать в базу данных.

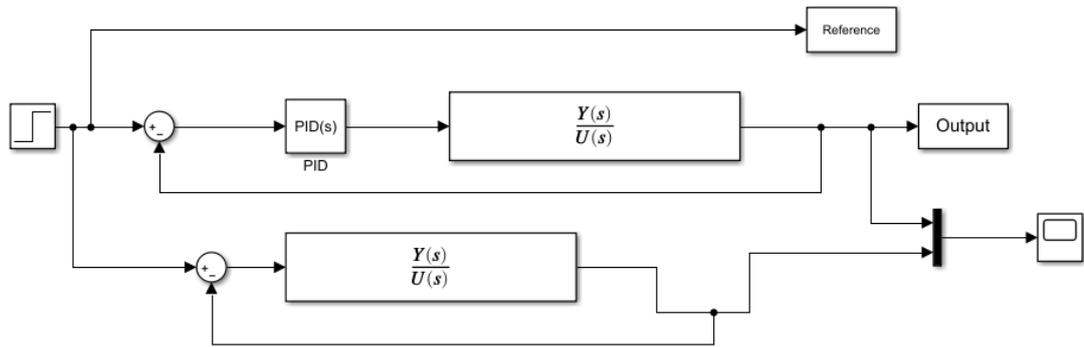


Рисунок 5.16 – Схема модели объекта управления в MATLAB Simulink

Графический интерфейс представлен на рисунке 5.17. Следует отметить, что при заполнении текстовых блоков с десятичной составляющей необходимо отделять целую часть при помощи точек.

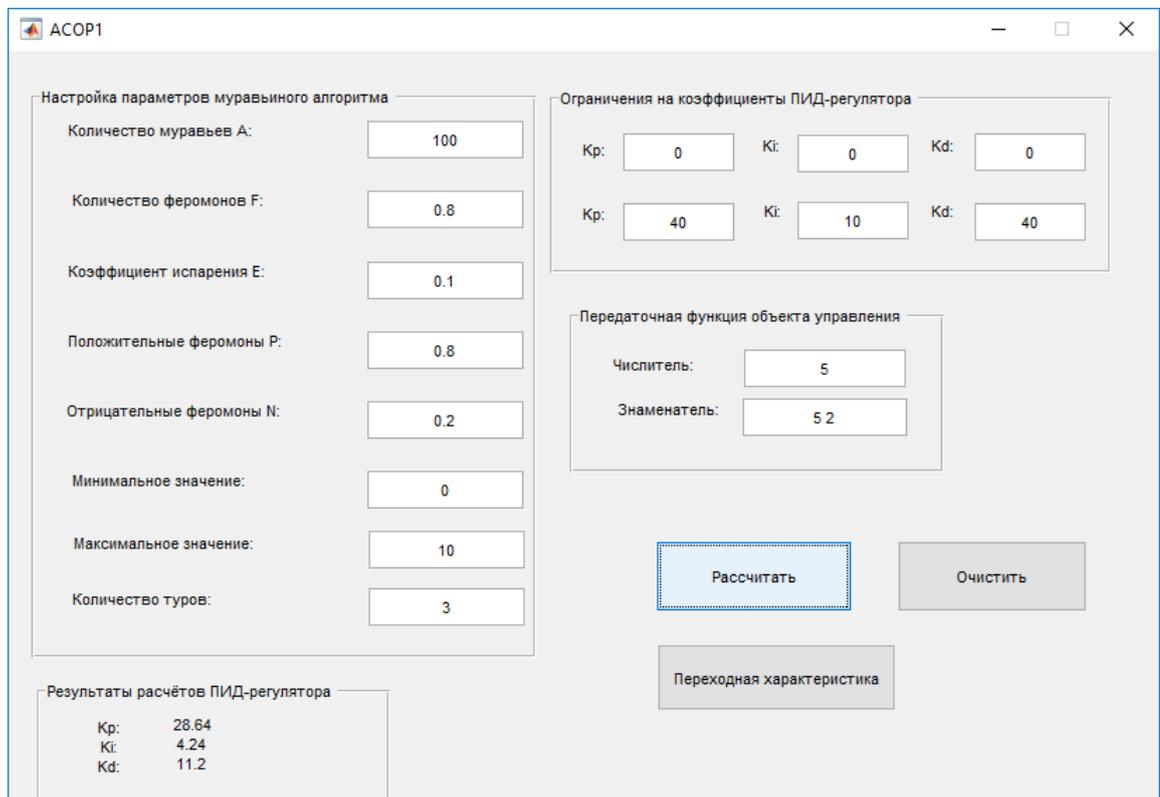


Рисунок 5.17 – GUI для программы «AntColonyPid»

Время выполнения программы зависит от диапазонов изменения параметров муравьиного алгоритма и ограничений на коэффициенты, а также от конфигурации персонального компьютера, на котором производится вычисления. Входные параметры изображены в таблице 5.3. Передаточная функция объекта заполняется по формуле (5.1):

$$G(s) = \frac{num(s)}{den(s)} = \frac{num(1)s^{nn-1} + num(2)s^{nn-2} + \dots + num(nn)s(nn)}{den(1)s^{nd-1} + den(2)s^{nd-2} + \dots + den(nd)s(nd)} \quad (5.1)$$

Таблица 5.3 – Входные параметры GUI

Название параметра	Тип данных	Диапазон изменения	Стандартное значение
Количество муравьев	integer	[0... 1000]	100
Количество феромонов	double	[0...1.0]	0.06
Положительные феромоны	double	[0...1.0]	0.2
Отрицательные феромоны	double	[0...1.0]	0.3
Число туров	integer	[0... 1000]	100
Минимальное значение	integer	[-10000 ... 10000]	-10
Максимальное значение	integer	[-10000 ... 10000]	10
Нижний диапазон $K_p$	double	[-10000 ... 10000]	0
Верхний диапазон $K_p$	double	[-10000 ... 10000]	100
Нижний диапазон $K_i$	double	[-10000 ... 10000]	0
Верхний диапазон $K_i$	double	[-10000 ... 10000]	30
Нижний диапазон $K_d$	double	[-10000 ... 10000]	0
Верхний диапазон $K_d$	double	[-10000 ... 10000]	100
Числитель передаточной функции	array		0.0042
Знаменатель передаточной функции	array		[1.9588 1]

Таким образом, для определения передаточной функции применяется два массива чисел «numerator» и «denominator». Порядок знаменателя должен быть больше или равен порядку числителя. Num (s) и den (s) содержат коэффициенты числителя и знаменателя в нисходящих степенях комплексной переменной s.

Следует отметить, что слишком маленький коэффициент испарения (Evaporation coefficient) увеличивает время выполнения алгоритма. Верхние и нижние диапазоны коэффициентов усиления  $K_p, K_i, K_d$  определяются в зависимости от технических характеристик контроллера, выполняющего роль регулятора. Количество туров влияет на скорость сходимости алгоритма оптимизации и величину ошибки вычисления. В приложениях Е, З, Ж представлен подробный листинг программы, выполненный в «MATLAB».

Системные требования, предъявляемые к ПК для запуска программы: операционная система Windows 7, 8, 8.1, 10, процессоры Intel или AMD x86-64 с четырьмя логическими ядрами и поддержкой инструкций AVX2, 2 гигабайта свободного места на жёстком диске, 4 гигабайта оперативной памяти, видеокарта с поддержкой технологии OpenGL 3.3 с 1 гигабайтом видеопамяти. Кнопка «Переходная характеристика» позволяет построить переходные процессы модели без управления и с ПИД-регулятором, после расчёта коэффициентов. В качестве управляющего сигнала принято единичное ступенчатое воздействие со значением «1».

#### 5.4.1 Инструкция по запуску программного обеспечения «ACCO (Ant Colony for complex object)»

1. Запустить приложение-установщик ACCO\_Installer находящееся в папке for\_redistribution с диска «ACCO (Ant Colony for complex object)» для решения задач управления сложными объектами (рисунок 5.18).

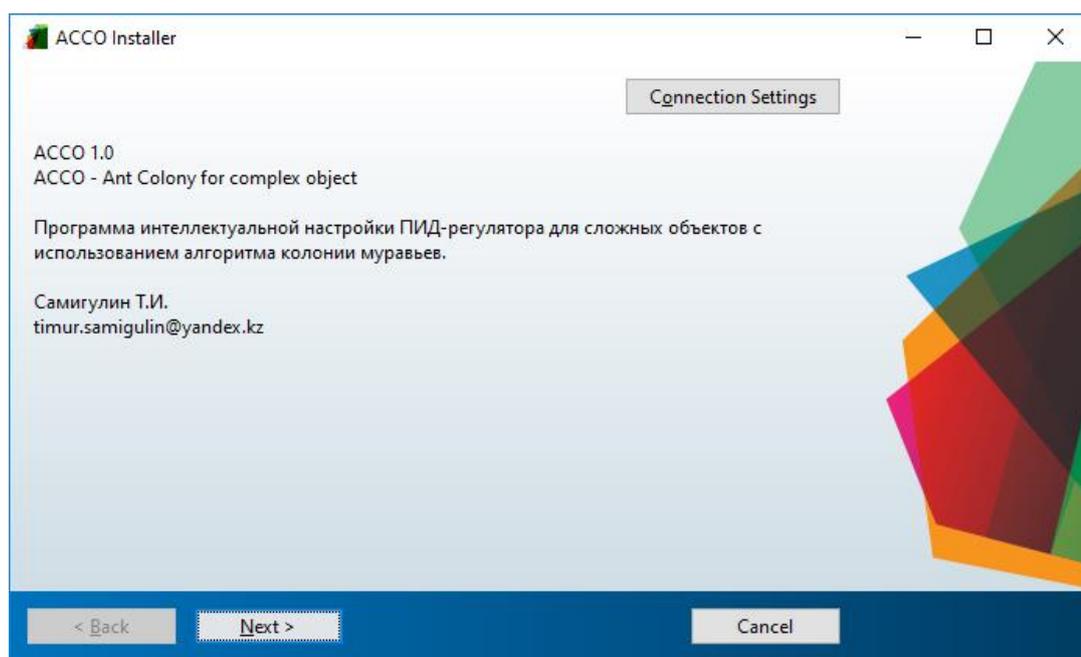


Рисунок 5.18 – Приложение-установщик ACCO\_Installer

2. Произвести установку приложения, поставить галочку «Add a shortcut to the desktop» для создания ярлыка на рабочем столе (рисунок 7).

3. Установщику программного обеспечения может потребоваться загрузка дополнительного компонента MATLAB Runtime R2017b, который будет автоматически предложен к установке. Необходимо указать путь сохранения файлов компонента и нажать клавишу «Next».

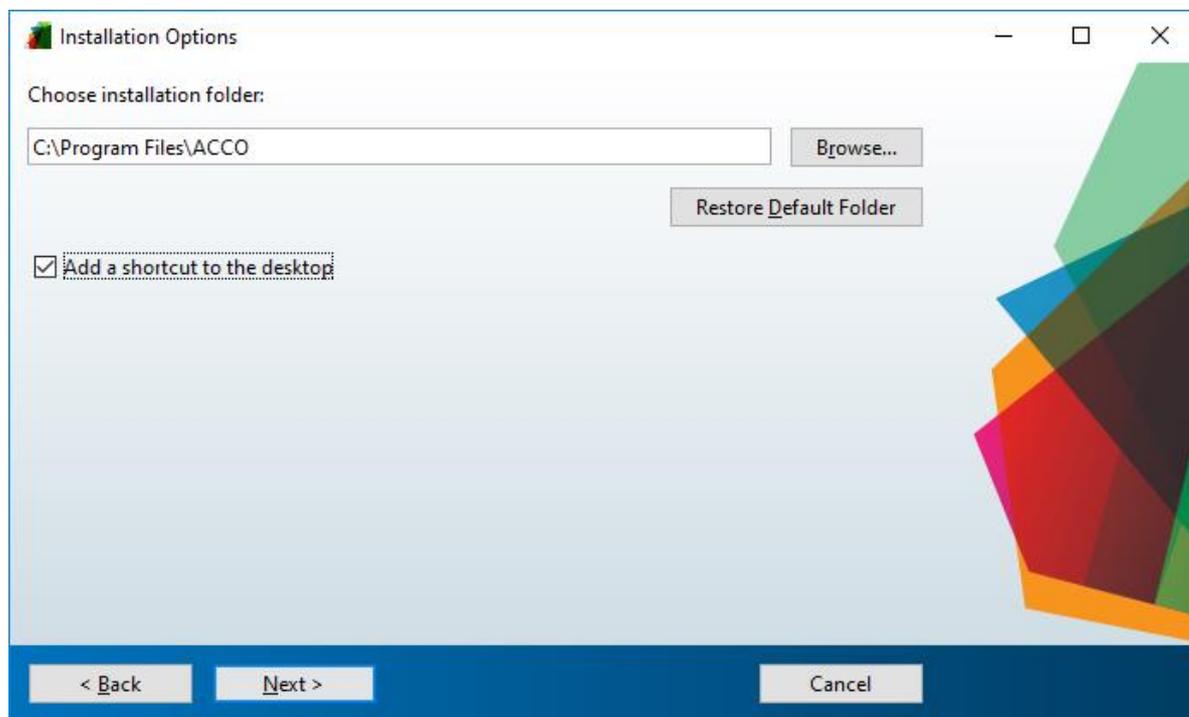


Рисунок 5.19 – Выбор папки для хранения программы и создание ярлыка на рабочем столе

4. Будет выведено сообщение об успешной установке (рисунок 8). Затем необходимо запустить ярлык приложения, расположенного на рабочем столе либо запустить приложение «ACCO (Ant Colony for complex object)» находящегося в папке Program Files\ACCO\application\ACCO.exe.

Листинг кода программы «ACCO (Ant Colony for complex object)» и описание графического интерфейса (GUI) дано в Приложении Ж. Описание алгоритма колонии муравьев дано в Приложении З. Описание целевой функции приведено в Приложении Е.

## 5.5 Разработка цифрового двойника дистилляционной колонны в программном обеспечении «Honeywell Unisim Design»

Программное обеспечение Unisim Design [107] предназначено для создания цифровых двойников предприятия и позволяет эффективно проектировать современные системы управления промышленными агрегатами в газовой, химической, нефтяной промышленности и в энергетике, позволяет выполнять

операции мониторинга и анализа внештатных ситуаций и оптимизировать процессы.

Программное обеспечение Unisim Design предназначено для расчёта транспортных задач, физических и кинетических реакций. Моделирование с помощью технологии EO позволяет увеличить скорость расчётов в 10 раз. В библиотеке Unisim Design имеются готовые модели теплообменников различных конфигураций, которые выведены в отдельное приложение для проектирования и моделирования. Каждый год выполняется обновление программного продукта Unisim Design до нового релиза (актуальный релиз R490), в который добавляются новые кинетические реакторы для нефтегазовой отрасли.

Процесс моделирования состоит из двух основных этапов – создание модели в устойчивом состоянии (Steady-State) для расчёта дистилляционной колонны и разработка динамической модели для симуляции объекта управления с интеллектуальным управлением.

Алгоритм разработки модели в Unisim Design следующий (рисунок 5.20):

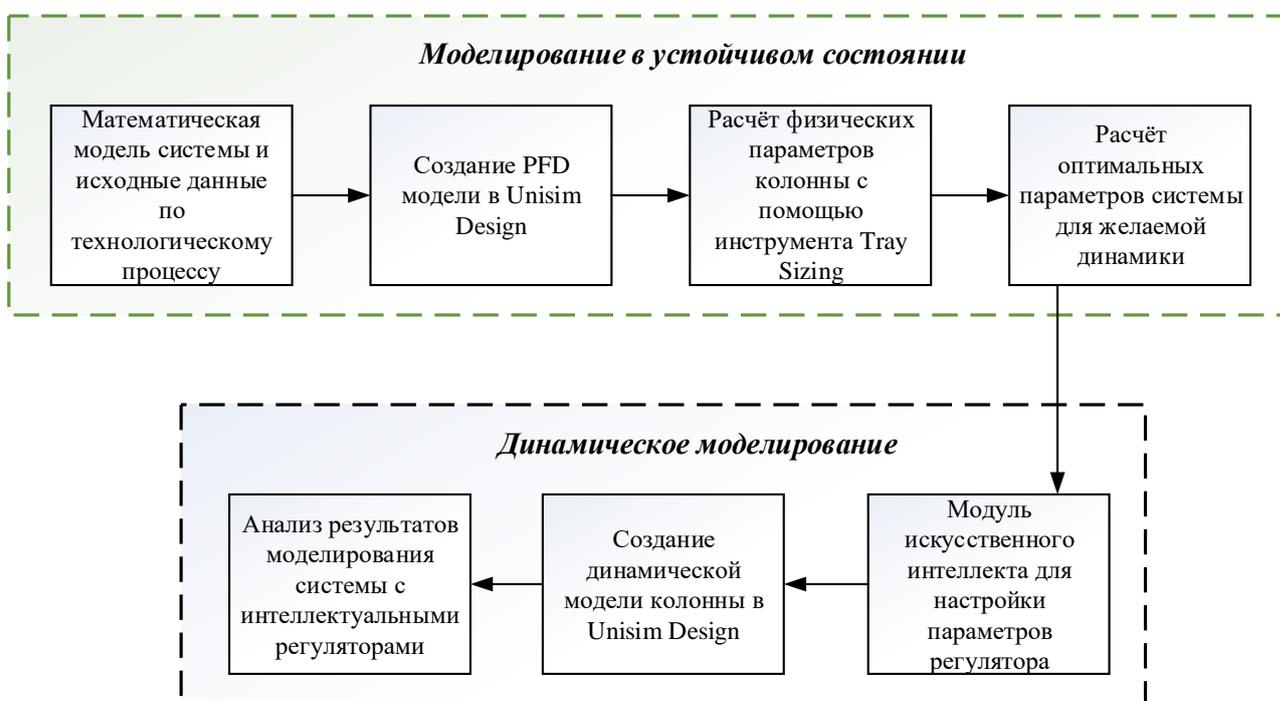


Рисунок 5.20 - Структурная схема алгоритма разработки проекта в Unisim Design

Шаг 1. Определение состава газа и жидкостной модели «Peng-Robinson».

Шаг 2. Создание материальных потоков и их параметризация.

Шаг 3. Проектирование дистилляционной колонны. Применение утилиты Input Expert.

Шаг 4. Применение приложения оптимизации для определения желаемых характеристик.

Шаг 5. Операция Tray Sizing для определения физических параметров тарелок колонны.

Шаг 6. Определение динамических спецификаций давление/скорость потока для входных потоков.

Шаг 7. Определение клапанов и регуляторов, настроенных с помощью алгоритмов ИИ и переход системы на динамическую модель.

### 5.5.1. Модель дистилляционной колонны в установившемся состоянии

Состав входного потока содержит компоненты, описанные в таблице 5.4. Задача технологического процесса заключается в получении смеси нормального бутана и изобутана в концентрации (98%) и очистка газа от тяжелых углеводородов (компоненты C5 и выше).

Таблица 5.4 – Компоненты газа и их концентрация

Наименование компонента	Химическая формула	CAS номер	Процент в молях, %
Изобутан	$C_4H_{10}$	75-28-5	26,65
Изопентан	$C_5H_{12}$	78-78-4	20,95
Нормальный бутан	$C_4H_{10}$	106-97-8	19
Нормальный пентан	$C_5H_{12}$	109-66-0	10,05
Гексан	$C_6H_{14}$	110-54-3	7,26
Гептан	$C_7H_{16}$	142-82-5	3,23
Метилциклопентан	$C_6H_{12}$	96-37-7	
Додекан	$C_{12}H_{26}$	112-40-3	2,02
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	1120-21-4	1,94
Бензин	$C_6H_6$	71-43-2	1,61
Циклопентан	$C_5H_{10}$	287-92-3	1,61
Октан	$C_8H_{18}$	111-65-9	1,21
Пропан	$C_3H_8$	74-98-6	0,00
Нонан	$C_9H_{20}$	111-84-2	0,00
Толуол	$C_7H_8$	108-88-3	0,00
О-Ксилол	$C_8H_{10}$	95-47-6	0,00
Этилбензол	$C_8H_{10}$	100-41-4	0,00
124-Триметилбензен	$C_9H_{12}$	95-63-6	0,00

Входящий поток сырья имеет следующие параметры, изображенные на рисунке 5.21(а): температура 118°C, давление 1471 кПа, массовый поток –  $15.47619 \cdot 10^3$  кг/час [1]. Концентрация компонентов в соотношении молей на единицу вещества задаётся в соответствии с таблицей 5.4 и показана на рисунке 5.20(б).

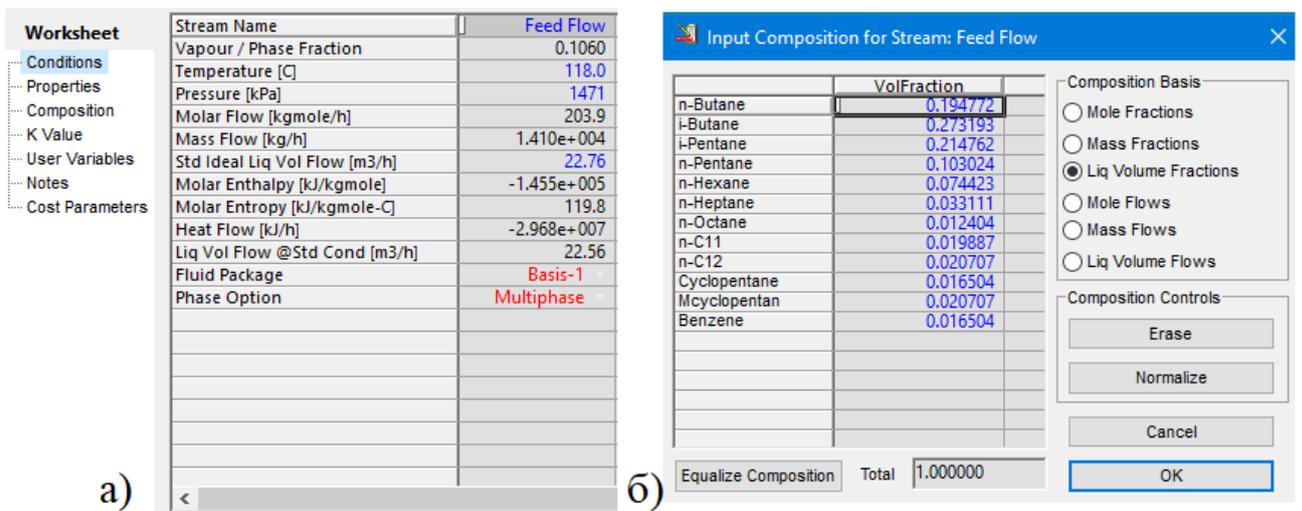


Рисунок 5.21 – Настройка параметров входящего потока: а) условия входящего потока в среде Unisim Design; б) концентрация компонентов

Следующим шагом необходимо сконфигурировать дистилляционную колонну с помощью инструмента Input Expert. На рисунке 5.22 отображено основное окно параметров конфигуратора колонны, где заданы материальные потоки Feed Flow (входящий поток в ДК), Distillate Flow (поток дистиллята), Bottoms Flow (поток с нижней части колонны) и энергетические потоки Condenser Q (энергия конденсатора), Reboiler Q (энергия ребойлера).

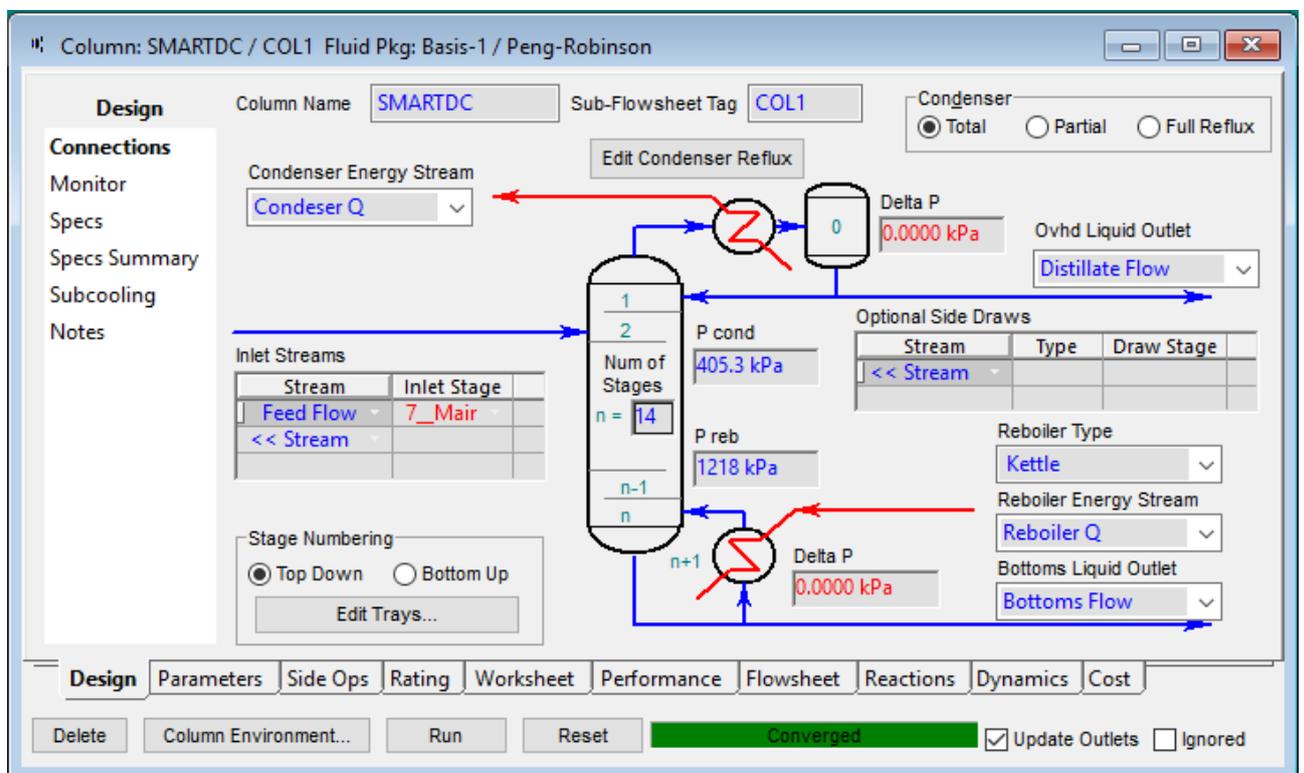


Рисунок 5.22 – Основное окно конфигурации колонны в Unisim Design

Согласно спецификации колонны для управления процессом дистилляции необходимо выбрать 14 тарелок. Питание колонны с материальным потоком Feed Flow поступает на седьмую стадию. Для оптимального расчёта колонны необходимо задать дополнительные спецификации, такие как: чистота дистиллята (доля компонентов изобутан, бутан в потоке Distillate равная 0,98), чистота продуктов с нижней части колонны (доля компонентов изобутан, бутан в потоке Bottoms равная 0,02). Активными спецификациями выбраны скорость потока дистиллята (8,78 м<sup>3</sup>/ч) и чистота дистиллята. Спецификации Reflux Ratio, Reflux Rate, Btms Prod Rate, Bottoms Purity используются только для расчётов ошибки (режим «Estimate»). При данной конфигурации системы степень свободы колонны равняется нулю, что позволяет выполнить расчёт колонны. Решатель Unisim настроен на максимальное количество итераций равное 500, допустимая ошибка вычислений – 1.0e-05.

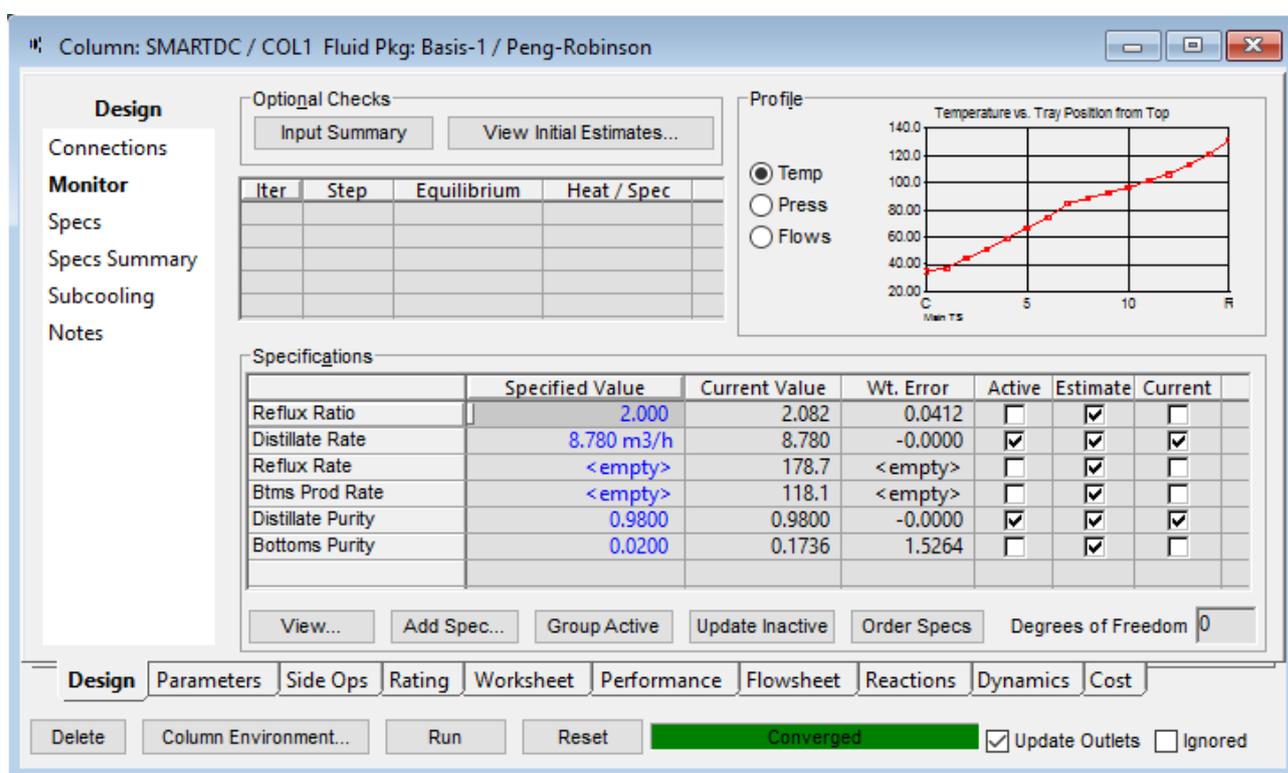


Рисунок 5.23 – Таблица спецификаций дистилляционной колонны

На рисунке 5.23 представлены результаты моделирования в устойчивом состоянии. При скорости потока дистиллята 8,7774 м<sup>3</sup>/ч на выходе с колонны получается материальный поток, содержащий смесь бутанов с концентрацией 97,74%. Результаты расчётов в устойчивом состоянии с поставленной задачей справились. Для получения более точного результата возможно уменьшение параметра «Скорость потока дистиллята», что повысит чистоту дистиллята на выходе из агрегата. На рисунке 5.24 представлена таблица концентраций и скорости материальных потоков после расчёта колонны.

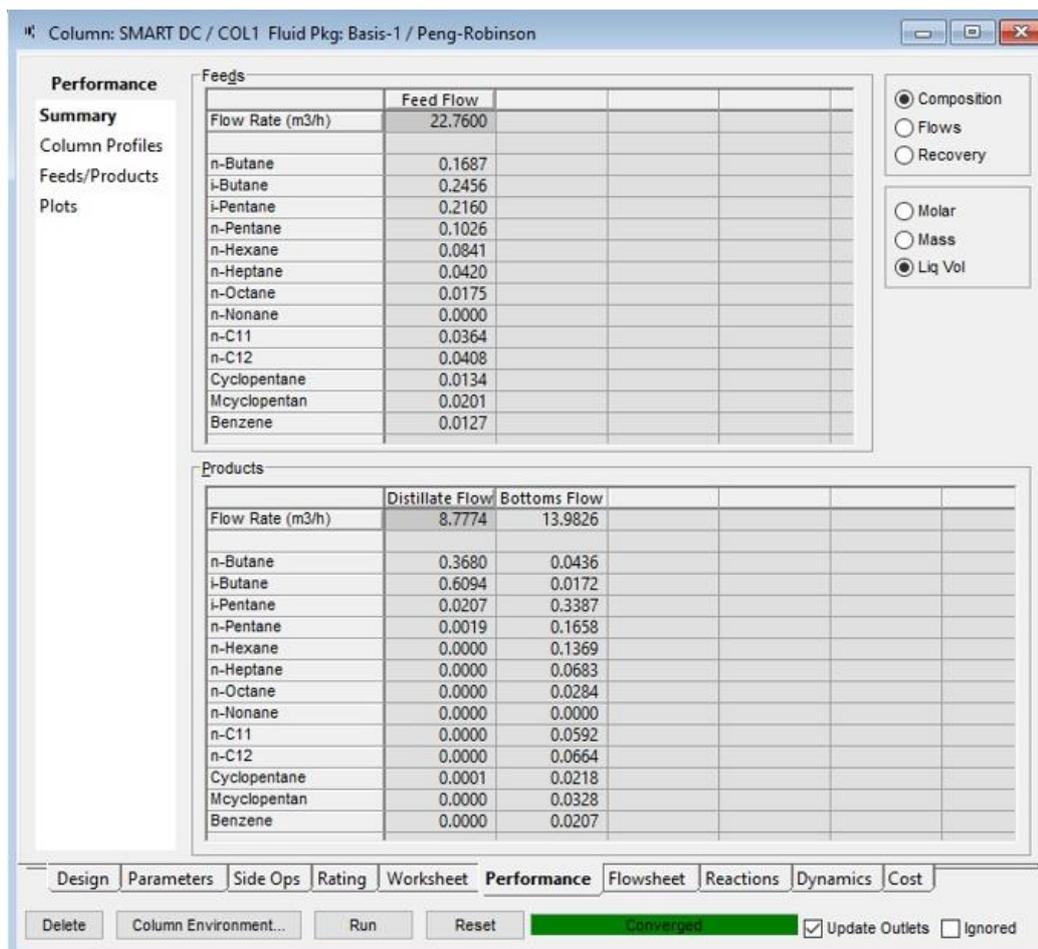


Рисунок 5.24 – Результаты расчётов колонны в устойчивом состоянии

На рисунке 5.25 изображено изменение концентрации отдельных углеводородов в зависимости от стадии процесса (номера тарелки), начиная от конденсатора, заканчивая ребойлером.

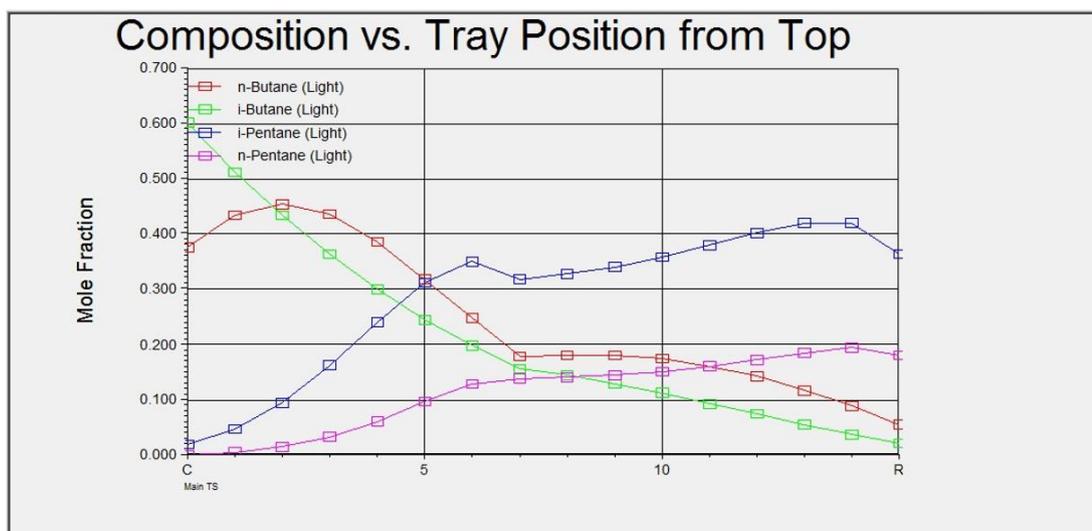


Рисунок 5.25 – Профиль концентраций компонентов в зависимости от стадии ДК

Следующим шагом необходимо выполнить расчёт параметров тарелок с помощью утилиты Tray Sizing. Выбран клапанный тип тарелок, так как он обеспечивает эффективный массообмен, при этом имея простую конструкцию. Результаты расчётов изображены на рисунке 5.26. Синим цветом выделены значения, которые утилита Tray Sizing оптимально подобрала в соответствии с технологическим процессом. Черным цветом выделены расчёты остальных параметров с помощью решателя Unisim Design.

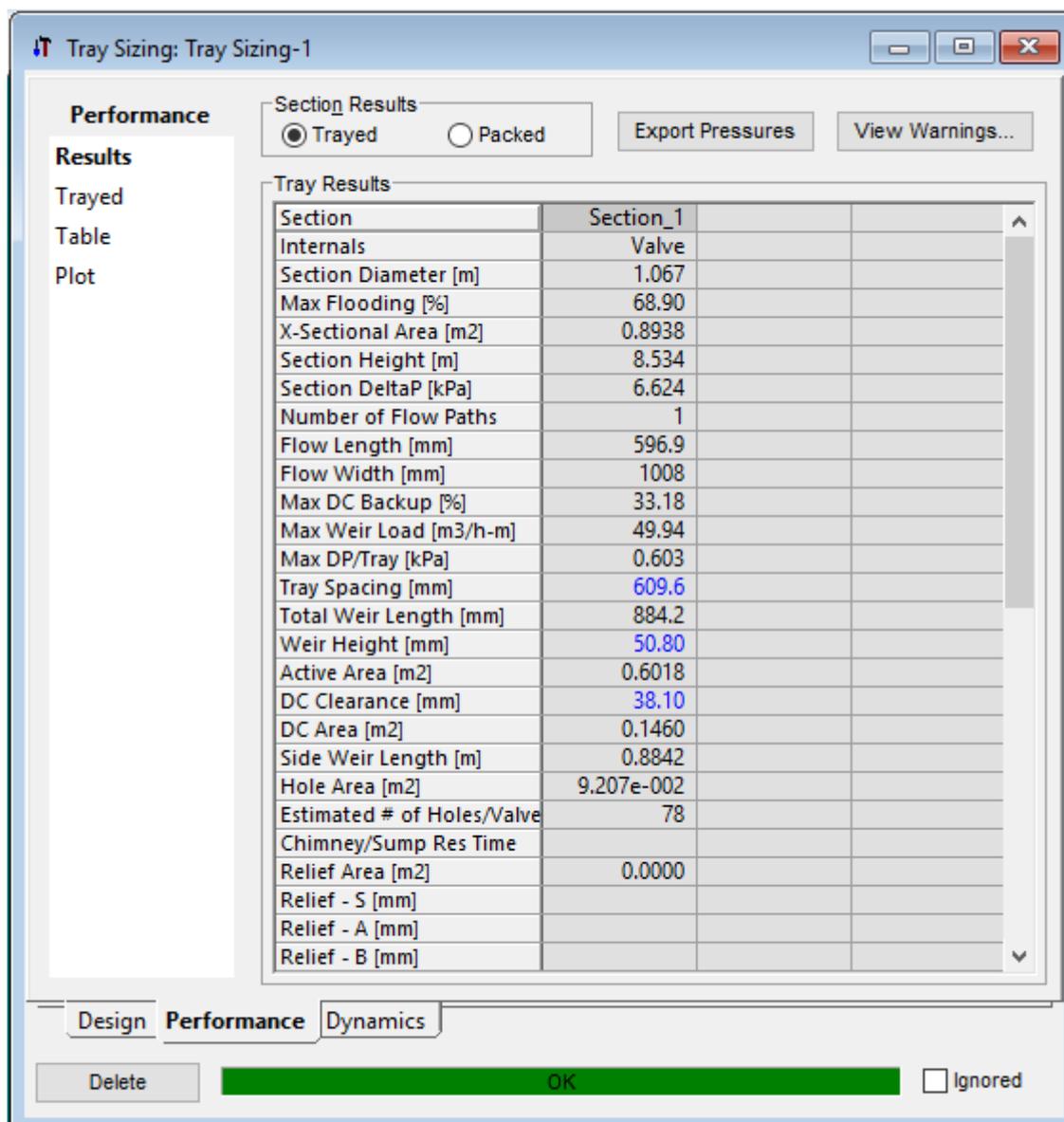


Рисунок 5.26 – Результат расчёта конфигураций тарелок клапанного типа в ДК

Таким образом получена конфигурация тарелок колонны, имеющие следующие параметры: общая длина перегородки тарелки равна 644,6 мм; высота перегородки 50,8 мм; расстояние между тарелками 609,6 мм; диаметр секции равен 1,067 метров. Данная конфигурация обеспечивает перепад температур внутри колонны, как показано на рисунке 5.27.

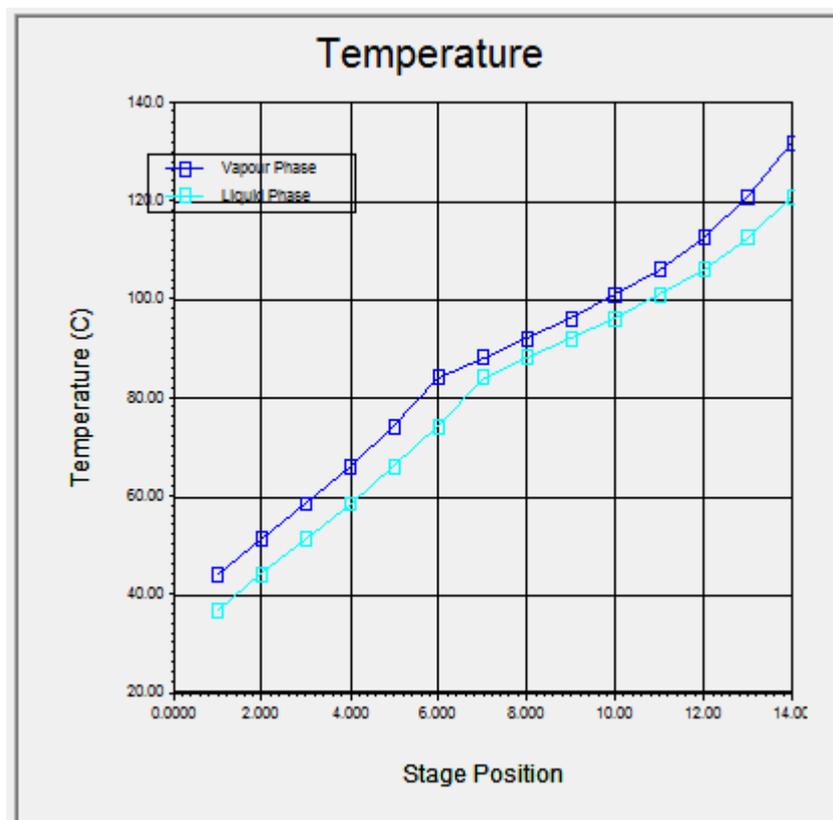


Рисунок 5.27 – График перепада температур между тарелками, после операции Tray Sizing

Таким образом, была получена модель в устойчивом состоянии, которая обеспечивает необходимые критерии качества процесса (98% бутанов в дистилляте).

Следующим шагом необходимо разработать динамическую модель, включающую в себя рассчитанные с помощью биоинспирированных алгоритмов искусственного интеллекта ПИ-регуляторы.

### 5.5.2 Модель дистилляционной колонны в динамическом режиме

Согласно исследованиям в работе [67] для LV структуры управления необходимо регулировать поток рефлюкса  $L$  и поток пара  $V$ , которые являются ключевыми параметрами процесса, влияющие на результат очистки газа. Разработана динамическая модель системы, содержащая 4 контроллера поддерживающие номинальные режимы работы LIC-100, LIC-101, PIC-100, TIC-100, и два контроллера FIC-Reflux Flow,  $L$  и FIC-Boilup Flow,  $V$ , рассчитанные с помощью алгоритма ИИ для регулирования процессом. Параметры ПИ-регуляторов, рассчитанные ранее с помощью алгоритма DA для ITAE-M критерия качества, используются при конфигурировании ПИД-блоков управления колонны в Unisim (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Описание регуляторов, использующихся в динамической модели

№	Регулятор	Описание	Тип действия	Коэффициенты	Границы параметра PV
1	FIC-Reflux Flow, L	Регулирование скорости потока рефлюкса в ДК	Reverse	$K_p = 11.4935$ $T_i = 0.3352$	0...30 м <sup>3</sup> /ч
2	FIC-Boilup Flow, V	Регулирование скорости потока пара в ДК	Reverse	$K_p = 30$ $T_i = 0.3239$	0...50 м <sup>3</sup> /ч
3	LIC-100	Регулирование уровня жидкости в ёмкости конденсатора	Direct	$K_p = 1.8$ $T_i = 29.2$	0...100%
4	PIC-100	Регулирование давления в конденсаторе	Direct	$K_p = 1.8$ $T_i = 0.333$	0...1200 кПа
5	TIC-100	Регулирование температуры в ребойлере	Reverse	$K_p = 1.8$ $T_i = 0.25$	0...180 град. Цельсия
6	LIC-101	Регулирование уровня жидкости в ребойлере	Direct	$K_p = 1.8$ $T_i = 10.5$	0...100%

Разработанная динамическая модель изображена на рисунке 5.28, включает в себя: диаграмму потока процесса (Process Flow Diagram, PFD); график с отображением скорости потока дистиллята, чистотой дистиллята и концентрациями бутанов; панели управления регуляторами.

На графике (Рисунок 5.28) изображено, что при скорости потока дистиллята равном 8,844 м<sup>3</sup>/ч, чистота дистиллята равна 98,29%, что соответствует предъявляемым требованиям к процессу. Динамическая модель ДК в Unisim Design позволяет тестировать режимы работы колонны, а также проверять системы управления и сигнализации. По результатам моделирования в динамическом состоянии можно сделать вывод, что система находится в устойчивом состоянии и задача управления процессом выполнена в соответствии с наложенными критериями управления.

Научные исследования выполнены в «Центре Автоматизации Honeywell» расположенном в АО «Казахстанско-Британский Технический Университет», где автор диссертационной работы является руководителем лаборатории. В октябре 2019 года было официальное открытие лаборатории, задача которой заключается в подготовке квалифицированных специалистов в области автоматизации и управления, умеющих работать с современной техникой.

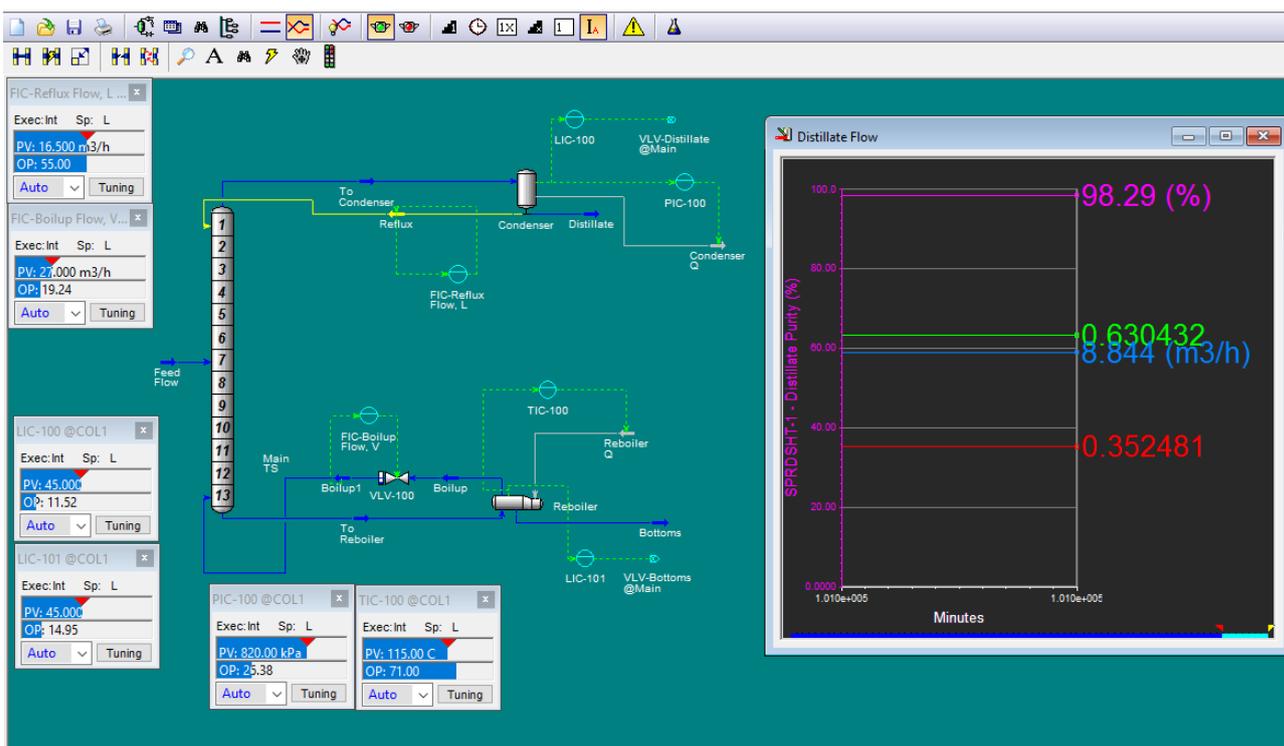


Рисунок 5.28 – Динамическая модель дистилляционной колонны

В лаборатории установлено промышленное оборудование, такое как:

- программируемые логические контроллеры С300, ML200, с помощью которых производится управление технологическими процессами на производстве;
- системы противоаварийной защиты Safety Manager, предназначенные для обеспечения пожарной и газовой безопасности.
- промышленная сеть на базе отказоустойчивого FTE, обеспечивающего бесперебойную и защищённую передачу данных между пользователями.

В настоящее время обучено более 600 студентов. Образовательный процесс настроен на онлайн формат с дистанционным доступом к ресурсам лаборатории.

Деятельность лаборатории направлена на: обучение студентов специальностей «Автоматизация и управление», «Химическая технология органических веществ», «Информационные системы»; прохождение в лаборатории производственных и преддипломных практик, под руководством действующих инженеров компании «Honeywell АСУ»; разработку курсов лабораторных работ и методических материалов по оборудованию компании Honeywell; повышение квалификации инженеров компаний-заказчиков Honeywell.

Было разработано два учебно-методических пособия на русском и английском языках по конфигурированию системы Experion PKS и программированию промышленных контроллеров.



Рисунок 5.29 – Центр Автоматизации «Honeywell»

Внедренные учебные программы с когнитивными мнемосхемами используются в дисциплинах «Real-Time Operating Systems», «Supervisory Control Fundamentals», «SCADA systems and industrial networks», «Process Control». На использование результатов научных исследований получен акт внедрения в АО «Казахстанско-Британский Технический Университет» (Приложение Д) и акт внедрения в ТОО «Ханиуэлл Автоматические Системы Управления» (Приложение Е).

### 5.6 Выводы по пятому разделу

Основными результатами исследований в данном разделе являются:

1. Разработана архитектура SMART-системы управления на базе современного оборудования и программного обеспечения компании Honeywell.

2. Разработана оптическая SMART-технология для создания персонализированных мнемосхем для процесса очистки газа в ДК в зависимости от психофизических особенностей инженера-оператора.

3. Рассмотрены отличия между обычной мнемосхемой, высокоэффективной мнемосхемой и когнитивной мнемосхемой.

4. Создано программное обеспечение для настройки регуляторов на базе алгоритма АСО.

5. Разработан цифровой двойник дистилляционной колонны в программном обеспечении Honeywell Unisim Design. Выполнено моделирование SMART-управления в установившемся и в динамическом режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлена разработанная SMART-система управления сложным ММО объектом предприятия нефтегазовой отрасли – дистилляционной колонны, на основе метаэвристических алгоритмов роевого интеллекта и промышленного оборудования фирмы Honeywell

Научное исследование выполнено в рамках проекта на тему: «Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы для промышленной автоматизации с использованием современной микропроцессорной техники».

В рамках диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1) Сформулирована постановка задачи исследования по внедрению интеллектуальной SMART-системы управления в реальное промышленное производство;

2) Разработана архитектура SMART-системы управления сложным объектом на примере дистилляционной колонны и промышленного оборудования фирмы Honeywell;

3) Осуществлен анализ математической модели дистилляционной колонны;

4) Сформированы модифицированные критерии управления, в соответствии с качественными требованиями к технологическому процессу очистки газа в дистилляционной колонне;

5) Синтезированы интеллектуальные ПИ-регуляторы для системы управления дистилляционной колонны на основе алгоритмов АСО, GWO, DA, CS, GA, эффективно минимизирующие разработанные критерии качества.

6) Получены результаты моделирования синтеза интеллектуальных ПИ-регуляторов и проанализированы лучшие подходы управления.

7) Разработано программное обеспечение для SMART управления дистилляционной колонной на базе распределённой системы управления Honeywell Experion PKS.

8) Разработаны когнитивные мнемосхемы для SMART-системы управления дистилляционной колонны с учётом особенностей зрения и психофизических характеристик операторов.

9) Выполнено создание цифрового двойника технологического процесса в программном продукте Honeywell Unisim Design, где выполнено построение модели в устойчивом состоянии и в динамическом режиме.

Опубликовано 19 работ, в том числе 2 работы в высокорейтинговых журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS, 2 авторских свидетельства на разработанное программное обеспечение (Приложения А, Б), акт внедрения результатов научных исследований в ТОО «Ханиуэл Автоматические Системы Управления» (Приложения Е) и акт внедрения в АО «Казахстанско-Британский Технический Университ» (Приложение Д).

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 Samigulin, T., Shirayeva, O. Development of a smart-system for a complex industrial object control based on metaheuristic algorithms of swarm intelligence // WSEAS Transactions on Power Systems. – 2021. – Vol. 16. – pp. 231-240. SCOPUS (Q3, Cite Score 0.7, 25%)

2 Samigulina G., Samigulin T. Development of a cognitive mnemonic scheme for an optical smart-technology of remote learning based of artificial immune systems // Computer Optics. – 2021. – Vol. 45(2). – pp. 286-295. SCOPUS (Q1, Cite Score 4.4, 82%)

3 Самигулина Г.А., Самигулин Т.И. Обзор современных подходов искусственного интеллекта для систем управления сложными объектами // Проблемы информатики. – Новосибирск, 2018. - №3. – С. 4-20.

4 Самигулин Т.И., Самигулина Г.А. Разработка программного обеспечения для управления сложным объектом на основе алгоритма муравьиной колонии // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции с междунар. участием «Робототехника и искусственный интеллект». – Железногорск, 2018. – С. 119-123.

5 Самигулина Г.А., Самигулин Т.И. Авторское свидетельство на программу для ЭВМ №836. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом на программное обеспечение «АССО (Ant Colony for Complex Objects)» опублик. 6.12.2018 г.

6 Самигулина Г.А., Самигулин Т.И. Разработка SMART-технологии для управления сложным объектом с использованием алгоритма муравьиной колонии. – Алматы: Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи. №1 (44). - 2019. – С. 98-105.

7 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Разработка искусственной иммунной системы управления многомерным объектом нефтегазовой отрасли // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – 2019. – № 13 (1338). – Р. 155-165.

8 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Сравнительный анализ настройки регуляторов системы управления процесса перегонки газа через дистилляционную колонну на основе Smart-технологий // Международная научно-практическая конференция «Инновационные IT и Smart-технологии», посвященная 70-летию юбилею профессора Утепбергенова И.Т., 20 марта 2019 года. –270-273с.

9 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Анализ результатов моделирования процессов нефтегазовой отрасли на основе Smart-технологий // Труды Сатпаевских чтений инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК, 2019. – Том 2. – 270-274с.

10 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Моделирование и развязывание сложной системы с оптимальными CLONALG-регуляторами // – Алматы: IV

международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", 25-29 сентябрь 2019г.

11 Shirayayeva O., Samigulin T. CLONALG application to the PID-controller synthesis of MIMO-systems in oil and gas industry // Lublin: Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2019. – № 3. – P. 50-53. DOI: 10.35784/iapgos.235

12 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Базовые концепции развития искусственной иммунной системы на класс сложных систем // Вестник КазНУ. – 2019. – № 5. – С. 501-504.

13 Самигулин Т.И., Ширяева О. И. Разработка Smart-системы управления сложным технологическим процессом нефтегазовой отрасли с применением биоинспирированных алгоритмов // Вестник КБТУ. – 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 164-171.

14 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Разработка программного обеспечения реализации технологии негативной селекции построения интеллектуальной системы управления для нефтегазовой отрасли // Алматы: КазНУ имени Сатпаева, материалы конференции «Сатпаевские чтения -2020». – 2020. – С. 245-248.

15 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Авторское свидетельство на программу для ЭВМ №11354. Реализация Smart-технологии построения системы управления для технологических процессов нефтегазовой отрасли; опублик. 14.07.2020. – 2с.

16 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Реализация SMART-технологии построения оптимальных систем на основе модифицированных алгоритмов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 1 (3). – С.41-49.

17 Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Интеграция современной микропроцессорной техники распределённой системы управления с алгоритмами AIS / Ширяева О.И., Самигулин Т.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – №1(5). – 56-69с.

18 Самигулин Т.И., Ширяева О.И. Разработка оптимальной системы управления сложным технологическим процессом на базе метаэвристических алгоритмов роевого интеллекта и оборудования компании Honeywell // Вестник КБТУ. – 2021. – Вып. №1 (56). – С. 150-156.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. – 2018. – Vol. 18. – P. 20-23.
- 2 Evjemo L.D., Gjerstad T., Grøtli E.I. Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories // *Current Robotics Reports*. – 2020. – Vol. 1. – P. 35-41 // <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00006-5>
- 3 Zheng P., Wang H., Sang Z. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 13. – P. 137–150 // <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>
- 4 Liu H., Ma X. Smart oilfield development and transition of petroleum-based cities // *Frontiers of Engineering Management*. – 2019. – Vol. 6. – P. 299–301 // <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0024-5>
- 5 Cai H., Jiang L. Current and future of software services in smart manufacturing // *SOCA 14*. – 2020. – P. 75-77 // <https://doi.org/10.1007/s11761-020-00293-y>
- 6 Arockiarajan A., Duraiselvam M., Raju, R. Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2021 // doi:10.1007/978-981-15-4739-3 // <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4739-3>
- 7 Захаров В. Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения // *Известия РАН ТИСУ*. – 1997. – Т. 3. – С.138-145.
- 8 Котенко И.В., Шоров А.В., Нестерук Ф.Г. Анализ биоинспирированных подходов для защиты компьютерных систем и сетей // *Изд. СПИИРАН*. – 2011. – № 3(18). С. 19-73.
- 9 Fan X., Sayers W., Zhang S. Review and Classification of Bio-inspired Algorithms and Their Applications // *Journal of Bionic Engineering*. – 2020. – Vol. 17. – P. 611-631 // <https://doi.org/10.1007/s42235-020-0049-9>
- 10 Khalilpourazari S., Khalilpourazary S. An efficient hybrid algorithm based on Water Cycle and Moth-Flame Optimization algorithms for solving numerical and constrained engineering optimization problems // *Soft Computing*. – 2019. – Vol. 23. – P. 1699-1722 (2019) // <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2894-y>
- 11 Rai D., Tyagi K. Bio-inspired optimization techniques: a critical comparative study // *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*. – 2013. – Vol. 38, Issue 4. – P. 1-7.
- 12 Karami M., Tavakolpour-Saleh A.R., Norouzi A. Optimal Nonlinear PID Control of a Micro-Robot Equipped with Vibratory Actuator Using Ant Colony Algorithm: Simulation and Experiment // *Journal of Intelligent & Robotics Systems*. – 2020. – Vol. 99. – P. 773–796 // <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01165-5>
- 13 Jagatheesan K., Anand B., Dey K.N. Performance evaluation of objective functions in automatic generation control of thermal power system using ant colony optimization technique-designed proportional–integral–derivative controller // *Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 100. – P. 895-911.
- 14 Rahman M., Ong Z.C., Chong W.T. Wind Turbine Tower Modeling and Vibration Control Under Different Types of Loads Using Ant Colony Optimized PID

Controller // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Vol. 44. – P. 707–720 // <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3190-6>

15 Selma B., Chouraqui S., Abouaïssa H. Optimization of ANFIS controllers using improved ant colony to control an UAV trajectory tracking task // SN Applied Sciences. – 2020. – Vol. 2. – № 878 // <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2236-z>

16 Jiang C., Fu J., Liu W. Research on Vehicle Routing Planning Based on Adaptive Ant Colony and Particle Swarm Optimization Algorithm // International Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2021, – Vol. 19. – P. 83–91 // <https://doi.org/10.1007/s13177-020-00224-3>

17 Yang L., Li K., Zhang W., Ke Z. Ant colony classification mining algorithm based on pheromone attraction and exclusion // Soft Computing. – 2017. – Vol. 21, Issue 19. – P. 5741-5753.

18 Khosravanian R., Mansouri V., Wood D.A. A comparative study of several metaheuristic algorithms for optimizing complex 3-D well-path designs // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Vol. 8. – P. 1487–1503 // <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0447-2>

19 Padhy S., Panda S. Application of a simplified Grey Wolf optimization technique for adaptive fuzzy PID controller design for frequency regulation of a distributed power generation system // Protection and Control of Modern Power Systems. – 2021. – Vol. 6. – № 2 // <https://doi.org/10.1186/s41601-021-00180-4>

20 Agarwal J., Parmar G., Gupta R. Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor // Microsystems Technologies. – 2018. – Vol. 24. – P. 4997–5006 // <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3920-4>

21 Dutta P., Nayak S.K. Grey Wolf Optimizer Based PID Controller for Speed Control of BLDC Motor // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2021. – Vol. 16. – P. 955–961 // <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00660-5>

22 Rahmani M., Komijani H., Rahman M.H. New Sliding Mode Control of 2-DOF Robot Manipulator Based on Extended Grey Wolf Optimizer. International Journal of Control, Automation and Systems. – 2020. – Vol. 18. – P. 1572–1580 // <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0154-x>

23 Uzlu E. Estimates of greenhouse gas emission in Turkey with grey wolf optimizer algorithm-optimized artificial neural networks // Neural Computing and Applications. – 2021 // <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05980-1>

24 Dereli S. A new modified grey wolf optimization algorithm proposal for a fundamental engineering problem in robotics // Neural Computing and Applications. – 2021 // <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06050-2>

25 Chen R.F. Optimal Operation of Reservoir Power Generation Based on Improved Grey Wolf Algorithm. // AMLTA 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1339. – P. 987-996 // [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69717-4\\_92](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69717-4_92)

26 Tumari M.Z.M., Zainal Abidin A.F., Yusof A. A., Mohd Aras M.S., Mustapha N.M.Z.A., Ahmad M.A. Model-Free PID Controller Based on Grey Wolf Optimizer for Hovering Autonomous Underwater Vehicle Depth Control // InECCE2019. Lecture

Notes in Electrical Engineering. – 2020. – Vol 632. – P. 25-35 // [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2317-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2317-5_3)

27 Sahoo M.M., Dash R., Dash R., Rautray R. Cuckoo Search Algorithm: A Review // ICDSMLA 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 601. – P. 1136-1142 // [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1420-3\\_124](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1420-3_124)

28 Mondal A., Dey N., Ashour A.S. Cuckoo Search and Its Variants in Digital Image Processing: A Comprehensive Review // Applications of Cuckoo Search Algorithm and its Variants. – 2021. – P. 1-20 // [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5163-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5163-5_1)

29 Zhao J., Wong P.K., Xie Z. Design and Control of an Automotive Variable Hydraulic Damper Using Cuckoo Search Optimized PID Method // International Journal of Automotive Technology. – 2019. – Vol. 20. –P. 51–63 // <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0005-z>

30 Lan Y., Chen X. Trajectory tracking system of wheeled robot based on immune algorithm and sliding mode variable structure // Intelligent Service Robotics. – 2020 // <https://doi.org/10.1007/s11370-020-00325-8>

31 Saleem O., Mahmood-ul-Hasan K. Hierarchical adaptive control of self-stabilizing electromechanical systems using artificial-immune self-tuning mechanism for state weighting-factors // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2021. – Vol. 35. – P. 1235–1250 // <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0237-5>

32 Jiang Q., Chang F. A novel antibody population optimization based artificial immune system for rotating equipment anomaly detection // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2020. – Vol. 34. – P. 3565–3574 // <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0808-x>

33 Oliveira D.C., Chavarette F.R., Lopes, M.L.M. Damage diagnosis in an isotropic structure using an artificial immune system algorithm // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – № 485 // <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1971-9>

34 Prathyusha D.J., Kannayaram G. A cognitive mechanism for mitigating DDoS attacks using the artificial immune system in a cloud environment // Evolutionary Intelligence. – 2021. – Vol. 14. – P. 607–618 // <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00340-4>

35 Bhadoria V.S., Pal N.S., Shrivastava V. Artificial immune system based approach for size and location optimization of distributed generation in distribution system // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2019. – Vol. 10. – P. 339–349 // <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00779-9>

36 Çelik E. Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems // Soft Computing. – 2021. – Vol. 25. – P. 1193–1217 // <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05215-w>

37 Gaddala K., Sangameswara Raju P. Optimal UPQC location in power distribution network via merging genetic and dragonfly algorithm // Evolutionary Intelligence. – 2020 // <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00364-1>

- 38 Polepally V., Shahu Chatrapati K. Dragonfly optimization and constraint measure-based load balancing in cloud computing // *Cluster Computing*. – 2019. – Vol. 22. – P. 1099–1111. (2019) // <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1056-4>
- 39 Wang G., Xiao S., Chen X. Application of Genetic Algorithm in Automatic Train Operation // *Wireless Personal Communications*. – 2018. – Vol. 102. – P. 1695–1704 // <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5228-6>
- 40 Nait Amar M., Zeraibi N., Redouane K. Optimization of WAG Process Using Dynamic Proxy, Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 43. – P. 6399–6412 // <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3173-7>
- 41 Moinian F., Sabouhi H., Hushmand J. Gas turbine preventive maintenance optimization using genetic algorithm // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. – 2017. – Vol. 8. – P. 594-601 // <https://doi.org/10.1007/s13198-017-0627-3>
- 42 Tran T.C., Brandstetter P., Duy V.H., Vo H.H., Dong C. PID Speed Controller Optimization Using Online Genetic Algorithm for Induction Motor Drive // *AETA 2016. Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2017. - Vol 415. – P. 564-576.
- 43 Efthymiou D., Chrysostomou K., Mofroulaki M., Aifantopolou G. Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach // *European Transport Research Review*. – 2017. - Vol. 9, Issue 2. – P. 27.
- 44 Thai S., Kim I., Lee J. Optimum design of cable nets by using genetic algorithm // *International Journal of Steel Structures*. – 2017. – Vol. 17. – P. 1183-1198.
- 45 Ponticelli G.S., Guarino S., Tagliaferri V. An optimized fuzzy-genetic algorithm for metal foam manufacturing process control // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 101. – P. 603–614.
- 46 Sana S.S., Ospina-Mateus H., Arrieta F.G. Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2019. – Vol. 10. – P. 2063-2090.
- 47 Hamidi Moghaddam S., Akbaripour H., Houshmand M. Integrated forward and reverse logistics in cloud manufacturing: an agent-based multi-layer architecture and optimization via genetic algorithm // *Production Engineering: research and development*. – 2021. – Vol. 15. – P. 801–819.
- 48 Shao H., Li A., Xu L. Scalability in manufacturing systems: a hybridized GA approach // *Journal Intelligent Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – P. 1859–1879.
- 49 Su B., Xie N., Yang Y. Hybrid genetic algorithm based on bin packing strategy for the unrelated parallel workgroup scheduling problem // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2021. – Vol. 32. – P. 957–969.
- 50 Srinivasan L., Khan M.C., Kannan T.D.B. Application of Genetic Algorithm Optimization Technique in TIG Welding of 15CDV6 Aerospace Steel // *Silicon*. – 2019. – Vol. 11. – P. 459–469.
- 51 Wang J., Song N., Jiang E., Xu D., Deng W., Mao L. The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System // *ICSEE 2017: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration*. – 2017. – P. 529-536.

- 52 Ye H.T., Li Z.Q. PID Neural Network Decoupling Control Based on Hybrid Particle Swarm Optimization and Differential Evolution // International Journal of Automation and Computing. – 2020. – Vol. 17. – P. 867–872.
- 53 Obeng B.B., Karam M. PID Speed Control of a DC Motor Using Particle Swarm Optimization // Information Technology - New Generations. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 558. – P. 781-789.
- 54 Xu X., Rong H., Trovati M., Liprott M., Bessis N. CS-PSO: chaotic particle swarm optimization algorithm for solving combinatorial optimization problems // Soft Computing. – 2018. – Vol. 22, Issue 3. – P. 783-795.
- 55 Gao S., Wu X., Luan L., Wang J., Wang G. PSO optimal control of model-free adaptive control for PVC polymerization process // International Journal of Automation and Computing. – 2017. – Vol 14, Issue 3. – P.1-10.
- 56 Berrouk F., Bounaya K. Optimal Power Flow For Multi-FACTS Power System Using Hybrid PSO-PS Algorithms // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2018. – Vol. 29, Issue 2. – P. 177-191.
- 57 Ganji V., Mangipudi S., Manyala R. A novel model order reduction technique for linear continuous-time systems using PSO-DV algorithm // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2017. – Vol. 28, Issue 1. – P. 68-77.
- 58 Rodriguez-Molina A., Gabriel Villarreal-Cervantes M., Aldape-Perez M. An adaptive control study for the DC motor using metaheuristic algorithms // Soft Computing. – 2019. – Vol. 23. – P. 889-906.
- 59 Kidnay A.J., Parrish W.R. Fundamentals of natural gas processing // Taylor & Francis Group. – 2006. – 440 p.
- 60 Kolmetz Handbook of Process Equipment Design. Distillation Column Selection, Sizing, and Troubleshooting // Engineering design guidelines. – KLM Techonlogy Group. – 2013. – 24 p.
- 61 Кафаров В.В. Основы массопередачи. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Школа, 1979. – 439 с.
- 62 Беркман Б.Е. Основные технологического проектирования производств органического синтеза. – М.: «Химия». – 1970. – 186 с.
- 63 Buckley P.S., Luyben W.L., Shunta J.P. Distillation column control systems. – New York, Publshers Creative Services Inc. – 1985. – 529 p.
- 64 Speight J.G. The refinery of the future. CD&W Inc, Laramie, Wyoming, United States. – 2020. – 647 p.
- 65 Schaschke C. A Dictionary of Chemical Engineering. – Oxford University Press, USA. – 2014. – 435 p.
- 66 Stephanopoulos G. Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. – 696 p.
- 67 Skogestad S., Morari M. LV-control of a high-purity distillation column // IFAC Proceedings Volumes. – Vol. 20, Issue 5, Part 8. – P. 387-396.
- 68 Skogestad S., Postlethwaite I, Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- 69 Wang Q., Ye Z., Cai W., Hang C. PID Control for Multivariable Processes. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2008. – 261p. // <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78482-1>

70 Dréo J., Siarry P., Pétrowsky A., Taillard E. Metaheuristics for Hard Optimization // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2006. – P. 123-150.

71 Ünal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms // Studies in Computational Intelligence. – 2013. – P. 96.

72 Abdmouleh Z., Gastli A., Ben-Brahim L., Haouari M., Al-Emadi N.A.. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources // Renewable Energy. – 2017. – Vol. 131. – P. 266-280.

73 Hu L., Lohse N., Liu Y., Tang R. Sequencing the features to minimize the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed // Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 935-946.

74 Chiha I., Liouane N., Borne P. Tuning PID Controller Using Multi objective Ant Colony Optimization // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. – Vol. 2012 // <https://doi.org/10.1155/2012/536326>.

75 Agarwal M., Srivastava G.M.S. A cuckoo search algorithm-based task scheduling in cloud computing // Advances in Computer and Computational Science. – 2017. – P. 293-299.

76 Quaarab A., Yang X. Cuckoo Search: From Cuckoo Reproduction Strategy to Combinatorial Optimization // Nature-Inspired Computation in Engineering. – 2016. – Vol. 637. – P. 91-110.

77 Yang X., Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization // Computers & Operations Research. – 2013. – Vol. 40, Issue 6. – P. 1616-1624.

78 Reddy S.S. Optimal Reactive Power Scheduling Using Cuckoo Search Algorithm // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2017. – Vol.7. -№5. – P. 2349-2356.

79 Yang X. Bat Algorithm and Cuckoo Search: A tutorial // Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristics. – 2013. – P. 421-434.

80 Gandomi A.H., Yang X., Alavi A. H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems // Engineering with Computers. – 2013. – Vol. 29. – №1. – P.17-35.

81 Zolghadr-Asli B., Bozorg-Haddad O., Chu X. Dragonfly Algorithm (DA) // Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms. – 2017. – P. 151-159.

82 Magarja M., Heidari A.A., Faris H., Mirjalili S., Aljarah I. Dragonfly algorithm: Theory, Literature Review, and Application in Feature Selection // Nature-Inspired Optimizers, Studies in Computational Intelligence. – 2020. – Vol. 811. – P.47-67.

83 Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems // Neural Computing and Applications. – 2015. – Vol. 27. – №4. – P. 1053–1073.

84 Rahman C., Rashid T. A. Dragonfly algorithm and its applications in applied science-survey. Computational Intelligence and Neuroscience. – 2019. – 21 p.

85 Mirjalili S., Dong J.S. Multi-objective Grey Wolf Optimizer // Multi-Objective Optimization using Artificial Intelligence Techniques. – 2019. – P. 47-58.

- 86 Wang J., Li S. An Improved Grey Wolf Optimizer Based on Differential Evolution and Elimination Mechanism // Scientific Reports. – 2019 // <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43546-3>
- 87 Rezaei H., Bozorg-Haddad O., Chu X. Grey Wolf Optimization (GWO) Algorithm // Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms. – 2017. – Vol. 720. – P. 81-91.
- 88 Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. – 2014. – Vol. 69.– P. 46-61.
- 89 Aljarah H.F.I., Al-Betar M.A., Mirjalili S. Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications // Neural Computing and Applications. – 2018. – Vol. 30. – P. 413-435.
- 90 М. В. Бураков. Генетический алгоритм: теория и практика. – СПб.: ГУАП, 2008. – 164 с.
- 91 Т. В. Панченко. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Изд. Дом «Астраханский университет», - 2007. – 87 с.
- 92 Dai H., Yang Y., Che Y., Tang Z. Clonal Selection Theory Based Artificial Immune System and Its Application // Intellectual Information Engineering. – 2006. – P. 1071-1078.
- 93 Eshkabilov S.L. Practical MATLAB Modeling with Simulink. Apress, Berkeley, CA. – 473 P. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5799-9>
- 94 Shivakumar R., Diddi S., Maitra S. Utilization of Unisim Design Tool for Enhanced Learning and Assessment in Engineering Education // 5th IEEE International Conference on MOOCs, Innovation and Technology in Education. – 2017. – P. 108-114 // <https://doi:10.1109/mite.2017.00025>
- 95 Интернет-ресурс: <https://www.honeywellforge.ai/us/en/products/unisim-design> (Дата доступа: 11.03.2022).
- 96 Jaekel F.W., Wolff T., Happersberger V., Knothe T. Ensure OPC-UA Interfaces for Digital Plug-and-Produce // OTM 2019. Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 11878 // [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40907-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40907-4_5)
- 97 Hollifield B., Oliver D., Nimmo I., Habibi E. The High Performance HMI Handbook: A comprehensive Guide to Designing, Implementing and Maintaining Effective HMIs for Industrial Plant Operations. – 360 Digital Books. – 2008. – 218 p.
- 98 Alexandrov Y. Psychophysiology. Textbook for high schools. 4th ed. Saint Petersburg: Peter; 2018.
- 99 Luo R. Encyclopedia of Color Science and Technology. Springer Science Plus Business Media, New York. – 2016.
- 100 Spasennikov V. V. The phenomenon of color perception in ergonomic studies and color consulting // Journal Ergodesign. – 2019. – Vol. 2. – P. 51-59.
- 101 Samigulina G.A., Lukmanova Zh. S. Cognitive Smart-technology of distance learning for modern industrial automation equipment // Bulletin of NTU "KhPI" Kharkov. – 2018. – Vol. 42. – №1318. – P. 160-170.
- 102 Интернет ресурс: <https://ofthalm.ru/tritanopija-tritanomalija.html> (Дата доступа: 01.02.2021).

103 Samigulina G.A, Shayakhmetova A.S, Nyusupov A.T. Innovative intelligent technology of distance learning for visually impaired people // Journal Open engineering. – 2017. – Vol. 7. – P. 444-452.

104 Samigulina G., Samigulin T. Development of a cognitive mnemonic scheme for an optical smart-technology of remote learning based of artificial immune systems // Computer Optics. – 2021. – Vol. 45. – №2. – P. 286-295.

105 Garyaev A.V, Garyaeva T.P. Psychological and physiological features of the visual perception of information and their accounting when creating educational presentations // Bulletin of PSPU. – 2008. – Vol. 4. – P. 106-113.

106 Klingberg T. Training and plasticity of working memory // Trends in Cognitive Sciences. – 2010. – Vol. 14. – №7. – P.317-324.

107 Интернет ресурс: <https://www.honeywellforge.ai/us/en/products/unisim-design> (Дата доступа: 15.03.2022).

**Приложение А**  
Авторское свидетельство на программу для ЭВМ «АССО (Ant Colony for complex object)»

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ**  **РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН**

**АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ  
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ**

**КУӘЛІК**

2018 жылғы « 6 » желтоқсан № 836

Автордың (лардың) жөні , аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):  
САМИГУЛИНА ГАЛИНА АХМЕТОВНА; САМИГУЛИН ТИМУР ИЛЬДУСОВИЧ

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: "АССО (Ant Colony for complex object)"

Объектіні жасаған күні: 17.09.2018

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

**О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР  
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

№ 836 от « 6 » декабря 2018 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):  
САМИГУЛИНА ГАЛИНА АХМЕТОВНА; САМИГУЛИН ТИМУР ИЛЬДУСОВИЧ

Вид объекта авторского права: программа для ЭВМ

Название объекта: "АССО (Ant Colony for complex object)"

Дата создания объекта: 17.09.2018





Құжат тәуелсіздігін <http://www.kazpatent.kz/nz> сайтының  
"Авторлық құқық" Бөлімінде тексеруге болады <https://copyright.kazpatent.kz>  
Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)  
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП Оспанов Е. К.

## Приложение Б

Авторское свидетельство на программу для ЭВМ «Реализация Smart-технологии построения системы управления для технологических процессов нефтегазовой отрасли»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ  
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

**КУӘЛІК**  
2020 жылғы «14» шілде № 11354

Автордың (лардың) жөні, аты, әжесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):  
**ШІРЯЕВА ОЛҒА ИВАНОВНА, САМИГУЛИН ТИМУР ИЛЬДУСОВИЧ**

Авторлық құқық объектісі: **ЭЕМ-ге арналған бағдарлама**

Объектінің атауы: **РЕАЛИЗАЦИЯ SMART-ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Объектіні жасаған күні: **12.05.2020**





Құжат түпнұсқасының <http://www.kazpatent.kz> сайтының  
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады. <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)  
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП Куантыров Е.С.

## Приложение В

Сертификация в HPS EMEA Automation College по программе обучения  
Honeywell EXP-02-AT



Приложение Г

Сертификация в Honeywell NL Automation College по программе обучения EXP-50R500



Honeywell

**Certificate Of Completion  
of Training Course**

*THIS CERTIFICATE IS AWARDED TO*

*Timur Samigulin*

*FOR COMPLETING THE HONEYWELL TRAINING COURSE*

*EXP-50R500*

*Experion PKS: Fundamentals - Configuration, Graphics Building and Control  
Strategy Implementation*

*Trainer - André Vos  
NL Automation College*

*Completion Date: April 12, 2019  
Duration: 10 days*

# Приложение Д

## Акт внедрения результатов научных исследований в «АО Казахстанско-Британский Технический Университет»

АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ  
«ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН  
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКИЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

050000, Алматы қ., Төле би к-сі, 59  
тел.: + 727 357-42-47  
e-mail: kense@kbtu.kz, www.kbtu.kz

050000, г. Алматы, ул. Төле би, 59  
тел.: + 727 357-42-47  
e-mail: kense@kbtu.kz, www.kbtu.kz

05-5/540 № 01.06.2021 2

### АКТ

об использовании результатов научных исследований в рамках докторской диссертации на тему «Разработка Smart-технологии для систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта»

На базе структурного подразделения «Лаборатория Honeywell» были внедрены результаты научных исследований инженера-инструктора, докторанта Ph.D специальности «6D070200 - Автоматизация и Управление», сеньора-лектора Самигулина Т. И. по разработке Smart-технологии для систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта для студентов в учебный процесс 2020-2021 уч. г. программы бакалавриата специальности «Автоматизация и управление» в рамках дисциплины «Supervisory Control Fundamentals».

Разработана Smart-технология, модели, алгоритмы и программа на ЭВМ для построения интеллектуальной системы управления процессом очистки газа в дистилляционной колонне нефтегазовой отрасли.

И. о. Ректора  
(Председатель Правления)  
Ph.D, канд. физ.-мат. наук



Габдуллин М. Т.

005148

*Копия  
Ханиуэлл*

**Приложение Е**  
**Акт внедрения результатов научных исследований в ТОО «Ханиуэлл-  
Автоматическая Система Управления»**

**Honeywell**

THE POWER OF CONNECTED

ТОО «Ханиуэлл – Автоматическая Система Управления»  
050057, г. Алматы, Казахстан  
ул. Тимирязева, 42, «ЭКСПО-СИТИ», павильон 15  
Тел. +7-727-274-7747  
Факс +7-727-2757-252

**АКТ**

**внедрения результатов исследования  
докторанта PhD Самигулина Т.И. на тему диссертации  
«Разработка SMART-технологии для систем управления сложными объектами  
на основе подходов искусственного интеллекта»**

Результаты научных исследований докторанта Satbayev University, обучающегося по специальности «6D070200 - Автоматизация и Управление» Самигулина Т.И. внедрены в учебный процесс студентов, проходящих производственную практику, при дистанционном обучении распределённой системе управления Honeywell Experion PKS.

Разработан авторский курс лабораторных работ «Honeywell Experion PKS: Programming Control Strategies», который позволяет реализовать SMART-систему управления технологическими процессами нефтегазовой отрасли, с использованием разработанной учебной модели-симулятора для станции управления на базе контроллера Honeywell C300.

Генеральный директор  
ТОО «Ханиуэлл-АСУ»



С. Абдигалиев

**Приложение Ж**  
Реализация алгоритмов ИИ в ПО «Mathwork MATLAB»

```
function cost_value=cost_func(k,plotfig)

assignin('base', 'KP1',k(1))
assignin('base', 'KI1',k(2))
assignin('base', 'KP2',k(3))
assignin('base', 'KI2',k(4))

sim('decomposed.slx')

err=reference+reference1-output-output1;

overshoot=output-1.05;

[n,~]=size(err);
cost_value=0;
for i=1:n
    % cost_value=cost_value+(err(i))^2 ; % ISE
    % cost_value=cost_value+abs(err(i)); % IAE
    % cost_value=cost_value+t(i)*abs(err(i)); % ITAE
    cost_value=cost_value+t(i)*(err(i))^2 +1000*max(0,overshoot(i)); % MSE
end
    cost_value=cost_value/t(n); % MSE

if plotfig
    figure(3)
    plot(t,reference,t,output)
    end
end
```

### Приложение 3

Листинг кода программы «АССО (Ant Colony for complex object)».  
Описание графического интерфейса (GUI).

```
function varargout = AntColonyPid(varargin)
global ParamCountAnt;

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @AntColonyPid_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @AntColonyPid_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_CallLowerBracketack', []);
if parametersIn && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_CallLowerBracketack = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function AntColonyPid_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = AntColonyPid_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit1_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)

ParamCountAnt = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamCountAnt)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamCountAnt>1000)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamCountAnt<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assignin('base', 'ParamCountAnt', ParamCountAnt)

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit2_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamF = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamF)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
```

### Продолжение приложения 3

```
end
if (ParamF>1)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamF<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assignin('base','ParamF',ParamF)

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamE = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamE)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamE>1)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamE<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assignin('base','ParamE',ParamE)

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamP = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamP)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamP>1)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamP<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assignin('base','ParamP',ParamP)

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

## Продолжение приложения 3

```
function edit5_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamN = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamN)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamN>1)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamN<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assinin('base', 'ParamN', ParamN)
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit6_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamI = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamI)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamI>1000)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
if (ParamI<0)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число в диапазоне от 0 до 1000','Error');
end
assinin('base', 'ParamI', ParamI)

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit7_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamMin = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamMin)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число','Error');
end
assinin('base', 'ParamMin', ParamMin)

function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit8_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
ParamMax = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(ParamMax)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число','Error');
```

## Продолжение приложения 3

```
end
assinin('base', 'ParamMax', ParamMax)

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit10_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit11_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)

function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit12_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)

function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pushbutton1_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)

load_system('close_loop_model')
sim('close_loop_model')
ParamCountAnt = evalin('base', 'ParamCountAnt');
ParamF = evalin('base', 'ParamF');
ParamE = evalin('base', 'ParamE');
ParamP = evalin('base', 'ParamP');
ParamN = evalin('base', 'ParamN');
ParamI = evalin('base', 'ParamI');
ParamMin = evalin('base', 'ParamMin');
ParamMax = evalin('base', 'ParamMax');
LowKp = evalin('base', 'LowKp');
LowKi = evalin('base', 'LowKi');
LowKd = evalin('base', 'LowKd');
HighKp = evalin('base', 'HighKp');
HighKi = evalin('base', 'HighKi');
HighKd = evalin('base', 'HighKd');
LOWERBRACKET = [LowKp LowKi LowKd];
assinin('base', 'LOWERBRACKET', LOWERBRACKET);
UPPERBRACKET = [HighKp HighKi HighKd];
assinin('base', 'UPPERBRACKET', UPPERBRACKET);
variables=size(LOWERBRACKET, 2);
assinin('base', 'variables', variables);
Choise = struct('FunctionConstFcn', @antFitnessFunction, 'NumOfNumOfAnts',
ParamCountAnt, 'PherArrayomone', ParamF, 'EvaporationCoeffitient', ParamE,
'PozPherArrayemone', ParamP, 'NegativePherArrayemone', ParamN, 'MaxTour', ParamI,
'MinValue', ParamMin, 'MaxValue', ParamMax, 'Figure', 'Off', 'Pieces', 501);
assinin('base', 'Choise', Choise)
```

## Продолжение приложения 3

```
[x,costValue]=ant(variables,LOWERBRACKET,UPPERBRACKET,Choise)

numerator = evalin('base', 'numerator');
denominator = evalin('base', 'denominator');

set_param('close_loop_model/Transfer Fcn1','Denominator', 'denominator');
set_param('close_loop_model/Transfer Fcn1','Numerator', 'numerator');

Kp = evalin('base', 'Kp');
Ki = evalin('base', 'Ki');
Kd = evalin('base', 'Kd');
set(handles.edit10, 'String', Kp);
set(handles.edit11, 'String', Ki);
set(handles.edit12, 'String', Kd);

function pushbutton2_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)

function edit13_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
LowKp = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(LowKp)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число','Error');
end
assignin('base', 'LowKp', LowKp)

function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit14_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
LowKi = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(LowKi)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число','Error');
end
assignin('base', 'LowKi', LowKi)

function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit15_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
LowKd = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(LowKd)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число','Error');
end
assignin('base', 'LowKd', LowKd)

function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolLowerBracketackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit16_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
HighKp = str2doUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
```

### Продолжение приложения 3

```
if isnan(HighKp)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число', 'Error');
end
assignin('base', 'HighKp', HighKp)

function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit17_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
HighKi = str2doubleUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(HighKi)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число', 'Error');
end
assignin('base', 'HighKi', HighKi)
function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
function edit18_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
HighKd = str2doubleUpperBracketle(get(hObject, 'String'))
if isnan(HighKd)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Необходимо ввести число', 'Error');
end
assignin('base', 'HighKd', HighKd)
function edit18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
function edit25_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
numerator = str2num(get(hObject, 'String'))
assignin('base', 'numerator', numerator)

function edit25_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
function edit26_CallLowerBracketack(hObject, eventdata, handles)
denominator = str2num(get(hObject, 'String'))
assignin('base', 'denominator', denominator)

function edit26_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolLowerBracketBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');end
```

## Приложение И

Листинг кода программы АССО (Ant Colony for complex object). Описание алгоритма колонии муравьев.

```
function
[x,costValue,deltaTime,assin]=ant(variables,LOWERBRACKET,UPPERBRACKET,Choise)
standartSettings = struct('FunctionConstFcn',@antFitnessFunction,
'NumberOfNumOfAnts', 20, 'AmountOfThePherArrayomone', 0.06,
'EvaporationCoeffitient', 0.95, 'PlusPherArrayemone',0.2,
'MinusPherArrayemone',0.3, 'MinimalValue', 0, 'MaximumValue',20, 'Piecess',101,
'FigureOne','Off', 'AmountOfTours', 100);

errorMessage = nargchk(1,4,parametersIn);
if ~isempty(errorMessage)
    error([errorMessage, ' ANT requires at least 1 input argument.']);
end
if parametersIn< 4, Choise=[];
    if parametersIn< 3, UPPERBRACKET=ones(1,variables);
        if parametersIn< 2,LOWERBRACKET=zeros(1,variables);
            end
        end
    end
end

if ~isempty(Choise) && ~isa(Choise,'struct')
    error('Неправильный ввод настроек');
elseif isempty(Choise) Choise = standartSettings;
end
userChoise = Choise;

try dataBunndle = superiorfloat(LOWERBRACKET,UPPERBRACKET);
    if ~isequal('struct', dataBunndle)
        error('Поддерживается только тип данных struct')
    end
catch
    error('Поддерживается только тип данных struct')
end

costFunc = userChoise.FunctionConstFcn;
numOfAnts = userChoise.NumOfNumOfAnts
pher = userChoise.NumberOfPheromone
PlusPher = userChoise.PozPherArrayemone
MinusPher= userChoise.NegPherArrayemone
lambdaVariable = userChoise.EvaporationCoeffitient ;
setMaximum = userChoise.TourNumber
pieces = userChoise.Pieces

pherArray = ones(pieces,variables);
indArray = zeros (numOfAnts,variables);
costFuncArray = zeros(numOfAnts,1);
mainConstFunction = zeros(setMaximum, (variables+1));

generat=zeros(pieces,variables);
generat(1,:)=LOWERBRACKET;
for i=2:pieces
    for j=1:variables
        generat(i,j)=generat(i-1,j)+ (UPPERBRACKET(j)-
LOWERBRACKET(j))/(pieces-1);
    end
end
```

## Продолжение приложения И

```
end
    assin=0;
    while (assin <setMaximum)
        for i=1:numOfAnts

prs = pherArray.*rand(pieces,variables);
for j=1:variables
    indArray(i,j) = find(prs(:,j) == max(prs(:,j)));
end
varTemporary=zeros(1,variables);

for j=1:variables
    varTemporary(j)=generat(indArray(i,j),j);
end
costFuncArray(i) = costFunc(varTemporary);

deltaVariable = zeros(pieces,variables)

for j=1:variables
    deltaVariable(indArray(i,j),j)= (PlusPher *pher / (costFuncArray(i)));
end
pherArray = pherArray + deltaVariable;
end

goodAnt= min(find(costFuncArray==min(costFuncArray)));
badAnt = min(find(costFuncArray==max(costFuncArray)));

PositiveDelta = zeros(pieces,variables);
NegativeDelta = zeros(pieces,variables);

for j=1:variables
    PositiveDelta( indArray(goodAnt,j),j) = (pher / (costFuncArray(goodAnt))) ;
    NegativeDelta( indArray(badAnt,j),j) = -(MinusPher* pher
/(costFuncArray(badAnt))) ;

delta = PositiveDelta + NegativeDelta;
pherArray = pherArray.^lambdaVariable + delta ;

assin=assin + 1;

for j=1:variables
    mainConstFunction (assin,j)=generat(indArray(goodAnt,j),j);
end
mainConstFunction (assin,variables+1)=costFuncArray(goodAnt);
end

constFunctionList =sortrows(mainConstFunction,variables+1);
for j=1:variables
    x(j)=constFunctionList(1,j);
end
costValue = antFitnessFunction(x)
deltaTime = tickrate;
end
```

## Приложение К

### Листинг таблицы каскадных стилей CSS когнитивной мнемосхемы дистилляционной колонны

Настройка стиля индикационной панели

```
.TextLabelOPPVSPP  
{  
  hw-fill-color:transparent;  
  hw-text-color:#2C486A;  
  hw-text-effect:none;  
}
```

```
.SectionPV  
{  
  hw-text-color:#000000;  
  hw-text-effect:bold;  
  hw-fill-color:transparent  
}
```

```
.SectionOP  
{  
  hw-text-color:#000000;  
  hw-text-effect:bold;  
  hw-fill-color:transparent;  
}
```

```
.SectionSP  
{  
  hw-text-color:#000000;  
  hw-text-effect:bold;  
  hw-fill-color:transparent;  
}
```

Настройка стиля навигационных линий

```
.NavigationArea  
{  
  hw-line-color:#80FFFF;  
  hw-fill-color:#435C7B;  
}
```

Настройка стиля температурного профиля

```
.ProfileOperatingArea  
{  
  hw-fill-color:#80FFFF;  
  hw-line-color:#2C486A;  
  hw-line-style:dot;  
}
```

## Продолжение приложения К

```
.ProfileAlarmArea
{
  hw-line-style:dot;
  hw-fill-color:#48678E;
  hw-line-color:#2C486A;
}
```

```
.PolylineStyle
{
  hw-line-color:#000000;
  hw-line-width:2;
}
```

Настройка стиля оборудования, линий процесса и текста

```
.DC_equipment
{
  hw-line-color:#000000;
  hw-fill-color:#597AA3;
  hw-line-width:1;
}
```

```
.DC_LineProcess_1x
{
  hw-line-color:#80FFFF;
  hw-fill-color:#80FFFF;
  hw-line-width:1;
}
```

```
.DC_LineProcess_2x
{
  hw-line-color:#80FFFF;
  hw-fill-color:#80FFFF;
  hw-line-width:2;
}
```

```
.DC_LineProcess_3x
{
  hw-line-color:#80ffff;
  hw-fill-color:#80ffff;
  hw-line-width:3;
}
```

```
.DC_TextStyle
{
  hw-text-color:#000000;
  hw-text-effect:bold;
  hw-text-size:14pt;
}
```

## Продолжение приложения К

```
.DC_Tanks
{
  hw-line-color:#000000;
  hw-fill-color:#597AA3;
  hw-line-width:1;
}
```

Настройка фона

```
.DC_Background
{
  hw-fill-color:#435C73;
  hw-line-color:#383838;
}
```

Настройка стиля насоса

```
.PumpObjectRun
{
  hw-fill-color:#80ffff;
  hw-line-color:#000000;
}
.PumpObjectStop
{
  hw-fill-color:#2c486a;
  hw-line-color:#000000;
}
```

Настройка стиля клапана

```
.ValveObjectInputClose
{
  hw-fill-color:#80ffff;
  hw-line-color:#000000;
}
```

```
.ValveObjectInputOpen
{
  hw-fill-color:#80ffff;
  hw-line-color:#000000;
}
```

```
.ValveObjectInputBadStatus
{
  hw-fill-color:#000000;
  hw-line-color:#000000;
}
```

```
.ValveObjectOutputClose
{
```

## Продолжение приложения К

```
hw-fill-color:#80ffff;
hw-line-color:#000000;
}
.ValveObjectOutputOpen
{
hw-fill-color:#80ffff;
hw-line-color:#000000;
}
.ValveObjectOutputBadStatus
{
hw-fill-color:#000000;
hw-line-color:#000000;
}
.ValveObjectArea
{
hw-fill-color:#80ffff;
hw-line-color:#000000;
}
```