

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский государственный технический  
университет»  
ФГБОУ ВО «СамГТУ»

*На правах рукописи*

**Сетин Сергей Петрович**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ  
ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка  
информации (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Плешивцева Юлия Эдгаровна,  
д.т.н., профессор

г. Самара - 2016

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. РОЛЬ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ.....	15
1.1 Нефтепереработка как системный элемент нефтегазового сектора .....	15
1.2 Типовая укрупненная структура переработки нефти.....	18
1.2.1 Установки атмосферной трубчатки .....	20
1.2.2 Установки вакуумной трубчатки.....	20
1.2.3 Стабилизация и вторичная перегонка бензина .....	21
1.2.4 Установки атмосферно-вакуумной трубчатки.....	22
1.3 Системные проблемы нефтеперерабатывающей промышленности .....	23
2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНОЙ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ .....	28
2.1 Основные подходы к системному анализу процессов первичной нефтепереработки .....	28
2.2 Методика системного анализа процесса первичной нефтепереработки .....	32
2.3 Методика оценки уровня автоматизации и качества управления процессом первичной переработки нефти.....	36
2.3.1 Анализ структуры первичной нефтепереработки.....	36
2.3.2 Отображение топологии установки первичной нефтепереработки с помощью структурной схемы.....	37
2.3.3 Отображение топологии установки первичной нефтепереработки с помощью технологических схем.....	39

2.3.4 Анализ технологических операторов и потоков установки первичной нефтепереработки .....	41
2.3.5 Классификация параметров и потоков установки первичной нефтепереработки.....	43
2.3.6 Оценка управляющих функций локальных САР.....	43
2.3.7 Составление паспортов локальных САР.....	47
2.3.8 Анализ соответствия информационно-измерительной подсистемы .....	51
2.3.9 Анализ соответствия подсистем блокировок и защит.....	52
2.3.10 Оценка энергоэффективности процесса.....	52
2.3.11 Анализ уровня комплексной автоматизации блоков и узлов.....	56
2.3.11.1 Оценка уровня автоматизации контроля параметров .....	56
2.3.11.2 Оценка уровня автоматизации регистрации параметров потоков.....	59
2.3.11.3 Оценка уровня автоматизации контроля параметров оборудования.....	61
2.3.11.4 Оценка уровня автоматизации регистрации параметров оборудования.....	63
2.3.11.5 Оценка уровня автоматизации функции управления .....	66
2.3.12 Оценка надежности системы управления .....	68
2.3.13 Сравнительный анализ относительной эффективности локальных САР.....	73
<b>3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ САУ ПОДОГРЕВОМ СЫРЬЯ .....</b>	<b>83</b>

3.1 Математическое описание объектов управления САУ подогревом сырья .....	85
3.2 Моделирование динамики движения жидкости и пара по трубам ..	101
4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ КАСКАДНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	107
4.1 Обоснование выбранного подхода .....	107
4.2 Постановка задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных САУ .....	109
4.3 Решение задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных САУ на основе альтернансного метода .....	113
4.4 Параметрическая оптимизация многоконтурной САУ подогревом сырья .....	119
4.4.1 Анализ структуры САУ подогревом сырья .....	120
4.4.2 Решение задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья.....	123
4.4.2.1 Решение задачи при отсутствии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов .....	124
4.4.2.2 Решение задачи при наличии звена транспортного запаздывания в структуре объекта.....	139
4.4.2.3 Техническая реализация и анализ эффективности оптимальных алгоритмов управления.....	150
Заключение .....	158
Библиографический список .....	161
Приложение А – Результаты анализа качества систем управления на примере установки АВТ-4 ОАО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод».....	170

Справка № 03-06/281А от 02.07.2015 г. об использовании результатов диссертации в процессе промышленной эксплуатации АСУ ТП установки АВТ-4 в АО «КНПЗ» ..... 201

Справка № 35-9944 от 30.06.2015 г. об использовании результатов диссертации в АО «Нк НПЗ»..... 202

Акт от 16.11.2015 г. о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке магистров и бакалавров по направлениям «Системный анализ и управление», «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Управление в технических системах»..... 203

## ВВЕДЕНИЕ

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация посвящена проблеме системного анализа и оптимизации алгоритмов управления многостадийными процессами первичной переработки нефти с целью повышения эффективности производства в нефтяной отрасли и качества конечных продуктов нефтепереработки.

**Актуальность проблемы.** Лидирующие места в товарной структуре международной торговли долгие годы занимают и стабильно удерживают нефть, газ и продукты их первичной переработки, которые существенно опережают все другие товары и статьи экспортно-импортных операций, что определяет их ключевую роль в мировом коммерческом энергобалансе [49, 73, 94].

Российская Федерация обладает значительными углеводородными ресурсами, запасы которых являются достаточными не только для удовлетворения внутренних потребностей, но и обеспечения крупных экспортных потоков в другие страны, что приносит РФ, как стране-экспортеру нефти, доходы, позволяющие ставить и решать масштабные экономические, политические и социальные задачи. Российская Федерация входит в число ведущих нефтедобывающих стран мира. По объемам добычи жидких углеводородов РФ занимает второе место, ее доля составляет 12%. Объемы разведки запасов жидких углеводородов в РФ на уровне 5% от мировых позволяют России занимать восьмое место в мире [73, 96]. В целом, на нефтегазовый сектор приходится 70% экспорта и 30% ВВП Российской Федерации.

При этом к основным системным проблемам нефтепереработки как ключевого элемента нефтяной отрасли РФ можно отнести следующие: низкий коэффициент извлечения нефти, низкое качество и нестабильный состав нефтепродуктов, недостаточный уровень автоматизации и качества управления процессами нефтепереработки, недостаточную эффективность работы существующего производственного оборудования, низкую глубину переработки, несоответствие качества конечной продукции экспортным требованиям и некоторые другие [73, 89, 96].

Непрерывно возрастающая конкуренция в мировой экономике и переход к новым стандартам энерго- и ресурсосбережения, качества и экологической безопасности

создают необходимость непрерывного ужесточения требований, предъявляемых к процессам первичной переработки нефти, что обуславливает очевидную потребность в разработке новых системных подходов к увеличению эффективности производства в нефтяной отрасли, оптимизации управления основными процессами нефтепереработки и, как следствие, к повышению качества продуктов нефтепереработки.

Выраженный системный характер данной проблемы определяет необходимость ее решения на базе системных исследований с использованием современных методов и средств теории моделирования, управления и оптимизации систем с распределенными параметрами [2].

Вышеизложенное подтверждает актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы системного анализа процессов первичной переработки нефти, оценки уровня автоматизации и эффективности управления ими, а также методов и алгоритмов параметрической оптимизации многоконтурных систем управления анализируемыми процессами.

**Цель диссертационной работы** состоит в повышении эффективности производства в нефтяной отрасли и качества конечных продуктов нефтепереработки на базе системных подходов к анализу и оптимизации многоконтурных систем управления сложными многостадийными процессами первичной переработки нефти.

Для достижения поставленной цели в диссертации были решены следующие **задачи**:

1. Разработка методики системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации.

2. Разработка методики получения, сортировки, обработки и анализа информации для решения задачи оценки уровня автоматизации и эффективности управления многостадийными процессами первичной нефтепереработки.

3. Выработка рекомендаций по параметрической оптимизации многоконтурных систем управления процессами первичной переработки нефти на основе интегральных системных количественных оценок качества регулирования локальных контуров.

4. Выбор и обоснование ориентированных на использование в задачах параметрической оптимизации математических моделей для описания динамики

объектов регулирования локальных САР в форме передаточных функций по рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий.

5. Разработка алгоритма решения задачи параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества каскадных систем управления на базе альтернансного метода параметрической оптимизации.

6. Решение задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов локальных САР в многоконтурной системе управления процессами первичной переработки нефти.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы системного анализа, теории автоматического управления, оптимального управления системами с распределенными параметрами, параметрической оптимизации, теории тепломассопереноса и гидродинамики, компьютерного моделирования.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

- разработана методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации, позволяющая, в отличие от известных, на основе построения системных интегральных оценок относительной эффективности локальных контуров регулирования выявить неэффективно управляемые технологические параметры и оптимизировать соответствующие многосвязные системы управления;

- разработана новая методика оценки уровня автоматизации и эффективности управления процессом первичной переработки нефти, регламентирующая алгоритмы получения, сортировки, обработки и анализа информации согласно сформулированным требованиям к форме представления исходных данных и результатам анализа;

- на базе альтернансного метода оптимизации разработан алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных систем управления, который позволяет, в отличие от известных, обеспечить максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению к внешним возмущениям при заданных ограничениях на максимумы амплитудно-частотных характеристик замкнутых

контуров синтезируемой системы по каналам задающих воздействий;

- на базе альтернативного метода разработан алгоритм решения задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной системе автоматического управления, который впервые апробирован применительно к типовой САУ процессом подогрева сырья на установке первичной переработки нефти при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации.

2. Методика получения, сортировки, обработки и анализа информации для оценки уровня автоматизации и эффективности управления процессом первичной переработки нефти.

3. Алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества каскадных систем автоматического управления, основанный на альтернативном методе параметрической оптимизации.

4. Алгоритм и результаты решения задач оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной системе автоматического управления процессами первичной переработки нефти при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов регулирования.

**Практическая значимость** работы заключается:

1. В определении уровня автоматизации установок первичной нефтепереработки на основе системного анализа многостадийного процесса переработки нефти как объекта управления и оптимизации.

2. В анализе технической эффективности процессов управления многостадийными процессами первичной нефтепереработки с оценкой степени реализации доступных системе управления технологических возможностей с помощью разработанных методик получения, сортировки, обработки и анализа информации и сформированных на этой основе системных интегральных оценок локальных контуров регулирования.

3. В выявлении неэффективно управляемых технологических параметров процессов первичной переработки нефти и выработке рекомендаций по параметрической оптимизации соответствующих многоконтурных систем управления.

4. В определении оптимальных параметров настройки регуляторов локальных САУ в многоконтурных системах управления, позволяющих обеспечить максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению к внешним возмущениям при выполнении заданных ограничений на максимумы амплитудно-частотных характеристик замкнутых контуров синтезируемой САУ по каналам задающих воздействий.

**Практическая полезность** подтверждается включением результатов исследований в научно-исследовательскую работу (проект №1436) ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» в рамках выполнения государственного задания № 2014/199 по теме «Численное моделирование и многокритериальная оптимизация нелинейных объектов технологической теплофизики с распределенными параметрами»; справкой № 35-9944 от 30.06.2015 г. об использовании результатов диссертации в АО «НК НПЗ»; справкой № 03-06/281А от 02.07.2015 г. об использовании результатов диссертации в процессе промышленной эксплуатации АСУ ТП установки АВТ-4 в АО «КНПЗ»; актом от 16.11.2015 г. о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке магистров и бакалавров по направлениям «Системный анализ и управление», «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Управление в технических системах».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях: V кустовой научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «НК «Роснефть» в 2011 г., VII Межрегиональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «НК «Роснефть» в 2011 г., XVII Международном Форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2013), XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 8 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации для

опубликования результатов кандидатских диссертаций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы, приложения. Диссертационная работа изложена на 168 страницах основного машинописного текста и 31 странице приложений, содержит 46 рисунка, 22 таблицы. Список использованной литературы включает 107 наименований.

**В первой главе** определяется роль нефти и продуктов нефтепереработки в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации, проводится анализ объемов поставки нефти на основные российские нефтеперерабатывающие предприятия.

Проведен обзор основных типов промышленных установок первичной переработки нефти, к которым, прежде всего, относятся установки атмосферной, вакуумной и атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ).

Рассмотрены и проанализированы основные системные проблемы нефтеперерабатывающей отрасли: низкий коэффициент извлечения нефти, высокий износ основных фондов, низкое качество и нестабильный состав нефтепродуктов, недостаточный уровень автоматизации и качества управления многостадийными процессами нефтепереработки, недостаточная эффективность работы существующего производственного оборудования и другие.

Установлено, что одной из основных проблем является недостаточная эффективность работы существующих систем управления процессами первичной переработки нефти, решение которой обуславливает необходимость разработки новых системных подходов к модернизации производства с целью повышения эффективности производства в нефтяной отрасли и качества конечных продуктов нефтепереработки без дополнительных капитальных затрат.

Рассмотрена типовая укрупненная структура нефтепереработки, представляющая собой сложную систему взаимосвязанных процессов и явлений различной физической природы, из которых наиболее высокотоннажным, энергоемким и ресурсозатратным, является процесс первичной переработки нефти. Данное обстоятельство определило выбор процесса первичной нефтепереработки на установках атмосферно-вакуумной перегонки в качестве объекта системного анализа, управления и оптимизации.

**Во второй главе** представлен обзор основных подходов к системному анализу процессов первичной переработки нефти

Подробно описана разработанная методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации, позволяющая, в отличие от известных, на основе построения системных интегральных оценок относительной эффективности локальных контуров регулирования выявить неэффективно управляемые технологические параметры и оптимизировать соответствующие многосвязные системы управления.

Подробно описана разработанная методика оценки уровня автоматизации и эффективности управления процессом первичной переработки нефти, регламентирующая алгоритмы получения, сортировки, обработки и анализа информации согласно сформулированным требованиям к форме представления исходных данных и результатам анализа

Разработанные методики были апробированы при решении задачи системного анализа процесса первичной переработки нефти на установке АВТ. Проведена оценка уровня автоматизации и эффективности управления процессом, а также на основе DEA-метода проведен сравнительный анализ эффективности работы 11 взаимосвязанных локальных САР вакуумного блока установки.

Как показывают результаты применения DEA-метода, в данном случае наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления имеют контуры регулирования температуры мазута на выходе из печи подогрева сырья, расходов мазута и перегретого пара в печь многоконтурной САУ процессом подогрева сырья. Это означает необходимость перехода к последующим этапам анализа динамики объектов регулирования и параметрической оптимизации соответствующих контуров регулирования. Алгоритмы решения указанных задач и их апробация описаны в последующих главах диссертации.

**В третьей главе** проведен в рамках общего подхода, предложенного в диссертационном исследовании, анализ динамики объектов регулирования и синтез математических моделей локальных САР в форме передаточных функций по

рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий на примере многоконтурной САУ процессом подогрева сырья установки АВТ.

Получено структурное представление объектов регулирования локальных САР по каналам, имеющим наихудшие интегральные оценки качества регулирования, в виде соединения апериодических звеньев первого и второго порядков и звена запаздывания.

**В четвертой главе** диссертации рассматриваются постановка и алгоритм решения на основе альтернативного метода задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных систем управления из условия минимизации реактивности САУ по отношению к внешним возмущающим воздействиям с учетом возможности дополнительных требований по качеству переходных процессов, формулируемых в виде заданных ограничений на максимумы амплитудно-частотных характеристик локальных замкнутых контуров синтезируемой САУ.

Описан разработанный алгоритм решения задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной системе автоматического управления, который впервые апробирован применительно к типовой САУ процессом подогрева сырья на установке первичной переработки нефти при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования

Показано, что в соответствии с общим алгоритмом задача поиска оптимальных параметров настройки типовых регуляторов в структуре многоконтурной САУ подогрева сырья вакуумного блока перегонки установки АВТ редуцируется к задачам определения соответствующих параметров ПИД-регуляторов с учетом требований к качеству процесса регулирования, формируемых в частотной области в виде функций максимума АЧХ. Приведены решения данной задачи, полученные в соответствии с разработанными в диссертации методиками, при отсутствии и наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов регулирования.

Предложена техническая реализация оптимальных алгоритмов регулирования в локальных контурах многоконтурной САУ на базе SCADA EMERSON и программируемого логического контроллера Delta V.

Произведена оценка эффективности управления в оптимизированной САУ с помощью DEA-метода, подтверждающая, что технологические параметры, имевшие наихудшие интегральные оценки, теперь полностью соответствуют технологическим требованиям, предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы САУ.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты работы.

# 1. РОЛЬ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ

## 1.1 Нефтепереработка как системный элемент нефтегазового сектора

Нефтегазовый сектор является основным сектором экономики России. В 2013 г. на его долю пришлось 30% валового внутреннего продукта страны, около 50% налоговых поступлений в федеральный бюджет и до 70% экспорта [52].

Основными составляющими нефтегазового сектора являются нефтедобыча, нефтепереработка, нефтегазохимия.

Доля России в мировой добыче нефти составляет около 12%. Мощности российских нефтеперерабатывающих заводов составляют более 6% мировых [73].

В 2014 г. в Российской Федерации добыто 526 729 тыс. т нефти, что по отношению к 2013 г. составляет 100,6%.

Традиционно основная доля добываемой в РФ нефти направляется на экспорт, а остальная её часть поступает на российские нефтеперерабатывающие заводы.

В 2014 г. более 55% от общих объемов нефти переработано на основных российских НПЗ и мини НПЗ [24].

Объемы переработки по различным нефтяным компаниям и НПЗ приведены в таблице 1.1 [24].

Таблица 1.1. Объемы поставки нефти на российские объекты переработки в 2014 году

Компания, предприятие	Объем нефти, поступивший на переработку по системе магистральных нефтепроводов АК «Транснефть», тыс. т	Объем нефти, поступивший на переработку минуя систему магистральных нефтепроводов АК «Транснефть», тыс. т	Суммарный объем нефти, поступивший на переработку, тыс. т
<b>ОАО «НК «Роснефть», в т.ч.:</b>	<b>75 210,4</b>	<b>1 578,4</b>	<b>76 788,8</b>
ООО «РН-Комсомольский НПЗ»	6 354,8	1 260,9	7 615,7
ООО «РН-Туапсинский НПЗ»	8 667,1	-	8 667,1
ЗАО «Рязанская НПЗ»	16 512,5	-	16 512,5
ОАО «Саратовский НПЗ»	6 699,9	358,9	7 058,8
ОАО «Новокуйбышевский НПЗ»	7 971,5	-	7 971,5
ОАО «Сызранский НПЗ»	7 120,6	12,6	7 133,2

Продолжение таблицы 1.1.

ОАО «Куйбышевский НПЗ»	6 686,7	-	6 686,7
ОАО «Ачинский НПЗ»	5 184,2	-	5 184,2
ОАО «Ангарская НХК»	10 013,1	-	10 013,1
ООО «Афипский НПЗ»	<b>5 881,0</b>	-	<b>5 881,0</b>
ЗАО «Краснодарский НПЗ-КЭН»	<b>2 074,9</b>	<b>408,4</b>	<b>2 483,3</b>
ОАО «Газпром нефть», в т.ч.:	<b>31 617,4</b>	<b>507,5</b>	<b>32 124,9</b>
ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ»	20 801,4	507,5	21 308,9
ОАО «Московский НПЗ»	10 816,0	-	10 816,0
ОАО «Гаиф-НК»	7 384,4	-	7 384,4
ОАО «Газпром нефтехим Салават»	<b>5 555,7</b>	<b>2 906,8</b>	<b>8 462,5</b>
ОАО «АНК «Башнефть», в т.ч.:	<b>18 687,1</b>	<b>3 001,1</b>	<b>21 688,2</b>
ОАО «Ново-Уфимский НПЗ»	6 821,0	436,3	7 257,3
ОАО «Уфанефтехим»	7 007,0	1 849,6	8 856,6
ОАО «Уфимский НПЗ»	4 859,1	715,2	5 574,3
ОАО «ЛУКОЙЛ», в т.ч.:	<b>44 039,0</b>	<b>1 125,7</b>	<b>45 164,7</b>
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоград-нефтепереработка»	11 372,1	95,2	11 467,3
ООО «ЛУКОЙЛ - Пермнефтеоргсинтез»	11 714,9	944,7	12 659,6
ООО «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтепереработка»	3 896,6	85,8	3 982,4
ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»	17 055,4	-	17 055,4
ОАО «Сургутнефтегаз», в т.ч.:	<b>19 299,2</b>	-	<b>19 299,2</b>
ООО «Киришинефтеоргсинтез»	19 299,2	-	19 299,2
ОАО «Орскнефтеоргсинтез», в т.ч.:	<b>4 630,6</b>	<b>1 342,0</b>	<b>5 972,6</b>
ОАО «Орскнефтеоргсинтез»	4 630,6	1 342,0	5 972,6
ОАО «Хабаровский НПЗ»	4 400,4	-	4 400,4
ОАО «НГК Славнефть», в т.ч.:	<b>15 382,8</b>	<b>372,6</b>	<b>15 755,4</b>
ОАО «Славнефть-ЯНОС»	15 331,9	-	15 331,9
ОАО «Ярославский НМЗ»	50,9	372,6	423,5
ЗАО «Антипинский НПЗ»	<b>5 889,2</b>	<b>383,3</b>	<b>6 272,5</b>
ОАО «ТАНЕКО»	8 395,4	10,3	8 405,7
ООО «Марийский НПЗ»	898,9	59,4	958,3
ООО «Трансбункер»	629,9	-	629,9
ООО «Томскнефтепереработка»	192,2	-	192,2
ООО «Ильский НПЗ»	2 582,1	248,1	2830,2
ОАО «Новошахтинский ЗНП»	2 640,0	-	2 640,0

Продолжение таблицы 1.1.

ЗАО «НефтеХимСервис»	2 564,9	-	2 564,9
ООО «НОВАТЭК-Усть-Луга»	-	4 696,7	4 696,7
ГПЗ ОАО «Газпром»	-	5 728,5	5 728,5
Прочие (в т.ч. мини-НПЗ)	3 890,4	4 707,4	8 597,8
<b>ИТОГО</b>	<b>261 845,9</b>	<b>28 161,7</b>	<b>290 007,6</b>

Как показывает анализ приведенных в таблице 1 данных, переработка основной доли нефти осуществляется на 36 наиболее крупных НПЗ с объемом переработки более 290 007,6 тыс. т в год [24].

Средний объем переработки НПЗ в 2014 г. составил 8 055, 76 тыс. тонн в год.

Объемы переработанной нефти в 2014 г. на российских предприятиях, поступившей на переработку по системе магистральных нефтепроводов АК «Транснефть», увеличились на 4,6% по сравнению с 2013 г.

Объемы переработанной нефти в 2014 г. на российских предприятиях, поступившей на переработку помимо системы магистральных нефтепроводов АК «Транснефть», увеличились на 5,3% по сравнению с 2013 г.

Увеличение поставок нефти и объемов ее переработки на российских НПЗ свидетельствует о повышении спроса нефти на внутреннем рынке, готовностью российских НПЗ к переработке нефти и приводит к дополнительной загрузке мощностей российских НПЗ.

Рынок нефтепереработки внутри Российской Федерации растет. Крупным нефтяным Компаниям, приведенным в таблице 1, принадлежит до 90% мощностей по переработке нефти и они вкладывают значительные средства в модернизацию своих производственных фондов, обновляя оборудование и технологии с целью повышения безопасности ведения процессов, повышения глубины переработки, увеличения эффективности производства и других технико-экономических показателей [73].

Кроме того, существующий дисбаланс доли продажи нефти как сырья и возможностей существующих НПЗ по переработке нефти, экономическая целесообразность реализации готовых продуктов, а не сырья, свидетельствует о перспективе развития перерабатывающего сектора нефтяной промышленности и

увеличения объемов реализации готовой товарной продукции в Российской Федерации [73, 89].

Таким образом, рынок нефтепереработки Российской Федерации является достаточно развивающимся и перспективным, как с точки зрения обеспечения потребностей внутреннего рынка, так и для получения возможности экспорта нефтепродуктов при условии соответствия качества российских нефтепродуктов мировым требованиям.

## **1.2 Типовая укрупненная структура переработки нефти**

Типовая укрупненная структура нефтепереработки, представленная на рисунке 1.1, включает 3 основные стадии.

1. На первой стадии нефтяное сырьё разделяется на фракции, которые различаются интервалами температур кипения.
2. На второй стадии фракции, полученные после первичного разделения, перерабатываются посредством химических превращений содержащихся в них углеводородов, в результате чего происходит выработка компонентов товарных нефтепродуктов.
3. На третьей стадии приготовления и отгрузки готовой продукции происходит смешение компонентов товарных нефтепродуктов по заранее рассчитанной рецептуре с использованием различных необходимых присадок, которые позволяют получить доставляемые потребителям товарные нефтепродукты с заданными показателями качества.

Каждая стадия реализуется как сложная совокупность взаимосвязанных последовательных операций по преобразования потоков сырья и энергии, которые представляет собой процессы различной физической и химической природы: нагрев, конденсацию, охлаждение, диффузию, физическое смешение или разделение потоков, химические превращения, тепло- и массообмен и др. При этом отдельные стадии связаны между собой различными энергетическими и материальными потоками.

Проведенный анализ показал, что наиболее высокотоннажными, энергоемкими и ресурсозатратными, являются процессы первичной переработки нефти, существенно

влияющие на качество реализации последующих стадий, а, следовательно, и конечной продукции, в целом. Данное обстоятельство является одним из определяющих выбор процессов первичной нефтепереработки в качестве сложного объекта системного анализа, управления и оптимизации.

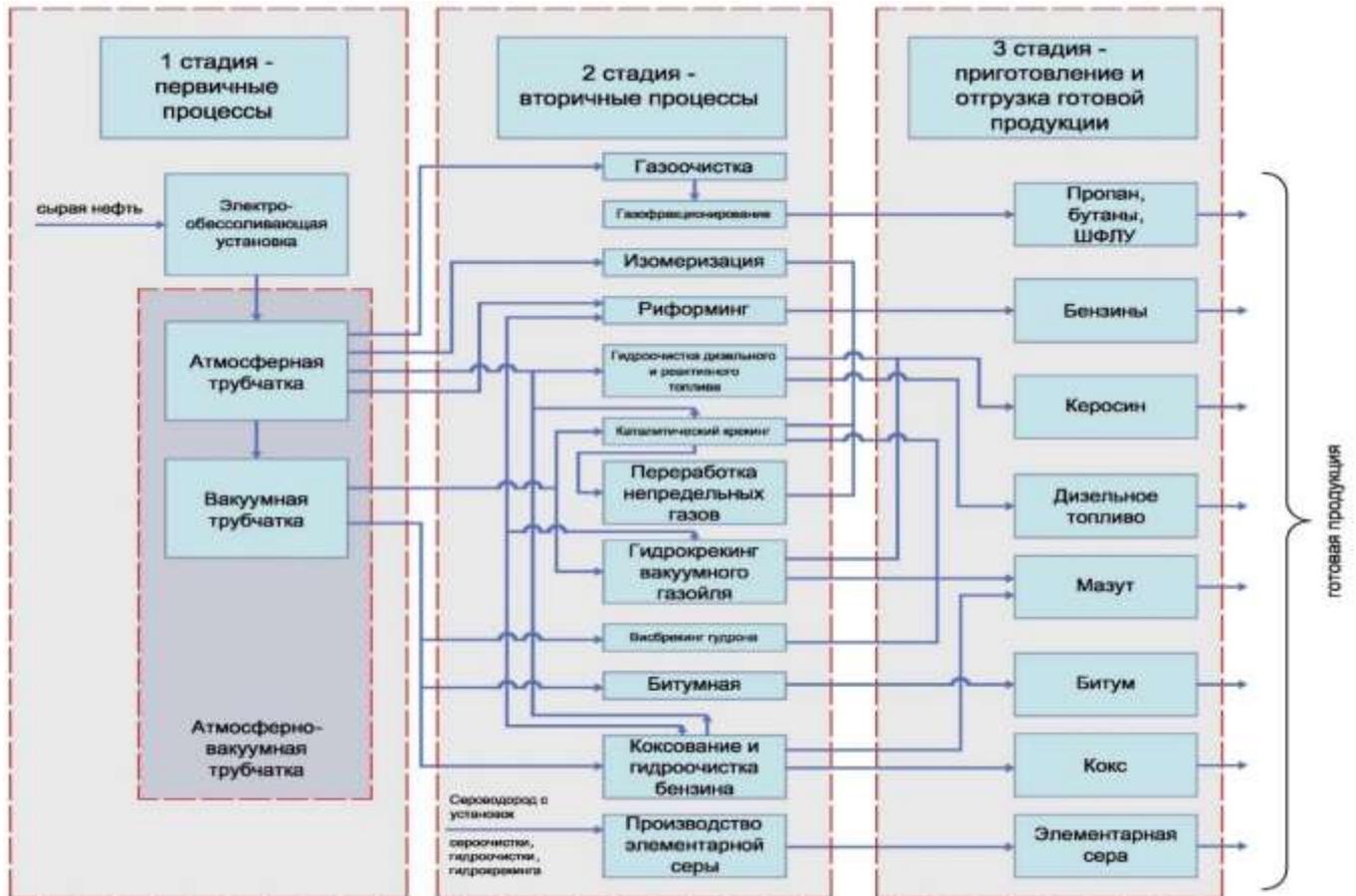


Рисунок 1.1 - Типовая укрупненная структура нефтепереработки

Перед первичной переработкой нефть подвергают электрообессоливанию, т.к. содержащиеся в сырой нефти соли приводят к сильной коррозии технологического оборудования.

Для этого в нефть добавляют воду и направляют на электрообессоливающую установку (ЭЛОУ), где в электродегидраторах с использованием деэмульгаторов разделяется нефть и вода с растворенными в ней солями.

Обессоленная нефть с ЭЛОУ поступает на первичную переработку.

Основными типами промышленных установок, на которых осуществляются процессы перегонки нефти являются: атмосферные трубчатые установки (АТ), вакуумные трубчатые установки (ВТ) и атмосферно-вакуумные трубчатые установки (АВТ).

#### 1.2.1 Установки атмосферной трубчатки

Установки АТ предназначены для неглубокой перегонки нефти, в результате которой получают топливные (бензиновые, керосиновые, дизельные) фракции и мазут.

Атмосферная перегонка позволяет произвести отбор светлых нефтяных фракций: бензиновой, керосиновой и дизельных, которые имеют температуру кипения ниже  $360^{\circ}\text{C}$ . Потенциальный выход светлых фракций составляет около (45-60)%. Остатком атмосферной перегонки является мазут.

Процесс атмосферной перегонки представляет собой разделение предварительно нагретой в печи нефти на отдельные фракции. Данный процесс протекает в ректификационной колонне, представляющей собой вертикальный цилиндрический аппарат. Потоки пара и жидкостей движутся в противоположных направлениях через специальные тарелки (контактные устройства), количество которых обычно варьируется от 20 до 60. При этом пар поднимается вверх, а жидкость опускается вниз.

Существует огромное разнообразие размеров и конфигураций ректификационных колонн, применяющихся практически на всех установках нефтеперерабатывающих производств нефтяной отрасли. Поскольку к нижней части ректификационной колонны осуществляется подвод тепла, а в верхней её части осуществляется отбор тепла, происходит постепенное снижение температуры от низа колонны к ее верху. Это позволяет отводить бензиновые фракции в виде паров вверху колонны, а также конденсировать и выводить пары керосиновой и дизельных фракций в соответствующих частях колонны, при этом оставшийся жидким мазут откачивается с низа колонны [6, 48, 76, 85].

#### 1.2.2 Установки вакуумной трубчатки

Установки вакуумной трубчатки предназначены для перегонки мазута топливного профиля. Основным назначением вакуумной перегонки мазутов является получение широких фракций с температурой кипения в диапазоне  $(350-550)^{\circ}\text{C}$  (и выше).

Получаемые фракции могут использоваться как сырье в каталитических процессах или в качестве дистиллятов при производстве парафинов и масел. Выход широкой фракции составляет обычно (40-60) % от мазута.

Согласно технологическим требованиям в состав мазута, который поступает в вакуумный блок из атмосферной колонны, должны входить фракции, имеющие температуру кипения ниже 350°C. Поскольку увеличение массового содержания светлых фракций влечет за собой увеличение диаметра вакуумной колонны, затруднение полной конденсации паров на вершине колонны и увеличение загрузки системы, создающей вакуум, то считается, что содержание светлых фракций не должно превышать 5% (от массового объема). Современные вакуумные колонны достигают в диаметре до 9 м (в зависимости от их мощности).

На отбор, качество продуктов и стабильность работы влияют схемы орошения вакуумных колонн. Важным конструктивным элементом вакуумной колонны является узел ввода сырья и разделения паровой и жидкой фаз в сечении питания. Работа вакуумного блока зависит так же и от конденсационно-вакуумсоздающей системы [6, 48, 76, 85].

### 1.2.3 Стабилизация и вторичная перегонка бензина

Во фракциях легкого и тяжелого бензинов, отбираемых в верхних частях отбензинивающей и атмосферной колонн, соответственно, содержатся растворенные в них углеводородные газы (C1-C4). Это обстоятельство определяет необходимость стабилизации прямогонных бензинов, в результате которой происходит выделение сухого (C1-C2) и сжиженного (C2-C4) газов, которые потом могут быть рационально использованы.

Низкая детонационная стойкость обуславливает невозможность использования прямогонных бензинов после их предварительной стабилизации в качестве автомобильных бензинов. Для регулирования пусковых свойств и упругости паров товарных бензинов обычно используется только головная фракция бензина, имеющая температуру кипения ниже 85°C и обладающая достаточно высокой детонационной стойкостью.

Для реализации последующих стадий переработки необходимо подвергнуть стабилизированные бензины вторичной перегонке на фракции, которые в дальнейшем используются в качестве сырья в процессах каталитического риформинга, реализуемых с целью получения высокооктановых компонентов автобензинов или ароматических углеводородов: бензола, толуола и ксилола. При топливном направлении переработки прямогонные бензины разделяют на две фракции: с температурой кипения ниже 85°C и с температурой кипения в диапазоне от 85 °C до 180°C.

#### 1.2.4 Установки атмосферно-вакуумной трубчатки

В большинстве случаев атмосферную и вакуумную перегонку ведут на одной установке, осуществляющей процессы перегонки как под нормальным, так и под пониженным давлением. Такие комбинированные установки называются установками атмосферно-вакуумной трубчатки.

Установки АВТ являются основными в технологическом процессе переработки нефти. Остатком при атмосферно-вакуумной перегонке нефти является гудрон, который используется или для получения котельного топлива, или в качестве сырья для получения высоковязких масел, битума, кокса.

АВТ, являясь комбинированной установкой, занимает меньшую площадь, расходует меньше топлива, электроэнергии по сравнению с последовательно расположенными установками АТ и ВТ.

Поэтому на современных НПЗ с целью оптимизации площадей, повышения отборов, снижения затрат на первичные процессы переработки стремятся размещать и эксплуатировать именно установки АВТ в различной конфигурации (ЭЛОУ, АТ, ВТ, блок стабилизации), что позволяет реализовать все вышеперечисленные процессы [6, 48, 76, 85]. Доля установок АВТ в первичной переработке действующих российских НПЗ составляет около 95 %.

Мощность установок АВТ обычно составляет от 3 до 8 млн. т сырой нефти в год и более. На одном НПЗ обычно располагается несколько установок переработки, чтобы исключить полную остановку производственного цикла на НПЗ при необходимости ремонта одной из установок.

С целью повышения глубины переработки фракции поступают на установки вторичной переработки. В зависимости от качества нефти и требуемой номенклатуры вторичная переработка может включать следующие процессы: газоочистку, газофракционирование, изомеризацию, риформинг, гидроочистку, каталитический крекинг, переработку непредельных газов, гидрокрекинг, висбрекинг, алкилирование, производство серы и другие процессы [6, 48, 76, 85].

### **1.3 Системные проблемы нефтеперерабатывающей промышленности**

Российская нефтеперерабатывающая промышленность значительно отстает от мировой по большинству технико-экономических показателей. Среди основных системных проблем нефтепереработки как ключевого элемента нефтяной отрасли РФ можно выделить следующие:

- низкий коэффициент извлечения нефти;
- низкое качество и нестабильный состав нефтепродуктов;
- недостаточный уровень автоматизации и качества управления процессами нефтепереработки;
- недостаточная эффективность работы существующего производственного оборудования;
- низкая глубина переработки;
- недозагруженность первичных процессов переработки при существенном дефиците мощностей вторичной переработки;
- невысокое качество конечной продукции, ее несоответствие экспортным требованиям;
- отсталая производственная структура;
- высокий уровень физического износа основных ресурсов и оборудования;
- высокий уровень энергопотребления;
- недостаточность инвестиций для финансирования программы поддержания основных фондов и инвестиционной деятельности [66, 73, 89, 92, 96].

Правительством Российской Федерации предпринимаются решительные меры для обеспечения повышения эффективности топливно-энергетического сектора в целом. С этой целью разработана «Энергетическая стратегия России до 2030 года», подготовлена

«Энергетическая стратегия России до 2035 года». Реализация стратегии в нефтяной отрасли должна привести к повышению эффективности работы нефтеперерабатывающих заводов за счет применения передовых технологий (рост с 72 до 90 % глубины переработки нефти с производством моторных топлив высших экологических классов, повышение выхода светлых нефтепродуктов с 58 % до 74 %) при снижении объемов нефти, направляемой на переработку, до 277 млн. т в 2020 году и до 240 млн. т к 2035 году [96, 97].

Процессы первичной переработки нефти являются наиболее крупнотоннажными, ресурсоемкими и высоко энергозатратными, характеризуются частой сменой фракционного состава перерабатываемых нефтей. От технико-экономических показателей первичных процессов переработки нефти (качество получаемых компонентов, процент отбора фракций легких углеводородов, удельный объем потребления топлива и др.), зависит качество функционирования остальных технологических стадий переработки нефти, поэтому решение системных проблем первичной нефтепереработки окажет существенное положительное влияние на систему нефтепереработки в целом и, как следствие, на всю нефтяную отрасль Российской Федерации.

Многие из перечисленных проблем нефтеперерабатывающей отрасли, связанные в том числе и со сложившейся неблагоприятной экономической ситуацией в России и мире, напрямую касаются вопросов эффективности управления процессами первичной переработки и качества получаемых нефтепродуктов.

К основным системным проблемам, возникающим в управлении многостадийными процессами первичной переработки нефти, относятся недостаточный уровень автоматизации и качества управления процессами нефтепереработки, недостаточная эффективность работы существующего производственного оборудования, невысокое качество продуктов нефтепереработки.

Для преодоления указанных системных проблем вертикально интегрированные нефтяные компании разработали и реализуют комплекс мер по реконструкции существующих производств и строительству новых установок с целью повышения

эффективности процессов первичной нефтепереработки и качества выпускаемых нефтепродуктов.

Однако, решение указанных проблем существенно осложняется сложившейся в стране и мире экономической ситуацией. В связи с падением цен на нефть курс рубля по отношению к основным валютам значительно снизился. Кроме того, в результате действующих экономических санкций ограничен доступ к заемному финансированию. С учетом того, что значительная часть оборудования для модернизации объектов нефтепереработки приобретается за валюту, нефтяные компании, реализующие программы модернизации производства, сталкиваются с недостатком средств для финансирования своих инвестиционных проектов. Нефтяные компании вынуждены приостанавливать строительство новых объектов, пересматривать графики строительства новых и модернизации существующих объектов, переносить пуск объектов на более поздний срок.

Кроме того, непрерывно возрастающая конкуренция в мировой экономике и переход к новым стандартам энерго- и ресурсосбережения, качества и экологической безопасности создают необходимость непрерывного ужесточения требований, предъявляемых к процессам первичной переработки нефти, что обуславливает очевидную потребность в разработке новых системных подходов к увеличению эффективности производства в нефтяной отрасли, оптимизации управления основными процессами и, как следствие, к повышению качества конечных продуктов нефтепереработки без существенных капитальных вложений.

Выраженный системный характер данной проблемы определяет необходимость ее решения на базе системных исследований с использованием современных методов и средств системного анализа, теории моделирования, управления и оптимизации.

Вышеизложенное подтверждает актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы системного анализа и оптимизации алгоритмов управления многостадийными процессами первичной переработки нефти.

Основные результаты и выводы:

1. Определена ключевая роль нефтепереработки как системного элемента топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, проведен анализ объемов

- поставки нефти на основные российские нефтеперерабатывающие предприятия.
2. Установлено, что рынок нефтепереработки является динамично развивающимся и перспективным, как с точки зрения обеспечения потребностей внутреннего рынка, так и для получения возможностей экспорта российских нефтепродуктов при условии соответствия их качества мировым требованиям.
  3. Рассмотрена укрупненная структура нефтепереработки, включающая три основные связанные между собой многочисленными энергетическими и материальными потоками стадии, каждая из которых реализуется как сложная совокупность взаимосвязанных последовательных операций по преобразования потоков сырья и энергии, представляющих собой процессы различной физической и химической природы. При наиболее высокотоннажном, энергоемким и ресурсозатратным, является процесс первичной переработки нефти. Данное обстоятельство определило выбор процесса первичной нефтепереработки на установках атмосферно-вакуумной перегонки в качестве объекта системного анализа, управления и оптимизации.
  4. Проведен обзор основных типов промышленных установок первичной переработки нефти, к которым, прежде всего, относятся установки атмосферной трубчатки, вакуумной трубчатки и атмосферно-вакуумной трубчатки, при этом доля установок АВТ в первичной переработке действующих российских НПЗ составляет около 95 %.
  5. Рассмотрены и проанализированы основные системные проблемы нефтепереработки как ключевого элемента нефтяной отрасли РФ, к которым относятся следующие: низкий коэффициент извлечения нефти, низкое качество и нестабильный состав нефтепродуктов, недостаточный уровень автоматизации и качества управления процессами нефтепереработки, недостаточная эффективность работы существующего производственного оборудования; низкая глубина переработки, недозагруженность первичных процессов переработки при существенном дефиците мощностей вторичной переработки, невысокое качество конечной продукции, ее несоответствие экспортным требованиям, отсталая производственная структура, высокий уровень физического износа основных

ресурсов и оборудования, высокий уровень энергопотребления, недостаточность инвестиций для финансирования программы поддержания основных фондов и инвестиционной деятельности.

6. Установлено, что одной из основных проблем первичной нефтепереработки является недостаточный уровень эффективности работы существующего оборудования и качества управления, решение которой обуславливает необходимость разработки новых системных подходов к увеличению эффективности производства в нефтяной отрасли, оптимизации управления основными процессами и, как следствие, к повышению качества конечных продуктов нефтепереработки без существенных капитальных вложений.

## **2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНОЙ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**

### **2.1 Основные подходы к системному анализу процессов первичной нефтепереработки**

Проблемам анализа эффективности процессов переработки нефти посвящены работы специалистов, занимающихся изучением и внедрением систем усовершенствованного управления, например, Дозорцева В.М., Кнеллера Д.В. [28, 32, 54].

В их работах подробно изложены пути повышения эффективности процессов переработки нефти на различных этапах, применение усовершенствованного управления в химических, нефтехимических процессах. В своих работах авторы подробно излагают возможности повышения эффективности процессов за счет применения прогнозирующих моделей в сочетании с разработкой и внедрением виртуальных анализаторов. Этот подход себя оправдал и подтвержден положительным опытом внедрения на практике.

Вопросам разработки общих системных подходов анализа качества управления сложными технологическими процессами посвящены исследования Малина А.С., Мухина В.И., Минскера И.Н., Ицковича Э.Л. [47, 51, 68, 70] и других авторов.

Основные подходы к комплексному аудиту качества управления процессом разделения нефти прорабатывались специалистами ОАО «СвНИИ НП». Ими были разработаны рекомендации по построению локальных систем регулирования, которые носят частный характер [41].

Несмотря на имеющиеся результаты, к настоящему времени вопросы системного анализа сложных многостадийных процессов первичной нефтепереработки, управляемых многоконтурными каскадными САУ, изучены недостаточно.

Не существует единой стратегии системного анализа данных отраслевых процессов, позволяющих на основе интегральных системных количественных оценок выявить неэффективно управляемые технологические параметры и разработать рекомендации по оптимизации исследуемых систем.

Таким образом, возникает задача разработки методики системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации, которая позволит на основе построения системных интегральных оценок относительной эффективности локальных контуров регулирования выявить неэффективно управляемые технологические параметры и оптимизировать соответствующие многосвязные системы управления. Полученные в результате анализа формализованные (количественные) оценки должны отражать соответствие оцениваемых систем управления действующим нормативным документам, выбранным системным критериям технологической эффективности, промышленной и экологической безопасности, ресурсосбережения и энергоэффективности. Системные оценки позволят разработать рекомендации по повышению уровня автоматизации и эффективности технологического управления.

Решение задачи разработки алгоритмов оптимизации по частотным критериям качества структуры и параметров многосвязных систем управления многостадийными процессами первичной нефтепереработки на основе результатов оценки качества управления позволит повысить эффективность производственных процессов при одновременной минимизации затрат материальных ресурсов и энергии без дополнительных капитальных затрат.

В основу системного анализа многостадийных процессов первичной переработки нефти положены следующие принципы и допущения:

1) Многостадийный процесс первичной переработки нефти включает последовательные операции преобразования потоков исходного сырья в потоки продуктов [2, 3, 6, 48]. Системный анализ технологической топологии процесса, состоящего из различных стадий нагрева, конденсации, охлаждения, смешения или разделения потоков, позволяет представить её в виде взаимосвязанной системы технологических операторов, классифицируемых по их функциональному назначению. Технологические операторы определяются элементарными не упрощаемыми технологическими операциями, осуществляемыми над технологическими потоками. Таким образом, совокупность технологических операторов и технологических потоков

можно представить в виде технологической схемы установки первичной переработки нефти и осуществляемого на ней процесса.

2) Эффективность работы установок и выполнение планового производственного задания зависят от различных факторов, в том числе аварийно-опасных [11, 38, 50, 60]. Основным возмущением, наиболее сильно влияющим на качество динамического процесса первичной переработки нефти, является изменение качества перерабатываемого сырья. Для упрощения анализа управления процессом ректификации целесообразно все остальные возмущения, кроме аварийных ситуаций, отказов оборудования, непредвиденных остановов, заменить при постоянных отборах проб нефтепродуктов - эквивалентными изменениями качества сырья или, напротив, при неизменном качестве сырья - изменениями отборов.

3) Системы автоматического регулирования и автоматизированного управления применяются для компенсации указанных возмущений с целью обеспечения надежности и экономической эффективности производства на плановом уровне. Интегральную оценку качества управления установкой первичной переработки нефти, учитывая доминирование возмущения, связанного с изменением качества сырья, можно, в первую очередь, определить путем сравнения вариации качества продуктовых фракций с вариацией качества сырья. При этом, чем ниже влияние доминирующего возмущения на качество получаемых продуктов, тем выше качество управления. Наилучшим качеством управления считается ситуация, когда колебания качества получаемых нефтепродуктов при наличии любых возмущений процесса полностью отсутствуют. Интегральным показателем, отражающим качество потоков сырья или получаемых продуктовых фракций, можно считать удельный вес нефтепродукта.

4) Управление ходом многостадийного процесса на типовых установках первичной переработки нефти, в том числе на установках АВТ, осуществляет автоматизированная система управления, которая может быть представлена в виде трех основных подсистем (рисунок 2.1). Эти подсистемы предназначены для решения локальных специализированных задач для оперативного, точного, безопасного и экономически эффективного управления [76].

*Информационно-измерительная подсистема* обеспечивает измерения параметров процесса и является информационной и технической базой для подсистем промышленной безопасности и технологического управления. Основными критериями качества работы подсистемы являются полнота информации и точность средств измерения.

*Подсистема технологического управления* обеспечивает выполнение плановых заданий по качеству и объему производства нефтепродуктов, осуществляя функции контроля и регулирования параметров технологического процесса. Основными критериями качества работы подсистемы являются соответствие заданных показателей качества управления локальными САР в установившихся и динамических режимах нормативам, установленным по требованиям регламента и нормативно-технической документации.

Обеспечение заданного уровня надежности производства и минимизацию рисков деятельности нефтеперерабатывающего предприятия в целом осуществляет *подсистема промышленной безопасности*. Надежность и соответствие основных функций, алгоритмов работы системы, перечня контролируемых параметров требованиям нормативной документации можно считать критериями работы подсистемы промышленной безопасности.

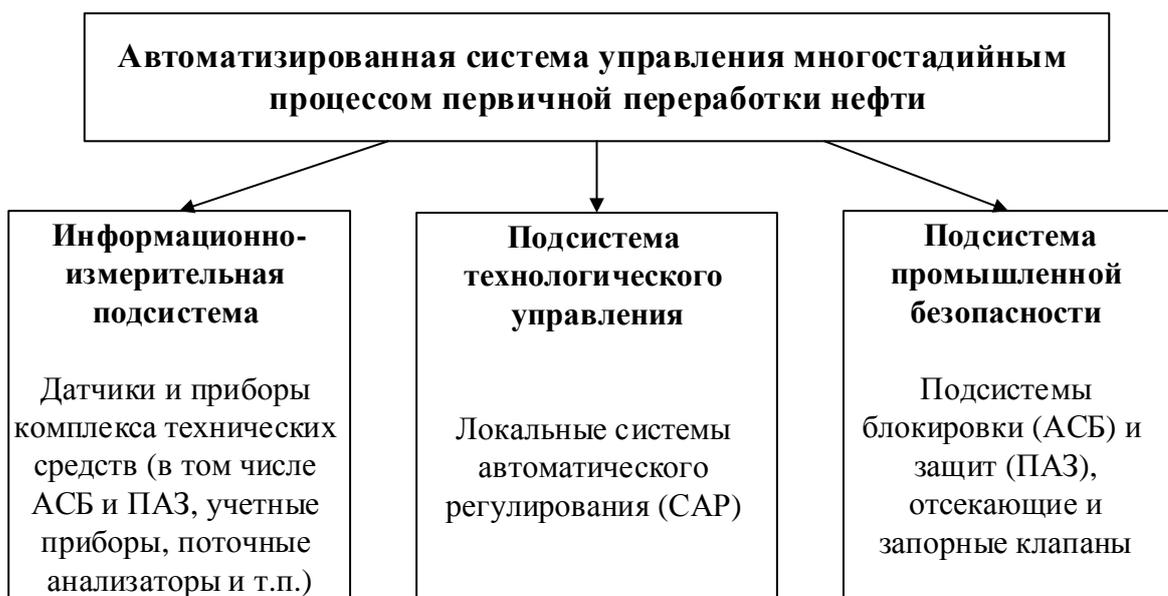


Рисунок 2.1 - Структура автоматизированной системы управления многостадийным процессом первичной нефтепереработки

## **2.2 Методика системного анализа процесса первичной нефтепереработки**

Исходными данными для системного анализа являются: технологический регламент, схемы описания процесса первичной нефтепереработки, отчетные материалы о работе предприятия, технологическая инструкция, схема информационных потоков автоматизированной системы управления предприятием, другие нормативные документы предприятия.

На рисунке 2.2 представлен алгоритм системного анализа многостадийного процесса первичной нефтепереработки, который заключается в реализации следующих этапов [30, 58]:

### **1. Анализ технологической структуры установки первичной нефтепереработки.**

Состоит из процедур сбора исходных данных в установленных формах, детального обследования установки и разработки топологического описания процесса разделения нефти. На этом этапе характеризуются входные и выходные потоки, составляются структурная и укрупненная технологическая схемы, которые полностью описывают технологическую структуру, составляются операторные схемы блоков и узлов, которые отражают все связи технологической топологии, осуществляется классификация и обозначение параметров, потоков блоков и узлов [2, 18-20, 51].

### **2. Анализ подсистемы технологического управления**

Включает исследование состава и качества управления локальных САР. На этом этапе анализируются существующие контуры регулирования основных технологических параметров процессов, составляется их перечень, определяются характеристики локальных САР и составляется перечень технологических параметров и потоков. По результатам анализа определяются оценки по абсолютным и интегральным показателям качества процессов управления в локальных автоматизированных системах регулирования технологического режима [51], которые заносятся в паспорта локальных САР.

### **3. Анализ информационно-измерительной подсистемы установки первичной нефтепереработки.**

Включает исследование состава комплекса технических средств и качества измерения параметров потоков и оборудования. На этом этапе определяются требования

к измерению параметров потоков и оборудования, анализируются характеристики существующих измерительных приборов и оцениваются качество и требования измерения параметров технологических потоков и оборудования блоков и узлов [2, 51].

#### 4. Анализ подсистем блокировок и защит установки первичной нефтепереработки.

Включает исследование состава и работоспособности автоматических систем блокировок (АСБ) и противоаварийных защит (ПАЗ). На этом этапе определяется характеристика подсистем АСБ и ПАЗ и оценивается степень соответствия предъявляемым требованиям работоспособности [19, 21, 51].

#### 5. Анализ энергетической эффективности АСУ ТП установки первичной нефтепереработки.

Включает характеристику принятых и полученных нефтяных продуктов за отчетный период, расчет планового и фактического удельного расхода тепловой энергии на переработку, определение степени энергетической эффективности АСУ ТП [84].

#### 6. Анализ уровня автоматизации установки первичной нефтепереработки.

Включает анализ количественных и качественных показателей степени автоматизации установки первичной нефтепереработки, в том числе определяются [51]:

- оценка уровня автоматизации функций управления отдельными процессами;
- оценка уровня контроля показателей качества регулирования локальных систем;
- оценка уровня контроля и регистрации параметров технологических потоков и оборудования;
- оценка уровня анализа технологических ситуаций;
- оценка уровня передачи информации на верхний уровень управления;
- оценка уровня пуска и останова оборудования.

#### 7. Анализ надежности АСУ ТП установки первичной нефтепереработки.

Включает составление расчетной логической схемы надежности и расчет интенсивности отказов всех компонентов САР, в том числе датчики, измерительные каналы, средства отображения информации, регуляторы, каналы связи и исполнительные органы [25].

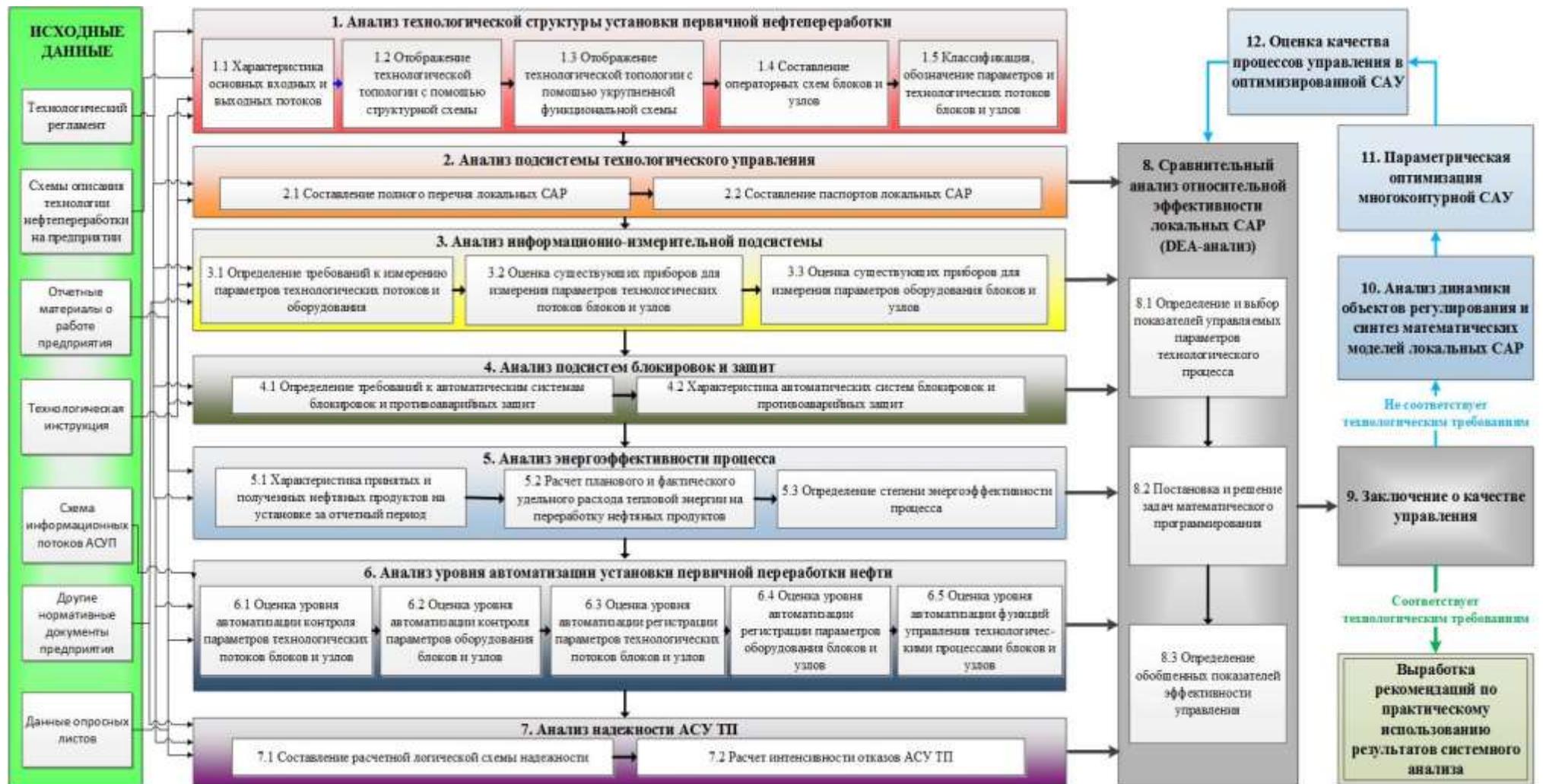


Рисунок 2.2 – Методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации

8. Сравнительный анализ относительной эффективности локальных САР установки первичной нефтепереработки.

Анализ основан на многокритериальном методе анализа DEA (Data Envelopment Analysis) и включает оценку сравнительных интегральных показателей качества САР в статическом и динамическом режимах [15, 26, 27, 42, 77, 98-107], что позволяет установить параметры, управление которыми соответствует технологическим требованиям, и выявить, насколько показатели неэффективно управляемых параметров далеки от своих потенциально возможных эффективных значений.

9. Формирование заключения о качестве управления.

В случае соответствия качества управления предъявляемым технологическим требованиям вырабатываются рекомендации по практическому использованию результатов системного анализа, и задача считается решенной. В случае несоответствия качества управления требованиям технологии осуществляется переход к последующим этапам.

10. Анализ динамики контуров с неэффективно управляемыми параметрами.

Заключается в выборе и обосновании ориентированных на использование в задачах параметрической оптимизации математических моделей для описания объектов регулирования локальных САР в форме передаточных функций по рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий.

11. Параметрическая оптимизация САР с неэффективно управляемыми параметрами.

Заключается в решении задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов локальных САР с неэффективно управляемыми параметрами многоконтурной системы управления на основе альтернативного метода.

12. Оценка абсолютных показателей качества процессов управления в оптимизированных локальных контурах в статическом и динамическом режимах работы, после чего осуществляется переход к этапу 8.

## **2.3 Методика оценки уровня автоматизации и качества управления процессом первичной переработки нефти**

Для оценки уровня автоматизации и качества управления процессов первичной переработки нефти в диссертации разработана методика, регламентирующая алгоритмы получения, сортировки, обработки и анализа информации согласно сформулированным требованиям к форме представления исходных данных и результатам анализа на каждом из перечисленных в разделе 2.2 этапов 1-8 системного анализа.

### **2.3.1 Анализ структуры первичной нефтепереработки**

Структура первичной нефтепереработки рассматривается как целостная система взаимодействия аппаратов, машин и технологических процессов, обеспечивающая переработку сырья в полуфабрикаты и в продукты потребления путем проведения требуемых технологических операций [2].

На первом этапе по технологическому регламенту определяются входные и выходные потоки установки первичной нефтепереработки и составляется схема входных и выходных потоков. Пример схемы входных и выходных потоков для установки первичной нефтепереработки АВТ-4 АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод» представлен на рисунке 2.3 [48, 76].

Характеристика входных потоков (исходного сырья, реагентов и катализаторов) и выходных потоков (полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства) установки первичной нефтепереработки определяется на основании технологического регламента для каждого из потоков: наименование, контролируемые показатели и их нормативные значения, назначение потоков. В приложении А, таблицах А.1 и А.2, на примере установки первичной нефтепереработки АВТ-4 приведены соответственно характеристики входных и выходных потоков.

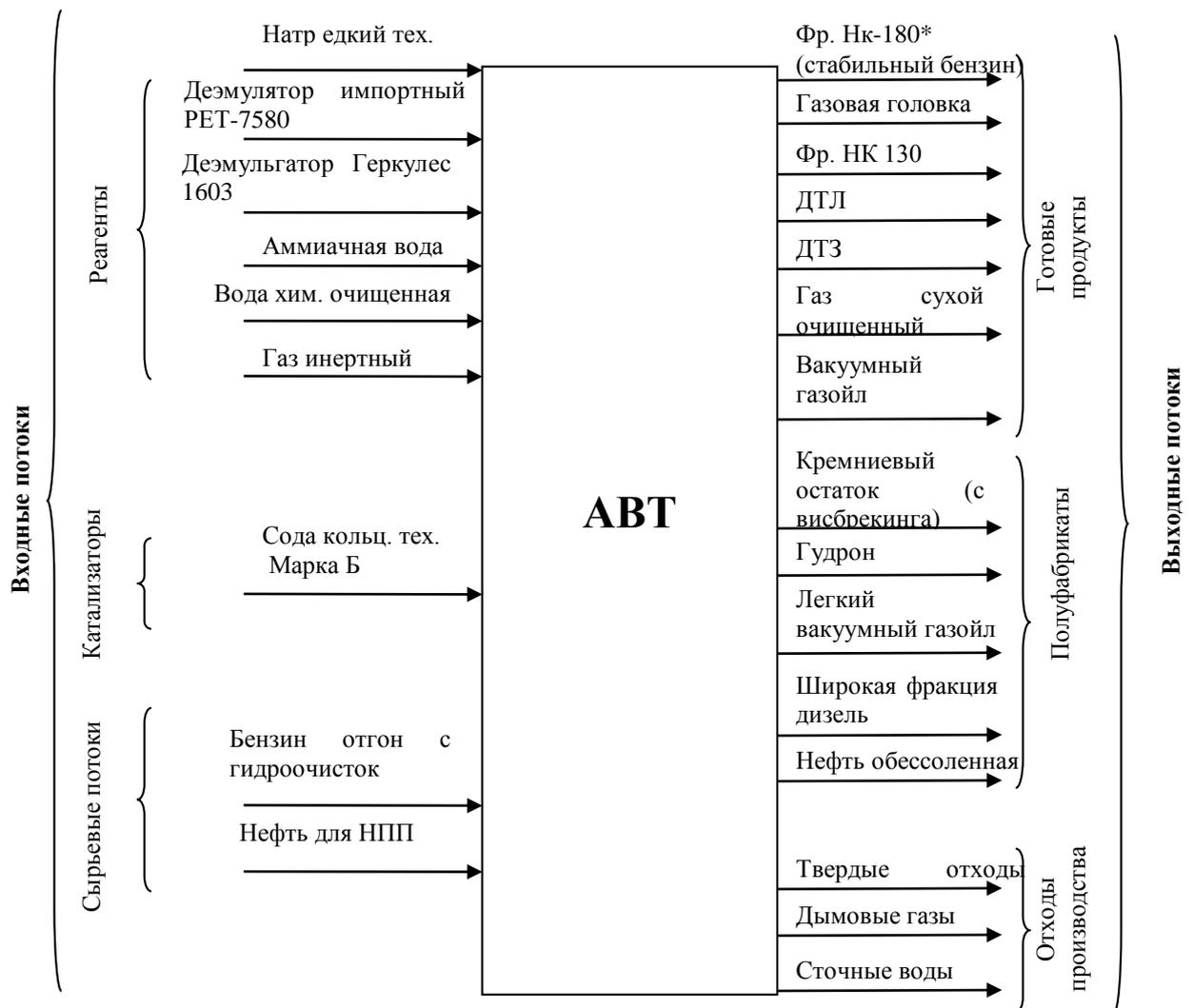


Рисунок 2.3 – Схема входных и выходных потоков установки первичной нефтепереработки АВТ-4

2.3.2 Отображение топологии установки первичной нефтепереработки с помощью структурной схемы

На следующем этапе системного анализа проводится декомпозиция схемы входных и выходных потоков (см. рисунок 2.3): составляется структурная схема установки, при этом выделяется типовая структура, характерная для большинства установок первичной нефтепереработки, включающая крупные технологические единицы: блоки и узлы [48, 76].

1. Блок электрообессоливающей установки.

Блок предназначен для удаления солей, содержащихся в сырой нефти и вызывающих коррозию технологического оборудования. Принцип действия заключается в следующем:

сырая нефть смешивается с водой, в которой при температуре (100-120)°С соли растворяются, и поступает в электрообессоливающую установку (ЭЛОУ), где в электродегидраторах – специальных аппаратах с вмонтированными внутри электродами, под воздействием тока высокого напряжения (25 кВ и более), эмульсия (смесь нефти и воды) разрушается. При этом вода с растворенными в ней солями собирается в нижней части аппарата и откачивается. Причем для более эффективного разделения эмульсии в нефть вводятся специальные вещества – деэмульгаторы.

#### 2. Блок атмосферно-вакуумной трубчатki.

Основное назначение блока заключается в разделении нефти на фракции и их вывод с установки. Входным сырьевым потоком для установки атмосферно-вакуумной перегонки нефти является обессоленная нефть, которая поступает с ЭЛОУ. Технологический процесс атмосферной перегонки нефти происходит в атмосферно-вакуумных трубчатках (АВТ) и осуществляется путем двукратного испарения нефти. В состав блока входят две ректификационные колонны К-1 и К-2. В колонны К-1 происходит отгон легких бензиновых фракций, из колонны К-2 выводятся остальные бензиновые фракции и боковые дистилляты - компоненты нефтепродуктов.

#### 3. Вакуумный блок.

В основной состав оборудования вакуумного блока входят вакуумная колонна и паровые или жидкостные эжекторы. В вакуумной колонне происходит отбор от мазута масляных дистиллятов или вакуумного газойля – широкой масляной фракции. Остатком вакуумной перегонки является гудрон. Эжекторы предназначены для создания разрежения в вакуумной колонне (40-60) мм рт. ст. за счет чего снижается максимальная температура в колонне до (360-380)°С и создаются условия для отбора масляных дистиллятов.

#### 4. Блок стабилизации бензина.

Блок стабилизации бензина предназначен для отделения от бензина сжиженных газов, которые негативно влияют на качество, и выработки товарного прямогонного бензина. Кроме того, процесс стабилизации бензина используется для повышения октанового числа и производства ароматических углеводородов путем разгонки

бензиновой фракции на 2-5 узких фракций с помощью соответствующего количества колонн.

#### 5. Блок утилизации тепла.

Блок утилизации тепла дымовых газов трубчатых печей установок первичной нефтепереработки предназначен для использования физического тепла продуктов сгорания для выработки перегретого пара. Перегретый пар по паропроводам подается в колонны атмосферного и вакуумного блоков для поддержания температуры процесса крекинга.

#### 6. Блок защелачивания.

Процесс обработки раствором щелочи (защелачивание) необходим для удаления из нефтепродукта органических кислот, которые в результате химических реакций превращаются в натровые мыла и меркаптиды. Последние переходят в водный раствор щелочи и выводятся из нефтепродукта.

Пример структурной схемы установки АВТ-4 приведен на рисунке 2.4. Прямоугольники, обозначающие основные блоки установки первичной нефтепереработки имеют несколько входов и выходов. Каждый вход или выход представляет собой определенный технологический поток, а направленные линии указывают технологические связи между блоками, характеризующие направление передачи технологических потоков от одного элемента структурной схемы к другому. В качестве источника для составления структурных схем используются технологический регламент и схемы, которые составляются на предприятии для описания технологии процесса нефтепереработки. Характеристику технологических потоков каждого блока установки можно представить в виде таблиц, в которых указываются наименования, контролируемые показатели и их нормативные значения, назначение технологических потоков. В качестве примера, в приложении А, таблицах А.3 и А.4 приведены характеристики входных и выходных потоков вакуумного блока установки АВТ-4 соответственно.

### 2.3.3 Отображение топологии установки первичной нефтепереработки с помощью технологических схем

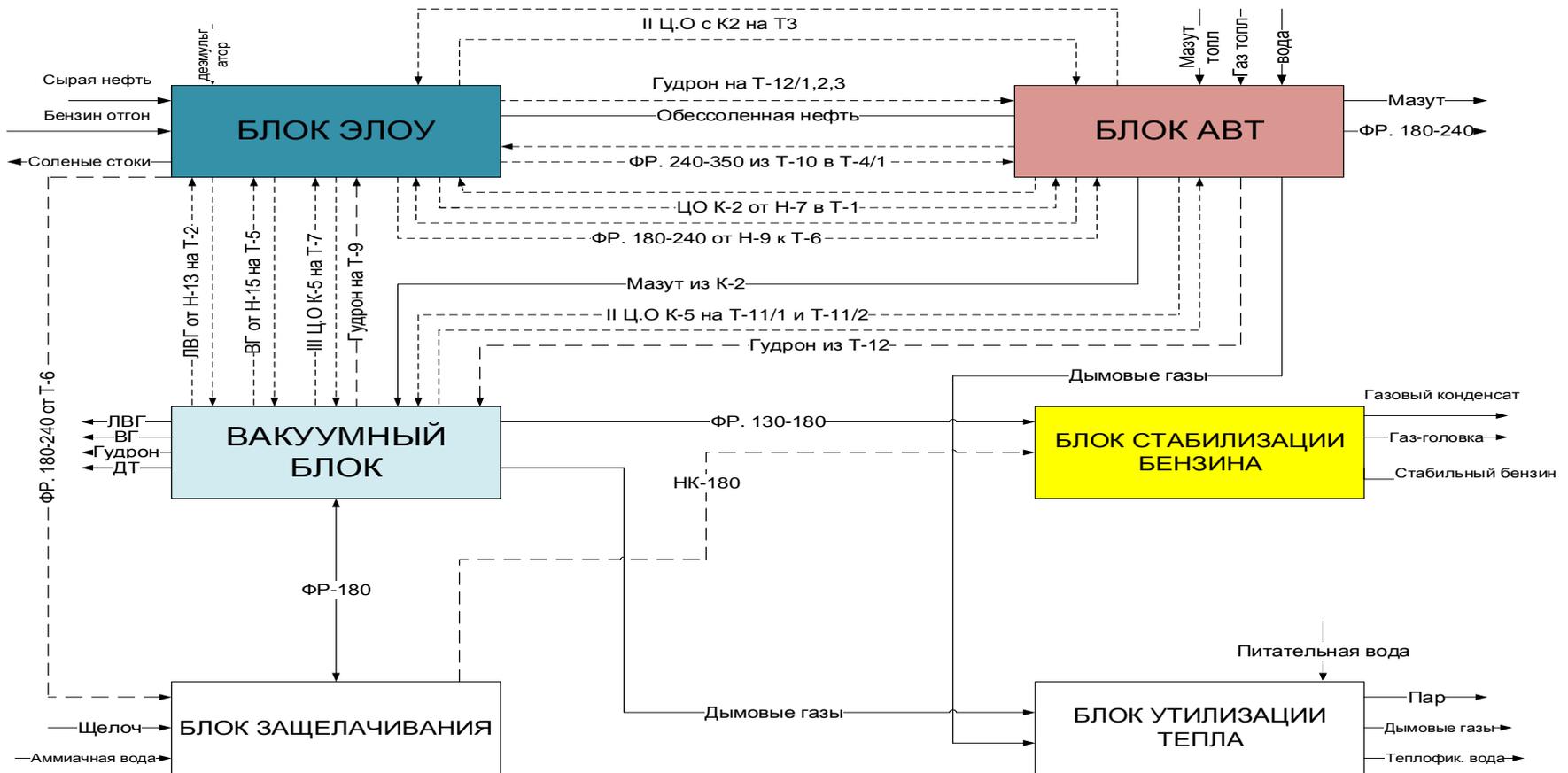


Рисунок 2.4 - Структурная схема установки АВТ-4

Укрупненная технологическая схема (УТС) установки первичной нефтепереработки включает изображения и взаимосвязи основных технологических элементов блоков и узлов. Каждый из этих элементов является технологической единицей или подсистемой и реализует какую-либо основную технологическую операцию или стадию технологического процесса. Основой для построения УТС являются используемые на предприятии технологические схемы, в которых описывается технология процесса нефтепереработки.

Детализированная технологическая схема (ДТС) выполняется по ГОСТ 2.701-84 ЕСКД и содержит описание многостадийного процесса нефтепереработки в виде взаимосвязей функциональных элементов технологического оборудования установки.

#### 2.3.4 Анализ технологических операторов и потоков установки первичной нефтепереработки

В качестве технологического оператора (ТО) рассматривается каждый элемент установки первичной нефтепереработки, который качественно и количественно преобразует параметры входных потоков  $k$ -го ( $K = 1, 2, \dots, k$ ) элемента технологической схемы (ТС)  $X^{(K)} = (x_1^{(K)}, x_2^{(K)}, \dots, x_n^{(K)})$  в параметры его выходных потоков  $Y^{(K)} = (y_1^{(K)}, y_2^{(K)}, \dots, y_m^{(K)})$ .

Существуют два класса ТО: основные и вспомогательные (см. рисунок 2.5). Основные ТО предназначены для обозначения основных химических и физических превращений, происходящих при преобразовании веществ и энергии в элементах ТС. Вспомогательные ТО предназначены для обозначения энергетических и фазовых явлений, сопровождающих разнообразные преобразования вещества и энергии в элементах ТС.

Классификация типовых ТО осуществляется в соответствии с таблицей 2.1. Принцип приведенной классификации отображает физические и химические явления в элементах производственного оборудования [2].

Для характеристики ТО основных блоков установки первичной нефтепереработки заполняются специальные таблицы, где указываются наименование и назначение ТО в технологическом процессе, наименование технологического оборудования (или его

элемента), в котором происходит указанный ТО, количество входных и выходных технологических потоков, участвующих в данном ТО, и их наименование в соответствии с технологическим регламентом и ДТС.

В качестве примера, в таблице А.5 приложения А приведены характеристики ТО блока АВТ установки АВТ-4.

Для наглядного отображения технологической топологии установки первичной нефтепереработки составляется операторная схема. Для обозначения на схеме ТО применяются графические обозначения, показанные на рисунке 2.5.

Таблица 2.1. Типовые технологические операторы

№ п/п	Наименование технологического оператора	Физическая сущность отображаемых явлений	Элементы технологического оборудования
1	Смешение	Механическое смешение расходов входных потоков	Емкости, тройники трубопроводов, змеевики печи, ректификационная и отпарные колонны
2	Механическое разделение	Механическое разделение расхода одного потока без изменения концентраций веществ в выходных потоках	Тройники трубопроводов
3	Изменение агрегатного состояния	Изменение агрегатного состояния выходного потока	Поверхностные конденсаторы
4	Сжатие (расширение)	Повышение (понижение) давления некоторого потока вещества	Эжекторы, насосы
5	Нагрев - охлаждение	Подвод (отвод) теплоты в результате физико-химических превращений внутри элемента, сжигание топлива, подвод холода	Эжекторы, печи, воздушные холодильники
6	Селективное (диффузионное) разделение	Селективное разделение смеси веществ с изменением концентрации веществ в выходных потоках	Емкости, ректификационная и отпарные колонны
7	Теплообмен	Теплообмен между двумя входными потоками	Теплообменники
8	Межфазный массообмен	Процесс межфазного массообмена между двумя входными потоками	Ректификационная колонна

Учитывая значимость вакуумного блока и блока АВТ для технологии перегонки нефти в дальнейшем анализе будем рассматривать эти блоки в качестве основных. Остальные

блоки установки АВТ и их влияние на технологию в рамках настоящего исследования рассматриваться не будут.

Операторные схемы для блока АВТ и вакуумного блока установки АВТ-4 представлены на рисунках 2.6 и 2.7 соответственно. Технологические операторы на схемах обозначаются по ГОСТ 2.701-84 ЕСКД с помощью соответствующих выносок.

### 2.3.5 Классификация параметров и потоков установки первичной нефтепереработки

Учитывая большое количество материальных и энергетических потоков установки первичной нефтепереработки, для однозначного символического их обозначения вводятся специальные обозначения блоков, а также присваиваются уникальные номера основным технологическим потокам. Пример обозначения блоков и основных технологических потоков установки АВТ-4 представлен в таблицах А.6 и А.7 приложения А.

Перечень параметров потока составляется на основе технологического регламента и включает номер параметра, наименование и единицы измерения. Пример перечня параметров технологического потока для установки АВТ-4 приведен в таблице А.8 приложения А.

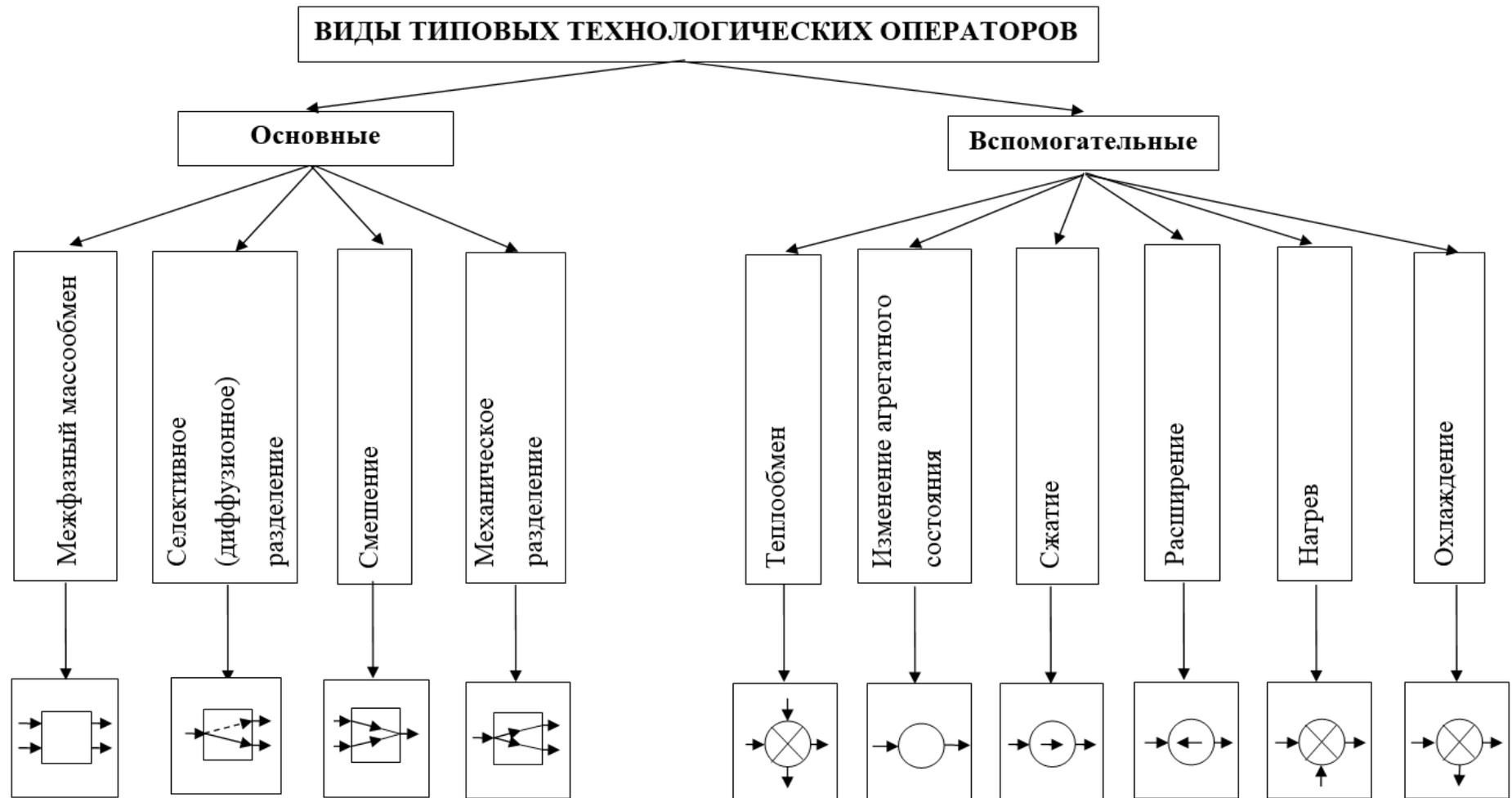
Общий перечень потоков блоков и узлов составляется для учета каждого потока установки первичной нефтепереработки. Каждому потоку присваивается номер, указывается наименование потока в соответствии с регламентирующими документами и специальный шифр.

Пример перечня технологических потоков блока АВТ установки АВТ-4 представлен в таблице А.9 приложения А.

### 2.3.6 Оценка управляющих функций локальных САР

При обследовании подсистемы технологического управления оценивается соответствие управляющей функции каждой локальной САР:

- нормативной документации, действующей на обследуемом объекте;
- показателям технологической и экономической эффективности процессов управления в локальных САР.
- обобщенным технико-экономическим критериям эффективности функционирования установки первичной нефтепереработки;



Условные обозначения технологических операторов

Рисунок 2.5 – Виды типовых технологических операторов

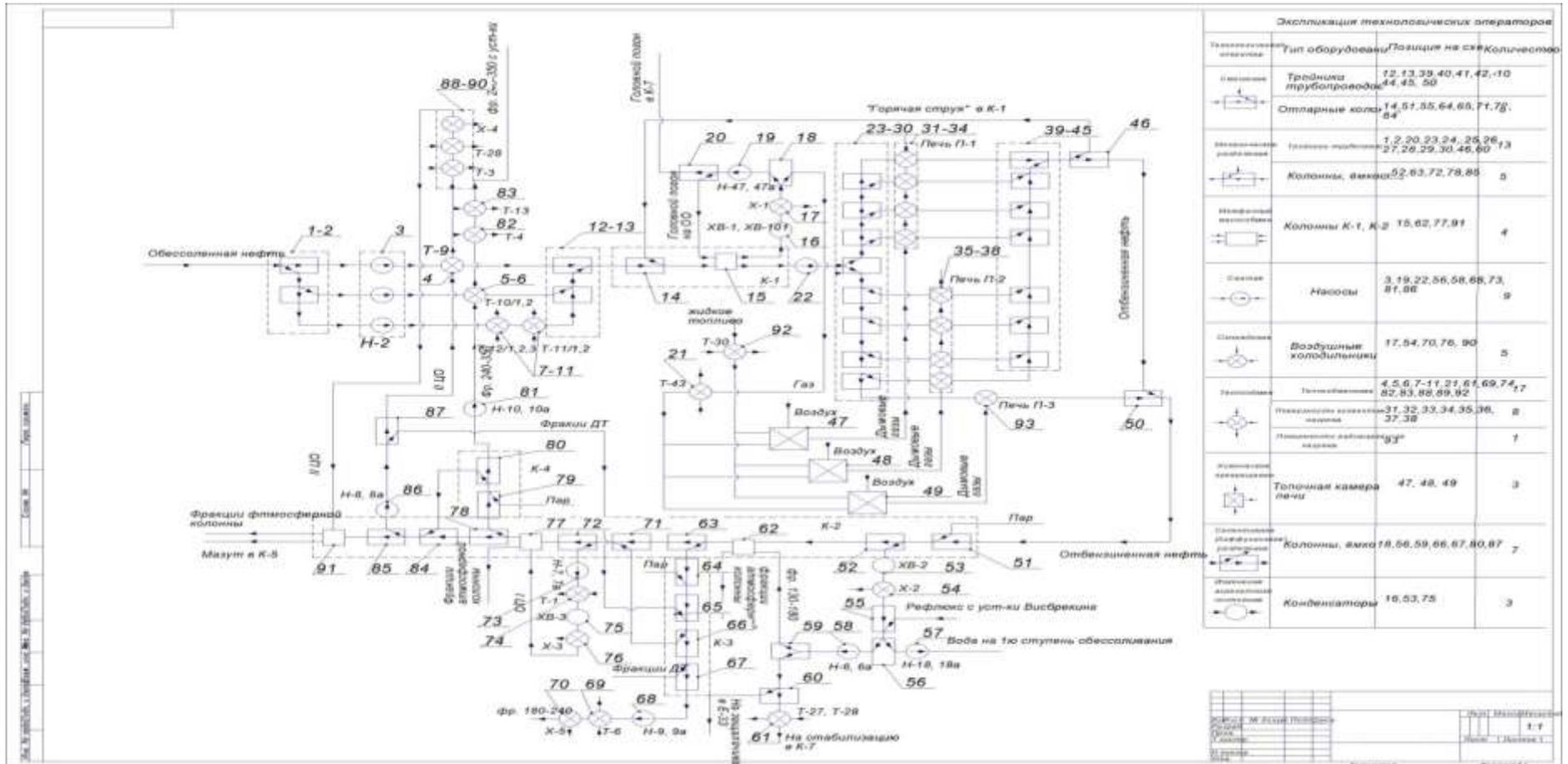


Рисунок 2.6 – Операторная схема блока АВТ

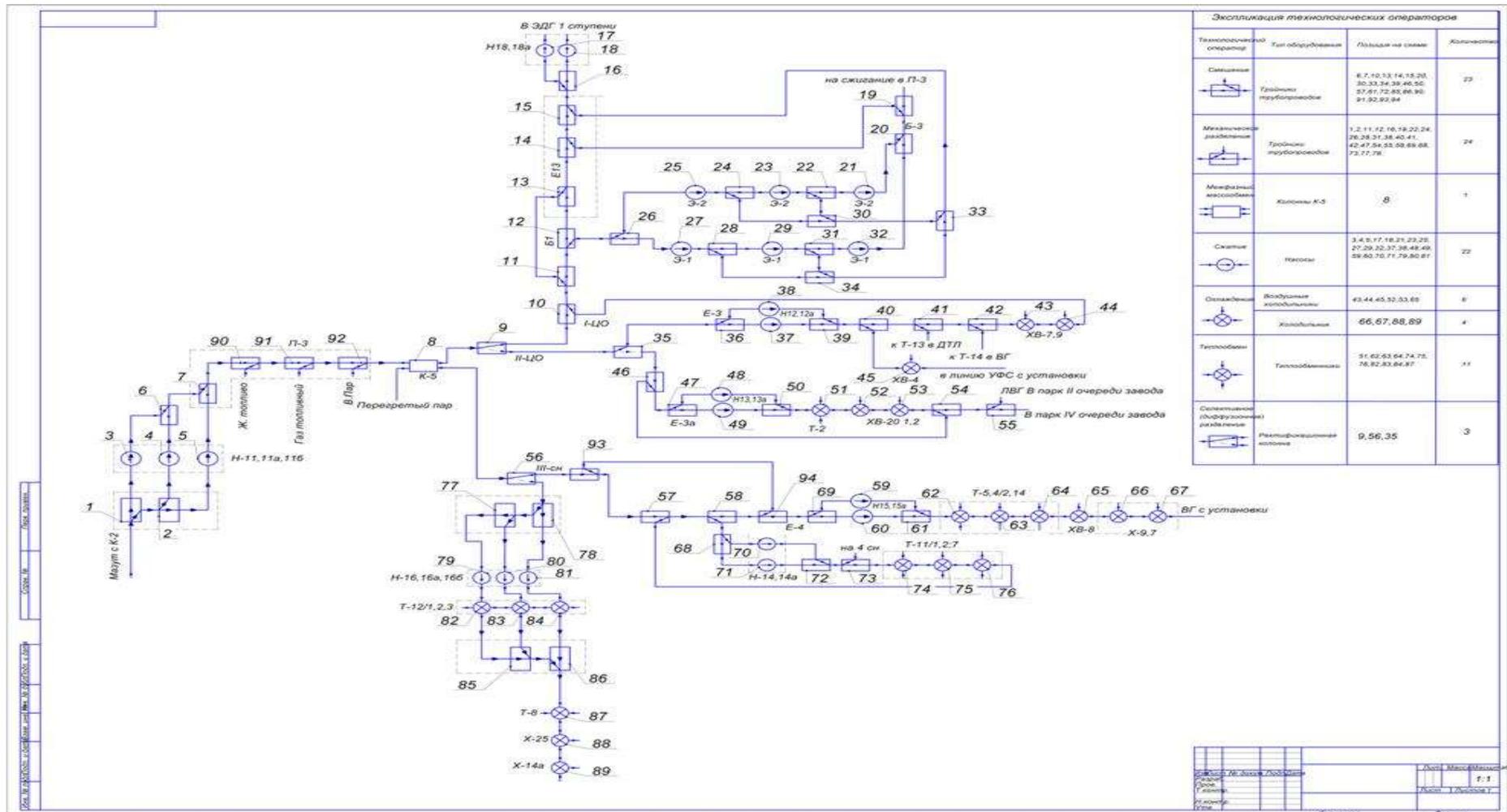


Рисунок 2.7 – Операторная схема вакуумного блока

- другим требованиям стандартов и нормативов предприятия.

Для оценки качества подсистемы технологического управления установки первичной нефтепереработки составляется полный перечень локальных САР, где указываются порядковый номер в составе блока или узла, наименование в соответствии с технологическим регламентом и специальный шифр, в который включаются обозначение блока или узла, идентификационный признак САР по управляемой или регулируемой величине (уровень, расход, давление, температура и т.п.) и порядковый номер.

Пример перечня локальных САР блока АВТ установки АВТ-4 представлен в таблице А.10 приложения А.

### 2.3.7 Составление паспортов локальных САР

Для составления паспорта локальной САР определяется краткая характеристика системы управления, перечень параметров технологических потоков и оборудования, характеристика параметров и возмущений, а также оценка качества процессов управления [2, 51]. Оценку качества процессов управления определяют по нормативным документам, в которых устанавливаются требования к показателям качества работы САР в динамическом (максимальное перерегулирование, время регулирования и степень затухания переходного процесса) и в установившемся (установившееся значение управляемой величины и максимальная динамическая ошибка) режиме работы [51]. Работа локальных САР анализируется на соответствие установленным нормам по государственным или отраслевым стандартам, техническим условиям и стандартам предприятия.

Паспорт локальной САР представляет собой совокупность следующих сведений.

#### *Общая характеристика САР*

В общей характеристике указываются порядковый номер САР в составе блока или узла установки первичной нефтепереработки; шифр и наименование САР, управляющее воздействие основного контура управления, общее количество и краткая характеристика функционального назначения контуров управления; классификация САР по целям управления, по характеристике работы системы в установившемся режиме; по состоянию системы на момент обследования (отключена, в ручном или автоматическом режиме

управления). Для САР с переменной структурой указывается контур управления, который находится в автоматическом режиме.

#### *Перечень параметров технологических потоков*

Параметры локальных САР установки первичной нефтепереработки подразделяются на параметры технологических потоков и параметры оборудования. В перечне указываются шифр и наименование САР, порядковый номер и наименование технологического потока САР; перечисляются специальные шифры параметров указанного технологического потока САР, которые включают обозначение блока или узла, номер основного технологического потока, номера технологических операторов источника и приемника потоков соответствующего блока, а также указывается номер параметра; для каждого параметра приводятся наименование и единицы измерения, принятые на предприятии.

#### *Перечень параметров оборудования*

Параметры оборудования САР включают основные характеристики элементов технологического оборудования и параметры режимов работы оборудования (уровень, диаметр, высота аппарата, объем, площадь сечения и т.д.)

Сведения, указываемые в перечне параметров оборудования САР, аналогичны сведениям, указываемым в перечне параметров технологических потоков за исключением вводимого шифра параметров оборудования, который включает обозначение блока, код САР, номер САР в составе соответствующего блока, обозначение оборудования на укрупненной технологической схеме, порядковый номер соответствующего параметра.

#### *Характеристика параметров САР*

Для анализа параметров локальных САР всех контуров управления указываются порядковый номер, шифр и наименование анализируемого параметра технологического потока или технологического оборудования САР; классификация параметра по принадлежности к входному или выходному потоку, к управляющим воздействиям или управляемым параметрам, для которых дополнительно указывается способов реализации функции управления. Для контролируемых параметров технологических потоков или технологического оборудования указывается способ реализации функции контроля (с помощью приборов по месту, на щите, с применением компьютера (микропроцессора) на

мнемосхемах) и способ регистрации значений параметров (вручную, с помощью самописцев на диаграммах, компьютерная регистрация).

#### *Характеристика возмущений на управляемые параметры САР*

Для анализа возмущений действующих на управляемые параметры локальных САР указываются номер контура управления; шифр и наименование управляемого параметра САР; порядковый номер возмущающих воздействий на управляемый параметр и их наименования; краткая характеристика каждого из указанных возмущений включает диапазон изменения возмущения, тип возмущения (внутреннее или внешнее), характеристика источника возмущения (если источником возмущения является параметр технологического потока или оборудования, то указывается его шифр, если источником возмущения является окружающая среда, то приводится его наименование и краткая характеристика).

#### *Характеристика качества процессов управления САР*

Для анализа качества процессов управления в локальных САР указываются порядковый номер, шифр и наименование управляемого параметра САР; оценка соответствия САР требованиям, предъявляемым к показателям качества динамических режимов работы (заданное и фактическое значения максимального перерегулирования, времени регулирования, степени затухания переходного процесса); оценка соответствия САР требованиям, предъявляемым к показателям качества статических режимов работы (заданное и фактическое значения установившегося значения переходного процесса и статической ошибки); приоритет технологического потока, который характеризует рассматриваемый управляемый параметр; приоритет управляемого параметра в технологическом потоке. Указываемые приоритеты технологического потока и параметра влияют на анализ качества управления всей локальной САР.

Приоритет технологического потока САР можно выставить в соответствии со следующими правилами:

- Приоритет «1» – устанавливается потокам, которые соответствуют готовым продуктам (сырой нефти, обессоленной нефти, фракциям, выводимых с установки, гудрону, мазуту и т.п.);
- Приоритет «2» – устанавливается потокам, которые соответствуют полуфабрикатам - промежуточным продуктам крекинга нефти (циркулирующей

флегме, фракциям, участвующим в подогреве сырьевых потоков и циркуляционном орошении, газовому конденсату, жидкому топливу);

- Приоритет «3» – устанавливается вспомогательным потокам (водяному конденсату, насыщенному пару, теплофикационной воде).

Приоритет управляемого параметра можно выставить в соответствии со следующими правилами:

- Приоритет «1» – устанавливается нормативным параметрам автоматических систем блокировок и противоаварийных защит, а также подсистем экологической и промышленной безопасности;
- Приоритет «2» – устанавливается параметрам, участвующим в коммерческом учете и регламентном технологическом управлении;
- Приоритет «3» – устанавливается вспомогательным параметрам, участвующим в технологическом управлении (коррекции по температуре, измерении с целью идентификации состояния процесса и т.п.);
- Приоритет «4» – устанавливается нормативно-технологическим параметрам, участвующим в диагностике технологического состояния блоков и узлов.

Если все фактические показатели качества соответствуют заданным, то рассматриваемая локальная САР считается полностью отвечающей нормативным и регламентирующим документам предприятия. Если некоторые фактические показатели качества не соответствуют заданным, то определяется степень соответствия рассматриваемой локальной САР нормативным и регламентирующим документам предприятия (допустимая или недопустимая).

Качество подсистемы технологического управления установки первичной нефтепереработки оценивается на соответствие нормативно-технической документации после того, как будут заполнены паспорта АСУ ТП для всех локальных технологических САР.

В таблицах А.11-А.15 приложения А. приведен пример заполнения паспорта локальной САР установки АВТ-4.

### 2.3.8 Анализ соответствия информационно-измерительной подсистемы

Анализ информационно-измерительной подсистемы основан на анализе технологической структуры (см. раздел 2.3.1) установки первичной нефтепереработки.

Качество информационно-измерительной подсистемы оценивается на основе требований к измерению параметров технологических потоков и оборудования установки первичной нефтепереработки, проводится анализ существующих приборов для измерения параметров технологических потоков и оборудования и устанавливается степень соответствия предъявляемым требованиям.

При определении требований к измерению параметров технологических потоков и оборудования установки первичной нефтепереработки используются характеристики входных и выходных технологических потоков, определенных в разделе 2.3.1, порядковый номер потока, его шифр и наименование. Затем указываются приоритет технологического потока и приоритет параметра в потоке, которые могут быть выбраны исходя из рекомендаций, приведенных в разделе 2.3.8; номер контролируемого параметра и его наименование; номера государственных или отраслевых стандартов, стандартов предприятия; нормированное значение параметра по соответствующему стандарту.

Сведения о среднем времени работы проборов до отказа  $T$ , представленные в проектно-технической документации, позволяют определить допустимую интенсивность отказов прибора по формуле (2.1) [25]:

$$\lambda = \frac{1}{T}. \quad (2.1)$$

Для оценки существующих приборов, осуществляющих измерения параметров технологических потоков и оборудования, установки первичной нефтепереработки указываются порядковый номер технологического потока или обозначение оборудования по технологической схеме, соответствующие шифры технологического потока и номера параметров, характеристики существующих приборов для измерения. Оценка соответствия предъявляемым требованиям для способов реализации функций контроля и регистрации измерений параметров технологических потоков или оборудования определяется на основе сопоставления информации. Текущая интенсивность отказов прибора  $\hat{\lambda}$  зависит от значения среднего арифметического  $\hat{T}$  реальных периодов  $T_i$

времени работы от предыдущего отказа до последующего с момента установки прибора и определяется по формуле (2.2) [25]:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{T}}. \quad (2.2)$$

Величина  $\hat{T}$  в (2.2) вычисляется по формуле (2.3) [25]:

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n}. \quad (2.3)$$

Здесь  $n$  – количество интервалов между отказами.

На основании сопоставления информации, в случае соответствия существующих и требуемых характеристик прибора для измерения параметра технологического потока или оборудования, принимается решение о полном соответствии измерительной системы параметра. Если хотя бы одна характеристика не соответствует предъявляемым требованиям, то определяется допустимая или недопустимая степень соответствия.

В таблицах А.16-А.19 приложения А представлены примеры оценки информационно-измерительной подсистемы установки АВТ-4.

### 2.3.9 Анализ соответствия подсистем блокировок и защит

При анализе подсистем блокировок и защит установки первичной нефтепереработки указываются следующие данные: порядковый номер; обозначение оборудования в соответствии с перечнем отсекающих и запорных устройств установки; результаты последней проверки оборудования. Затем, учитывая требования к подсистемам защиты и блокировки на основе нормативно-технической документации, определяется оценка соответствия результатов проверки предъявляемым требованиям [88].

В таблице А.20 приложения А представлен пример оценки подсистем АСБ и ПАЗ на соответствие предъявляемым требованиям работоспособности.

### 2.3.10 Оценка энергоэффективности процесса

Для оценки энергоэффективности процесса первичной нефтепереработки проводится сравнение фактических затрат энергетических ресурсов с расчетом теоретических затрат тепла для однократного испарения продуктовых фракций. Для

проведения расчета необходимо использовать данные о переработке нефти и нефтепродуктов на установке первичной нефтепереработки за отчетный год, а именно количество планируемых и фактически принятых нефтяных продуктов в тоннах, количество планируемых и фактически полученных из переработки нефтяных продуктов, с учетом плановых и фактических потерь. Классификация нефтяных продуктов, полученных путем переработки, и потерь осуществляется по следующим группам: светлые фракции, масляные дистилляты, гудрон, побочные продукты и потери [48, 76].

В таблицах А.21 и А.22 приложения А приведены примеры характеристик принятых и полученных нефтяных продуктов на установке АВТ-4, в соответствии с типовой формой предприятия ТП-36.

На первом шаге для каждой полученной из переработки продуктовой фракции вычисляется средняя температура выкипания  $T_{cp_i}$  по формуле (2.4) [76]:

$$T_{cp_i} = \frac{T_{\kappa_i} + T_{н_i}}{2}, \quad (2.4)$$

где  $T_{н_i}$  и  $T_{\kappa_i}$  - температуры начала и конца выкипания продуктовой фракции соответственно, определяемые по технологическому регламенту.

Средняя плотность фракции  $D_i$  определяется на втором шаге. Для каждого вида сырья средняя плотность фракции  $D_i$  определяется своей зависимостью. По формуле (2.5) вычисляется  $D_i$  для сернистой нефти [76]:

$$D_i = D_i^c = 0,722 \cdot \left( \frac{T_{cp_i}}{100} \right)^{0,159}. \quad (2.5)$$

По формуле (2.6) вычисляется  $D_i$  для малосернистой нефти [47]:

$$D_i = D_i^{mc} = 0,736 \cdot \left( \frac{T_{cp_i}}{100} \right)^{0,130}. \quad (2.6)$$

Третий шаг характеризуется определением энтальпии фракции в жидкой фазе  $H_{ж_i}$ .

Правила вычисления  $H_{ж_i}$  следующие:

1.  $H_{жi}$  определяется по справочной таблице [90], пока текущее значение средней плотности фракции равно табличному  $D_i = D_j^T$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество значений средней плотности фракции в той же справочной таблице. При этом рабочая температура на входе установки  $T_{рабi}$  определяется по технологическому регламенту.

2.  $H_{жi}$  определяется по формуле (2.7) [47]:

$$H_{жi} = H_{D_j^T}^T + \left( H_{D_{j+1}^T}^T - H_{D_j^T}^T \right) \frac{D_i - D_{j-1}^T}{D_j^T - D_{j-1}^T}, \quad (2.7)$$

где  $H_{D_j^T}^T$ ,  $H_{D_{j+1}^T}^T$  – табличные значения энтальпий при средней плотности фракции  $D_j^T$  и  $D_{j+1}^T$ , если значение средней плотности фракции лежит в диапазоне  $D_j^T < D_i < D_{j+1}^T$ , где  $D_j^T$ ,  $D_{j+1}^T$  – определяются по таблице при известной рабочей температуре на входе установки  $T_{рабi}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество значений средней плотности фракции в справочных таблицах [90].

На четвертом шаге, по аналогии с вычислением энтальпии фракции в жидкой фазе  $H_{жi}$  на третьем шаге, вычисляется значение энтальпии фракции в паровой фазе  $H_{ni}$ :

1.  $H_{ni}$  определяется по справочной таблице [90], пока текущее значение средней плотности фракции равно табличному  $D_i = D_j^T$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество значений средней плотности фракции в той же справочной таблице. При этом рабочая температура на входе установки  $T_{напi}$  определяется по технологическому регламенту.

2.  $H_{ni}$  определяется по формуле (2.8) [46]:

$$H_{ni} = H_{D_j^T}^T + \left( H_{D_{j+1}^T}^T - H_{D_j^T}^T \right) \frac{D_i - D_{j-1}^T}{D_j^T - D_{j-1}^T}, \quad (2.8)$$

где  $H_{D_j^T}^T$  и  $H_{D_{j+1}^T}^T$  – табличные значение энтальпии при средней плотности фракции  $D_j^T$  и температуре, необходимой для перевода фракции в паровую фазу  $T_{напi}$ , если значение средней плотности фракции лежит в диапазоне  $D_j^T < D_i < D_{j+1}^T$ , где  $D_j^T$ ,

$D_{j+1}^T$  определяются по таблице при известной рабочей температуре, необходимой для перевода фракции в паровую фазу  $T_{нарj}$   $j = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество значений средней плотности фракции в справочной таблице [90].

На пятом шаге вычисляется разность между энтальпиями фракций в паровой  $H_{n_i}$  и жидкой фазе  $H_{жi}$  по формуле (2.9) [76]:

$$\Delta H_i = H_{n_i} - H_{жi}. \quad (2.9)$$

На шестом шаге рассчитывается плановое количество теплоты  $\Theta_{n_i}$ , которое затрачивается на перевод из жидкой фазы в паровую 1 тонны соответствующей  $i$ -ой продуктовой фракции, по формуле (2.10) [76]:

$$\Theta_{n_i} = \frac{\Delta H_i}{Q_{n_i}^{\%}} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

где  $Q_{n_i}^{\%}$  – планируемый процент полученных продуктовых фракций от общего планируемого количества принятого в переработку сырья.

Далее рассчитывается фактическое количество теплоты  $\Theta_{\phi_i}$ , которое затрачивается на перевод из жидкой фазы в паровую 1 тонны соответствующей  $i$ -ой продуктовой фракции, по формуле (2.11) [76]:

$$\Theta_{\phi_i} = \frac{\Delta H_i}{Q_{\phi_i}^{\%}} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

где  $Q_{\phi_i}^{\%}$  – доля в процентах фактически полученных из переработки продуктовых фракций от общего фактического количества принятого в переработку сырья.

Общее количество теплоты, затраченное на испарение 1 тонны продуктовых фракций и потерь определяется для каждой группы продуктов по формулам (2.12, 2.13) [76]:

$$U1_n = \sum_{i=1}^m \Theta_{n_i}, \quad U2_n = \sum_{i=m+1}^k \Theta_{n_i}, \quad U3_n = \sum_{i=k+2}^l \Theta_{n_i}, \quad (2.12)$$

$$U1_{\phi} = \sum_{i=1}^m \Theta_{\phi_i}, \quad U2_{\phi} = \sum_{i=m+1}^k \Theta_{\phi_i}, \quad U3_{\phi} = \sum_{i=k+2}^l \Theta_{\phi_i}, \quad (2.13)$$

где  $U1_n, U1_{\phi}$  - общая масса светлых продуктов, т;  $U2_n, U2_{\phi}$  - общая масса масляных дистиллятов, т;  $U3_n, U3_{\phi}$  - общая масса побочных продуктов и потерь переработки, т;  $i = 1, 2, \dots, m, m+1, \dots, k, k+1, \dots, l$ ,  $l$  - количество фракций, полученным путем переработки.

В конце вычисляется общее плановое и фактическое количество теплоты, затраченное на испарение 1 тонны продуктовых фракций для всей установки по формулам (2.14, 2.15):

$$U_n = \sum_i \Theta_{n_i}, \quad (2.14)$$

$$U_{\phi} = \sum_i \Theta_{\phi_i}. \quad (2.15)$$

На седьмом, последнем шаге определяется степень энергоэффективности АСУ ТП установки первичной нефтепереработки по формуле (2.16):

$$\mathcal{E} = \frac{U_n}{U_{\phi}}. \quad (2.16)$$

Работа установки первичной нефтепереработки считается неэнергоэффективной, если  $\mathcal{E} < 0,95$ . В этом случае необходимо улучшить качество работы. Работа установки первичной нефтепереработки считается энергоэффективной, если  $0,95 \leq \mathcal{E} \leq 1$ .

В таблице А.23 (приложение А) приведен пример определения количества потребляемого установкой тепла в расчете на тонну сырья для установки АВТ-4. В приведенном расчете установлено, что  $\mathcal{E} = 0,985$  и, следовательно, АСУ ТП установки АВТ-4 работает энергоэффективно.

### 2.3.11 Анализ уровня комплексной автоматизации блоков и узлов

#### 2.3.11.1 Оценка уровня автоматизации контроля параметров

Проектный уровень автоматизации контроля параметров технологических потоков блоков и узлов  $K_{1П}$  рассчитывается по формуле (2.17) [84]:

$$K_{1П} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot n_{1j}}{n_{10}}, \quad (2.17)$$

где  $n_{1j}$  - число контролируемых по способу  $j$  параметров технологических потоков;

$n_{10}$  - общее число контролируемых параметров;

$K_{1j}$  - коэффициент зависит от способа реализации функции контроля и определяется по таблице 2.2.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 проектный уровень автоматизации контроля параметров технологических потоков может быть рассчитан по формуле (2.17) следующим образом (числовые данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4) [84]:

$$K_{1П}^{АВТ} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot n_{1j}^{АВТ}}{n_{10}^{АВТ}} = \frac{0,8 \cdot 65}{112} + \frac{0,6 \cdot 45}{112} + \frac{0,1 \cdot 2}{112} = 0,7068.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{1П}^{ВВ} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot n_{1j}^{ВВ}}{n_{10}^{ВВ}} = \frac{0,8 \cdot 44}{86} + \frac{0,6 \cdot 35}{86} + \frac{0,1 \cdot 7}{86} = 0,6611.$$

Таблица 2.2. Приведенные коэффициенты способа реализации функции контроля параметров потоков

№ п/п	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ	$K_{1j}$
1	Приборы по месту	0,1
2	Щитовая система контроля	0,6-0,7
3	Контроль с применением компьютеров и микропроцессорной техники	0,8-1,0

Для расчета достигнутого уровня автоматизации  $K_{1Д}$  используется формула (2.18) [84]:

$$K_{1Д} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{1j}} p_i}{n_{10}}, \quad (2.18)$$

где  $P_i$  - показатель соответствия характеристик приборов предъявляемым требованиям по контролю параметров технологических потоков информационно-измерительной подсистемы.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 достигнутый уровень автоматизации контроля параметров технологических потоков может быть рассчитан по формуле (2.18) следующим образом (числовые данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{1Д}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{1j}^{ABT}} P_i^{ABT}}{n_{10}^{ABT}} = \frac{0,8 \cdot 63}{112} + \frac{0,6 \cdot 42}{112} + \frac{0,1 \cdot 2}{112} = 0,6768.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{1Д}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{1j}^{BB}} P_i^{BB}}{n_{10}^{BB}} = \frac{0,8 \cdot 42}{86} + \frac{0,6 \cdot 32}{86} + \frac{0,1 \cdot 5}{86} = 0,6198.$$

Для выявления соответствия достигнутого уровня автоматизации контроля параметров технологических потоков блоков и узлов нормативным и регламентирующим требованиям рассчитывается коэффициент  $K_{1c}$  по формуле (2.19) [84]:

$$K_{1c} = \frac{K_{1Д}}{K_{1П}}. \quad (2.19)$$

Чем ближе значение показателя  $K_{1c}$  к 1, тем выше степень соответствия достигнутого уровня автоматизации контроля параметров технологических потоков блоков и узлов предъявляемым требованиям.

Для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{1c}^{ABT} = \frac{K_{1Д}^{ABT}}{K_{1П}^{ABT}} = \frac{0,6768}{0,7068} = 0,958.$$

Для вакуумного блока:

$$K_{1c}^{BB} = \frac{K_{1Д}^{BB}}{K_{1П}^{BB}} = \frac{0,6198}{0,6611} = 0,938.$$

Полученные значения показателя  $K_{1c}$  означают, что система автоматизации контроля параметров технологических потоков блока АВТ лучше, чем у вакуумного блока. Изменить сложившуюся ситуацию возможно, если привести систему контроля параметров технологических потоков вакуумного блока к нормативным и регламентирующим требованиям.

### 2.3.11.2 Оценка уровня автоматизации регистрации параметров потоков

Проектный уровень автоматизации регистрации параметров потоков блоков и узлов  $K_{2П}$  рассчитывается по формуле (2.20) [84]:

$$K_{2П} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot n_{2j}}{n_{20}}, \quad (2.20)$$

где  $n_{2j}$  - число регистрируемых по способу  $j$  параметров технологических потоков;

$n_{20}$  - общее число регистрируемых параметров;

$K_{2j}$  - коэффициент зависит от способа реализации функции регистрации и определяется по таблице 2.3.

Таблица 2.3. Приведенный коэффициент способа реализации функции регистрации параметров потоков

№ п/п	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ	$K_{2j}$
1	Вручную	0,1
2	На диаграммах	0,7
3	Печать параметров, режимных листов, сводок с применением компьютера	0,8-1,0

На примере для блока АВТ установки АВТ-4 показатель проектного уровня автоматизации регистрации параметров технологических потоков может быть рассчитан по формуле (2.20) следующим образом (численные данные в примере получены на основании анализа установки АВТ-4):

$$K_{2\Pi}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot n_{2j}^{ABT}}{n_{20}^{ABT}} = \frac{0,8 \cdot 107}{112} + \frac{0,6 \cdot 5}{112} + \frac{0,1 \cdot 0}{112} = 0,7908.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{2\Pi}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot n_{2j}^{BB}}{n_{20}^{BB}} = \frac{0,8 \cdot 85}{86} + \frac{0,6 \cdot 1}{86} + \frac{0,1 \cdot 0}{86} = 0,7969.$$

Для расчета достигнутого уровня автоматизации  $K_{2Д}$  используется формула (2.21) [84]:

$$K_{2Д} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{2j}} p_i}{n_{20}}, \quad (2.21)$$

где  $p_i$  - показатель соответствия характеристик приборов предъявляемым требованиям по регистрации параметров технологических потоков информационно-измерительной подсистемы.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель достигнутого уровня автоматизации регистрации параметров технологических потоков может быть рассчитан по формуле (2.22) следующим образом (числовые данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{2Д}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{2j}^{ABT}} p_i^{ABT}}{n_{20}^{ABT}} = \frac{0,8 \cdot 105}{112} + \frac{0,6 \cdot 5}{112} + \frac{0,1 \cdot 0}{112} = 0,7768.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{2Д}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{2j}^{BB}} p_i^{BB}}{n_{20}^{BB}} = \frac{0,8 \cdot 83}{86} + \frac{0,6 \cdot 1}{86} + \frac{0,1 \cdot 0}{86} = 0,7789.$$

Для выявления соответствия достигнутого уровня автоматизации регистрации параметров технологических потоков блоков и узлов нормативным и регламентирующим требованиям рассчитывается коэффициент  $K_{2c}$  по формуле (2.22) [84]:

$$K_{2c} = \frac{K_{2Д}}{K_{2\Pi}}. \quad (2.22)$$

Чем ближе значение показателя  $K_{2c}$  к 1, тем выше степень соответствия предъявляемым требованиям.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{2c}^{ABT} = \frac{K_{2Д}^{ABT}}{K_{2П}^{ABT}} = \frac{0,7768}{0,7908} = 0,982.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{2c}^{BB} = \frac{K_{2Д}^{BB}}{K_{2П}^{BB}} = \frac{0,7789}{0,7969} = 0,977.$$

Полученные значения показателя  $K_{2c}$  означают, что система автоматизации регистрации параметров технологических потоков блока АВТ лучше, чем у вакуумного блока. Изменить сложившуюся ситуацию возможно, если привести систему регистрации параметров технологических потоков вакуумного блока, в соответствие с нормативными и регламентирующими требованиями.

### 2.3.11.3 Оценка уровня автоматизации контроля параметров оборудования

Проектный уровень автоматизации контроля параметров оборудования блоков и узлов  $K_{3П}$  рассчитывается по формуле (2.23) [84]:

$$K_{3П} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot n_{3j}}{n_{30}}, \quad (2.23)$$

где  $n_{3j}$  - число контролируемых по способу  $j$  параметров оборудования;

$n_{30}$  - общее число контролируемых параметров;

$K_{3j}$  - коэффициент зависит от способа реализации функции контроля и определяется по таблице 2.4.

Таблица 2.4. Приведенные коэффициенты способа реализации функции контроля параметров оборудования

№ п/п	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ	$K_{3j}$
1	Контроль параметров оборудования по месту	0,6
2	Контроль параметров оборудования по мнемосхеме на щите операторной	0,8
3	Контроль параметров оборудования по мнемосхеме дисплея и печати	0,9-1,0

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель проектного уровня автоматизации контроля параметров оборудования может быть рассчитан по формуле (2.23) следующим образом (численные данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{3П}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot n_{3j}^{ABT}}{n_{30}^{ABT}} = \frac{1 \cdot 25}{35} + \frac{0,8 \cdot 5}{35} + \frac{0,6 \cdot 5}{35} = 0,914.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{3П}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot n_{3j}^{BB}}{n_{30}^{BB}} = \frac{1 \cdot 20}{24} + \frac{0,8 \cdot 2}{24} + \frac{0,6 \cdot 2}{24} = 0,9497.$$

Для расчета достигнутого уровня автоматизации  $K_{3Д}$  используется формула (2.24) [84]:

$$K_{3Д} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{3j}} p_i}{n_{30}}, \quad (2.24)$$

где  $p_i$  - показатель соответствия характеристик приборов предъявляемым требованиям по контролю параметров оборудования информационно-измерительной подсистемы.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель достигнутого уровня автоматизации контроля параметров оборудования может быть рассчитан по формуле (2.24) следующим образом (численные данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

Для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{3Д}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{3j}^{ABT}} p_i^{ABT}}{n_{30}^{ABT}} = \frac{1 \cdot 20}{35} + \frac{0,8 \cdot 4}{35} + \frac{0,6 \cdot 3}{35} = 0,7138.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{3Д}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{3j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{3j}^{BB}} p_i^{BB}}{n_{30}^{BB}} = \frac{1 \cdot 19}{24} + \frac{0,8 \cdot 2}{24} + \frac{0,6 \cdot 2}{24} = 0,9087.$$

Для выявления соответствия достигнутого уровня автоматизации контроля параметров оборудования блоков и узлов нормативным и регламентирующим требованиям рассчитывается коэффициент  $K_{3c}$  по формуле (2.25) [84]:

$$K_{3c} = \frac{K_{3Д}}{K_{3П}}. \quad (2.25)$$

Чем ближе значение показателя  $K_{3c}$  к 1, тем выше степень соответствия предъявляемым требованиям.

Для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{3c}^{ABT} = \frac{K_{3Д}^{ABT}}{K_{3П}^{ABT}} = \frac{0,7138}{0,914} = 0,78.$$

Для вакуумного блока:

$$K_{3c}^{BB} = \frac{K_{3Д}^{BB}}{K_{3П}^{BB}} = \frac{0,9087}{0,9497} = 0,957.$$

Полученные значения показателя  $K_{3c}$  означают, что система автоматизации контроля параметров оборудования блока АВТ хуже, чем у вакуумного блока. Изменить сложившуюся ситуацию возможно, если привести систему контроля параметров оборудования блока АВТ, в соответствие с нормативными и регламентирующими требованиями.

#### 2.3.11.4 Оценка уровня автоматизации регистрации параметров оборудования

Проектный уровень автоматизации регистрации параметров оборудования блоков и узлов  $K_{4П}$  рассчитывается по формуле (2.26) [84]:

$$K_{4\Pi} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot n_{4j}}{n_{40}}, \quad (2.26)$$

где  $n_{4j}$  - число регистрируемых по способу  $j$  параметров оборудования;

$n_{40}$  - общее число регистрируемых параметров;

$K_{4j}$  - коэффициент зависит от способа реализации функции регистрации и определяется по таблице 2.5.

Таблица 2.5. Приведенные коэффициенты способа реализации функции регистрации параметров оборудования

№ п/п	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ	$K_{4j}$
1	Вручную	0,1
2	На диаграммах	0,7
3	Печать параметров, режимных листов, сводок с применением компьютера	0,8-1,0

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель проектного уровня автоматизации регистрации параметров оборудования может быть рассчитан по формуле (2.26) следующим образом (численные данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{4\Pi}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot n_{4j}^{ABT}}{n_{40}^{ABT}} = \frac{0,8 \cdot 21}{30} + \frac{0,6 \cdot 9}{30} + \frac{0,1 \cdot 0}{30} = 0,74,$$

для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{4\Pi}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot n_{4j}^{BB}}{n_{40}^{BB}} = \frac{0,8 \cdot 17}{18} + \frac{0,6 \cdot 1}{18} + \frac{0,1 \cdot 0}{18} = 0,789.$$

Для расчета *достигнутого* уровня автоматизации  $K_{4Д}$  используется формула (2.27)

[84]:

$$K_{4Д} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{4j}} p_i}{n_{40}}, \quad (2.27)$$

где  $p_i$  - показатель соответствия характеристик приборов предъявляемым требованиям по регистрации параметров оборудования информационно-измерительной подсистемы.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель достигнутого уровня автоматизации регистрации параметров оборудования может быть рассчитан по формуле (2.79) следующим образом (численные данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{4Д}^{ABT} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{4j}^{ABT}} p_i^{ABT}}{n_{40}^{ABT}} = \frac{0,8 \cdot 18}{30} + \frac{0,6 \cdot 8}{30} + \frac{0,1 \cdot 0}{30} = 0,64.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{4Д}^{BB} = \sum_{j=1}^3 \frac{K_{4j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{4j}^{BB}} p_i^{BB}}{n_{40}^{BB}} = \frac{0,8 \cdot 16}{18} + \frac{0,6 \cdot 1}{18} + \frac{0,1 \cdot 0}{18} = 0,744.$$

Для выявления соответствия достигнутого уровня автоматизации регистрации параметров оборудования блоков и узлов нормативным и регламентирующим требованиям рассчитывается коэффициент  $K_{4c}$  по формуле (2.28) [84]:

$$K_{4c} = \frac{K_{4Д}}{K_{4П}} \quad (2.28)$$

Чем ближе значение показателя  $K_{4c}$  к 1, тем выше степень соответствия предъявляемым требованиям.

Для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{4c}^{ABT} = \frac{K_{4Д}^{ABT}}{K_{4П}^{ABT}} = \frac{0,64}{0,74} = 0,865.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{4c}^{BB} = \frac{K_{4Д}^{BB}}{K_{4П}^{BB}} = \frac{0,744}{0,789} = 0,943.$$

Полученные значения показателя  $K_{4c}$  означают, что система автоматизации регистрации параметров оборудования блока АВТ хуже, чем у вакуумного блока. Изменить сложившуюся ситуацию возможно, если привести систему регистрации параметров оборудования блока АВТ в соответствие с нормативными и регламентирующими требованиями.

#### 2.3.11.5 Оценка уровня автоматизации функции управления

Проектный уровень автоматизации функции управления технологическими процессами  $K_{5П}$  производится по формуле (2.29) [84]:

$$K_{5П} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j} \cdot n_{5j}}{n_{50}}, \quad (2.29)$$

где  $n_{5j}$  - число управляемых по способу  $j$  параметров;

$n_{50}$  - общее число управляемых параметров;

$K_{5j}$  - коэффициент зависит от способа реализации функции управления и определяется по таблице 2.6.

Таблица 2.6. Приведенные коэффициенты способа реализации функции управления

№ п/п	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ	$K_{5j}$
1	Ручное управление	0,2
2	Автоматическое регулирование	0,6
3	Информационно-советующий режим	0,7
4	Супервизорное управление	0,8
5	Непосредственное цифровое программное управление	0,9 0,95
6	Автоматическое оптимальное управление	1,0
7	Автоматическое адаптивное управление	1,0

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель проектного уровня автоматизации функции управления технологическими процессами может быть рассчитан по формуле (2.29) следующим образом (числовые данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{5П}^{ABT} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j}^{ABT} \cdot n_{5j}^{ABT}}{n_{50}^{ABT}} = \frac{0,6 \cdot 10}{10} = 0,6.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{5П}^{BB} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j}^{BB} \cdot n_{5j}^{BB}}{n_{50}^{BB}} = \frac{0,6 \cdot 12}{12} = 0,6.$$

Для расчета достигнутого показателя уровня автоматизации  $K_{5Д}$  используется формула (2.30) [84]:

$$K_{5Д} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j} \cdot \sum_{i=1}^{n_{5j}} p_i}{n_{50}}, \quad (2.30)$$

где  $p_i$  - показатель соответствия АСУ ТП предъявляемым требованиям по качеству управления параметром подсистемы технологического управления.

Например, для блока АВТ установки АВТ-4 показатель достигнутого уровня автоматизации функции управления технологическими процессами может быть рассчитан по формуле (2.30) следующим образом (численные данные в примере получены на основании обследования установки АВТ-4):

$$K_{5Д}^{АВТ} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j}^{АВТ} \cdot n_{5j}^{АВТ}}{n_{50}^{АВТ}} = \frac{0,6 \cdot 10}{10} = 0,6.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{5Д}^{ВВ} = \sum_{j=1}^7 \frac{K_{5j}^{ВВ} \cdot n_{5j}^{ВВ}}{n_{50}^{ВВ}} = \frac{0,6 \cdot 12}{12} = 0,6.$$

Расчет показателя соответствия нормативным и регламентирующим требованиям  $K_{5c}$  производится по формуле (2.31) [84]:

$$K_{5c} = \frac{K_{5Д}}{K_{5П}}. \quad (2.31)$$

Чем ближе значение показателя  $K_{5c}$  к 1, тем выше степень соответствия предъявляемым требованиям.

Для блока АВТ установки АВТ-4:

$$K_{5c}^{АВТ} = \frac{K_{5Д}^{АВТ}}{K_{5П}^{АВТ}} = \frac{0,6}{0,6} = 1.$$

Для вакуумного блока установки АВТ-4:

$$K_{5c}^{ВВ} = \frac{K_{5Д}^{ВВ}}{K_{5П}^{ВВ}} = \frac{0,6}{0,6} = 1.$$

Равенство показателей  $K_{5c}^{АВТ}$  и  $K_{5c}^{ВВ}$  единице в примере означает, что на установке АВТ-4 уровень автоматизации функции управления технологическими процессами полностью отвечает нормативным и регламентирующим требованиям предприятия.

### 2.3.12 Оценка надежности системы управления

Надежность системы управления процессом первичной нефтепереработки определяется по показателю интенсивности отказов всех компонентов систем, включая

датчики, измерительные каналы, средства отображения информации, регуляторы, каналы связи и исполнительные органы.

Показатель интенсивности отказов  $\lambda_{ACV}$  связан с математическим ожиданием времени работы до первого отказа  $T_{ACV}$  [17, 37]:

$$\lambda_{ACV} = \frac{1}{T_{ACV}}, [1/\text{час}]. \quad (2.32)$$

Каждый элемент системы разделяется на блоки, для каждого из которых нормативно установлены интенсивность отказов  $\lambda_{ACV}$  или среднее значение времени работы до первого отказа:

$$T_{ACV} = \frac{1}{\lambda_{ACV}}, [\text{час}]. \quad (2.33)$$

Если нормативные характеристики надежности не установлены для наиболее крупных конструктивных элементы в нормативно-технической документации, то производится дальнейшее разделение на более мелкие, до тех пор, пока каждый из элементарных блоков не будет иметь свою нормированную характеристику надежности.

Для определения интенсивности отказов, в случае отсутствия резервирования, предусматривается последовательное соединение элементарных блоков так, как показано на рисунке 2.8. Тогда интенсивность отказов установки будет состоять из суммы интенсивности отказов всех элементарных блоков  $\lambda_i$  по формуле [25, 55]:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, [1/\text{час}]. \quad (2.34)$$

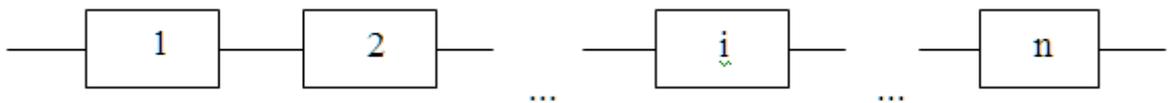


Рисунок 2.8 – Основное соединение без резервирования

При резервировании блока постоянно включенными  $J$  блоками с интенсивностью отказов  $\lambda_i$ , резервированная группа заменяется эквивалентным блоком с интенсивностью отказов (см. рисунок 2.9) [87]:

$$\lambda_i = \lambda_{\text{э1}} = \frac{1}{T_{\text{э1}}}, \quad (2.35)$$

$$T_{\text{э1}} = \frac{1}{\lambda_j} \sum_{j=1}^J \frac{1}{J-j+1}. \quad (2.36)$$

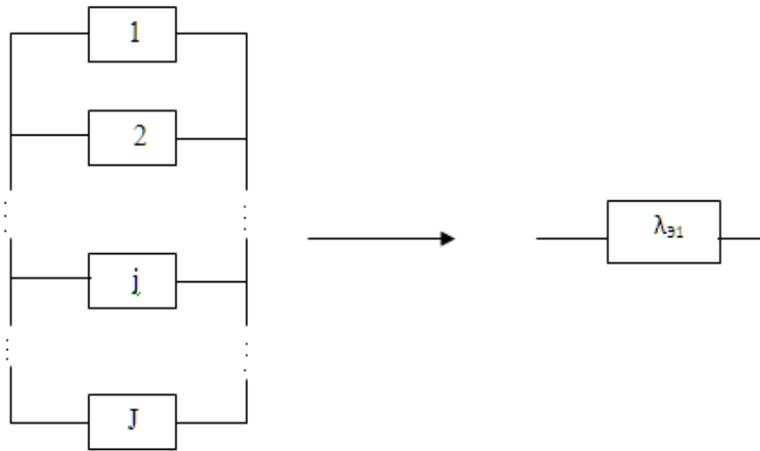


Рисунок 2.9 – Простое резервирование

На рисунке 2.10 представлен способ резервирования с дробной кратностью, при  $m$  однотипных основных элементов резервируемых  $n$  резервными с одной и той же надежностью  $\lambda_k$ . [87]:

$$\lambda_{\text{э2}} = \frac{1}{T_{\text{э2}}}, \quad (2.37)$$

$$T_{\text{э2}} = \frac{1}{\lambda_k} \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \frac{1}{m+n} \right). \quad (2.38)$$

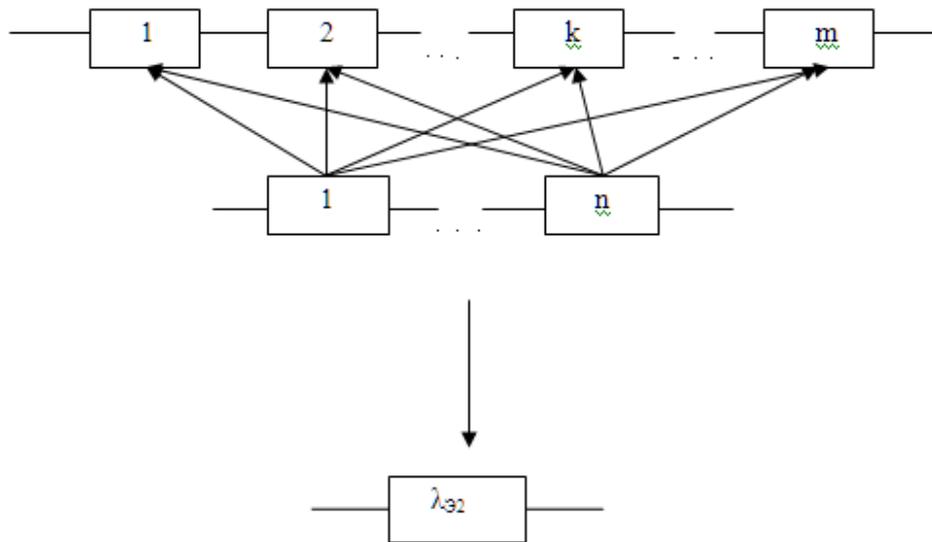


Рисунок 2.10 – Резервирование с дробной кратностью

Рассмотрим в качестве примера расчет надежности установки АВТ-4. В соответствии со структурной схемой установки АВТ-4 (рисунок 2.4), расчетную логическую схему надежности можно отнести к простой схеме без резервирования (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Расчетная логическая схема надежности АСУ установки АВТ-4:

ЭЛОУ – электрообессоливающая установка; АВТ – блок атмосферно-вакуумной перегонки, ВБ – вакуумный блок, БСТБ – блок стабилизации бензина, БЗ – блок защелачивания, БУТ – блок утилизации тепла.

В ходе обследования установлено, что интенсивность отказов каждого из блоков:

$$\lambda_{\text{ЭЛОУ}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час ,}$$

$$\lambda_{\text{АВТ}} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час ,}$$

$$\lambda_{\text{БСТБ}} = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час ,}$$

$$\lambda_{\text{БЗ}} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час ,}$$

$$\lambda_{\text{БУТ}} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

Для АСУ вакуумного блока интенсивность отказов  $\lambda_{\text{ВБ}}$  (время наработки на отказ  $T_{\text{ВБ}}$ ) не установлена.

В состав АСУ вакуумного блока входят, согласно данным обследования, следующие локальные САР, соединенные по основной схеме (рисунок 2.12):

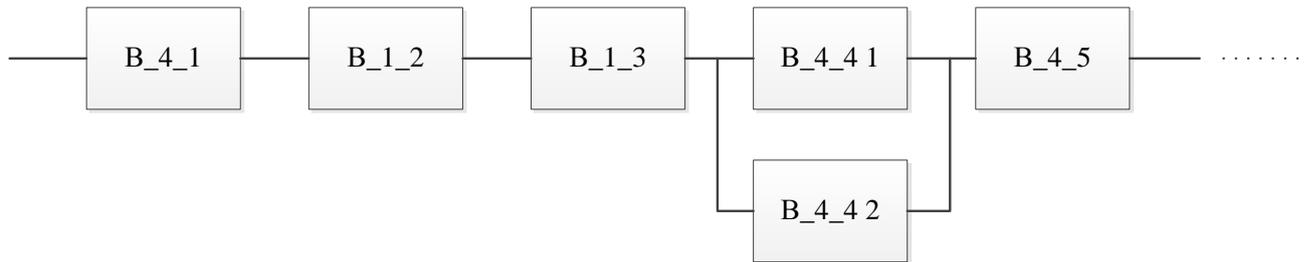


Рисунок 2.12 – Расчетная логическая схема надежности системы управления процессами перегонки на вакуумном блоке установки АВТ-4

В\_4\_1 - САР температуры мазута на выходе из печи П-3; В\_1\_2 - САР уровня в ёмкости Е-13; В\_1\_3 - САР уровня в ёмкости Е-3; В\_4\_4 1 - САР температуры верха колонны К-5 (I-ЦО); В\_4\_4 2 - резервная САР температуры верха колонны К-5 (I-ЦО); В\_4\_5 - САР температуры колонны К-5 (II-ЦО).

Интенсивности отказов каждой из этих локальных САР известны:

$$\lambda_{\text{В}_4_1} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час,}$$

$$\lambda_{\text{В}_1_2} = 0,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час,}$$

$$\lambda_{\text{В}_1_3} = 0,21 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час,}$$

$$\lambda_{\text{В}_4_5} = 0,35 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

При этом САР температуры верха колонны К-5 (I-ЦО) для повышения надежности дублирована.

В этом случае время наработки на отказ определяется по формуле (2.36):

$$T_{\text{В}_4_4} = \frac{1}{\lambda_{\text{В}_4_4}^0} \left( \frac{1}{2} + 1 \right) = \frac{3}{2 \cdot \lambda_{\text{В}_4_4}^0} \text{ час,}$$

интенсивность отказов для указанной АСУ ТП по формуле (2.35):

$$\lambda_{В_4_4} = \frac{2}{3} \lambda_{В_4_4}^0 = 0,16 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

При этом общая интенсивность отказов АСУ вакуумного блока установки АВТ-4 определяется суммированием интенсивностей отказов локальных АСУ ТП и составляет:

$$\lambda_{ВБ} = \lambda_{В_4_1} + \lambda_{В_1_2} + \lambda_{В_1_3} + \lambda_{В_4_4} + \lambda_{В_4_5} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

Таким образом, окончательно интенсивность отказов АСУ установки АВТ-4:

$$\lambda_{АВТ-4} = \lambda_{ЭЛОУ} + \lambda_{АВТ} + \lambda_{ВБ} + \lambda_{БСТБ} + \lambda_{БЗ} + \lambda_{БУТ} = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

Математическое ожидание времени работы АСУ установки АВТ-4 до первого отказа составляет:

$$T_{АВТ-4} = \frac{1}{\lambda_{АВТ-4}} = 11494 \text{ час} = 478 \text{ сут.}$$

Установленное в ходе расчета время работы АСУ установки АВТ-4 до первого отказа означает, что установленная система резервирования АСУ ТП может обеспечить до 478 суток безаварийной работы средств АСУ ТП. Если получившееся время работы АСУ установки АВТ-4 до первого отказа не удовлетворяет требованиям по надежности средств АСУ ТП, то можно повысить этот показатель путем пересмотра проектного уровня резервирования АСУ ТП или замены (модернизации) оборудования.

### 2.3.13 Сравнительный анализ относительной эффективности локальных САР

Сравнительный анализ относительной эффективности локальных САР предлагается провести способом формирования интегральных обобщённых показателей. Указанный способ основан на методе многокритериального оценивания сравнительной эффективности DEA (Data Envelopment Analysis), одним из наиболее современных методов построения рейтинговых и экспертных оценок производственно-экономических систем [15, 27, 42, 77, 98-107]. Одним из главных достоинств предлагаемого подхода является минимальное присутствие субъективного фактора при формировании интегральных оценок эффективности. Методология DEA реализует непараметрический подход к определению обобщённой эффективности.

Рассмотрим общую постановку задачи. Предполагается, что оцениваемый многомерный объект имеет  $m$  входных и  $k$  выходных параметров. Таким образом,

ВХОДЫ и ВЫХОДЫ являются, соответственно,  $m$  и  $k$  мерными векторами:

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  и  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$  (рисунок 2.13) [19].

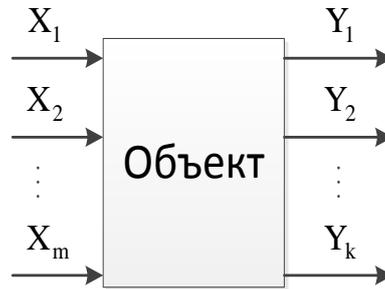


Рисунок 2.13 – Обобщенное представление объекта оценивания

Выбор выходных величин  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_k$  осуществляется таким образом, чтобы каждая из них характеризовала положительный фактор в суммарном показателе эффективности  $f$  исследуемой системы [9, 28, 61-70]:

$$\frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_i} > 0, i = 1, 2, \dots, k. \quad (2.39)$$

В качестве выходных характеристик могут быть самые различные величины, оценивающие разнообразные аспекты функционирования системы. При этом их характеристика может быть отражена самыми различными несопоставимыми и несвязанными мерами.

Выбор входных величин  $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m$  осуществляется таким образом, чтобы уменьшение каждой из них приводило к повышению показателя суммарной эффективности:

$$\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_j} < 0, j = 1, 2, \dots, m. \quad (2.40)$$

Тогда, для базового варианта метода DEA, структура комплексного показателя эффективности каждого анализируемого объекта формируется на основе выбора  $m$  входных  $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m$  и  $k$  выходных  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_k$  величин. Множество указанных величин представляет достаточно полную и адекватную характеристику объекта [18, 19, 61, 65, 67-70]:

$$f = \frac{u_1 \cdot Y_1 + u_2 \cdot Y_2 + \dots + u_i \cdot Y_i + \dots + u_k \cdot Y_k}{v_1 \cdot X_1 + v_2 \cdot X_2 + \dots + v_j \cdot X_j + \dots + v_m \cdot X_m} . \quad (2.41)$$

В (2.41)  $u_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) – неотрицательные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных факторов  $Y_i$  в суммарный коэффициент эффективности  $f$ . Соответственно,  $v_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) – весовые коэффициенты входных величин  $X_j$ . Весовые коэффициенты  $u_i, v_j$  в (2.41) являются неизвестными и различными для всех исследуемых объектов, единственным ограничением, при вычислении коэффициента эффективности  $f$  является их неотрицательность:  $u_i \geq 0, v_j \geq 0$ .

Показатели комплексной эффективности  $f_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) при расчете для  $N$  исследуемых объектов являются конечными. Их распределение осуществляется на числовом интервале  $[0, 1]$  при условии максимизации критерия эффективности (2.41) для каждого объекта. Тогда аналитическая зависимость, отражающая для каждого из  $N$  объектов на интервале  $[0, 1]$  условия существования значений коэффициентов комплексной эффективности  $f_n$  может быть представлена в следующем виде [27, 98, 102, 104-107]:

$$\frac{u_1 \cdot Y_{1n} + u_2 \cdot Y_{2n} + \dots + u_i \cdot Y_{in} + \dots + u_k \cdot Y_{kn}}{v_1 \cdot X_{1n} + v_2 \cdot X_{2n} + \dots + v_j \cdot X_{jn} + \dots + v_m \cdot X_{mn}} \leq 1, n = 1, 2 \dots N . \quad (2.42)$$

В (2.42) для  $n$ -го объекта численными значениями входа  $X_j$  являются величины  $X_{jn}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), а выхода  $Y_i$  величины  $Y_{in}$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ).

Область  $G$  изменения значений весовых коэффициентов  $(u_i, v_j) \in G$  определяется из системы неравенств (2.42), при заданных величинах входных  $X_{jn}$  и выходных  $Y_{in}$  факторов.

Для определения величин обобщенного показателя эффективности  $f_n$  для каждого из  $N$  объектов предлагается использовать процедуру оптимизации по критерию



первичной переработки нефти и показывает степень реализации технологических возможностей, доступных системе управления.

Результаты использования DEA-метода очень эффективно отражают оценку качества управления, потому что позволяют установить параметры, управление которыми соответствует технологическим требованиям, и выявить, насколько показатели неэффективно управляемых параметров далеки от своих потенциально возможных эффективных значений.

Рассмотрим применение DEA-метода для интегральной оценки качества управления на примере локальных САР вакуумного блока установки АВТ-4. Как показал проведенный анализ подсистемы технологического управления (см. раздел 2.3.7), в составе вакуумного блока установки АВТ-4 функционируют 11 локальных САР.

В таблицу 2.7 сведены данные из паспортов локальных САР вакуумного блока, представлены наименования и анализируемые показатели качества управляемых технологических параметров, указываемые в отклонениях от заданных по технологическим требованиям, и интегральные DEA-оценки относительной эффективности.

Отклонение фактических значений показателей качества в динамическом и установившемся режимах от заданных по технологическим требованиям используется в постановке задачи как выходные величины  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) (максимальное перерегулирование, время регулирования, степень затухания, установившееся значение, максимальная динамическая ошибка).

Входные величины  $X_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 4$ ) (заданное значение регулируемой величины; возмущения, действующие на систему; технологические параметры оборудования) и их весовые коэффициенты  $v_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) рассматриваются как постоянные и для упрощения решения задачи определения обобщенного показателя эффективности  $f_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 11$ ) их целесообразно исключить из целевой функции (2.43) и системы ограничений (2.44). В результате общая постановка модифицированного DEA-метода формулируется как задача линейного программирования следующим образом:

Определить максимум функционала:



Анализ полученных результатов на примере локальных САР вакуумного блока установки АВТ-4 показывает, что значения таких параметров, как расход I циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5, расход III циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5 и расход дизельной фракции на выходе из вакуумной колонны К-5 (п. 6, 8, 10 таблицы 2.7), имеющие интегральные оценки, равные единице, соответствуют предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы технологическим требованиям. При этом остальные взаимосвязанные параметры локальных САР не соответствуют установленным требованиям (п. 1-5, 7, 9, 11 таблицы 2.7), что означает необходимость разработки решений по повышению уровня автоматизации и эффективности технологического управления; оптимизации по системным критериям качества состава, структуры и параметров многосвязных систем управления технологическими процессами.

Как показывают результаты применения DEA-метода (п. 1, 2, 3 таблицы 2.7) в данном случае наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления имеют САР температурой мазута на выходе из печи П-3, расходом мазута в печь П-3 и расходом перегретого пара в печь П-3.

Это означает необходимость перехода к последующим этапам 10-12 для анализа динамики объектов регулирования и параметрической оптимизации данной многоконтурной САУ. Алгоритмы решения указанных задач и их апробация описаны в последующих главах диссертации.

В главе 3 рассмотрены математические модели объектов регулирования, а в главе 4 разработаны алгоритмы решения задачи параметрического синтеза и оптимизации многоконтурных каскадных систем управления, применение которых к оптимизации САУ процессом подогрева сырья, имеющей наихудшие обобщенные оценки качества регулирования, позволило повысить эффективность процессов управления при одновременной минимизации затрат материальных ресурсов и энергии.

Таблица 2.7. Технологические параметры и оценки показателей качества локальных САР вакуумного блока установки АВТ-4

№ п/п <i>n</i>	Наименование управляемого параметра технологического процесса	Отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям					Интегральная ДЕА-оценка, $f_n$
		$Y_{in} = y_{зад_{in}} - y_{факт_{in}}$ , $i = 1, 2, 3$			$Y_{in} = - \left  \frac{y_{зад_{in}} - y_{факт_{in}}}{y_{зад_{in}}} \right $ , $i = 4, 5$		
		Максимальное перерегулирование, %	Время регулирования, с	Степень затухания	Установившееся значение	Максимальная динамическая ошибка	
1	Температура мазута на выходе из печи П-3	10	-30	0,02	-0,02	-0,04	<b>0,3296</b>
2	Расход мазута в печь П-3	8	-13	0,04	-0,05	-0,03	<b>0,4665</b>
3	Расход перегретого пара в печь П-3	5	10	0,02	-0,04	-0,05	<b>0,6729</b>
4	Уровень в атмосферной колонне К-2	10	23	0,05	0	-0,01	<b>0,9637</b>
5	Температура низа вакуумной колонны К-5	5	30	0	-0,01	0	<b>0,9760</b>
6	Расход I циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5	20	27	0	-0,03	0	<b>1,0000</b>
7	Расход II циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5	10	15	0,05	0	0	<b>0,9043</b>
8	Расход III циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5	20	40	0,4	-0,02	-0,01	1,0000

Продолжение таблицы 2.7

№ п/п , <i>n</i>	Наименование управляемого параметра технологического процесса	Отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям					Интегральная DEА-оценка, <i>f<sub>n</sub></i>
		$Y_{in} = y_{задin} - y_{фактин}$ , $i = 1, 2, 3$			$Y_{in} = - \frac{y_{задin} - y_{фактин}}{y_{задin}}$ , $i = 4, 5$		
		Максимальное перерегулирование, %	Время регулирования, с	Степень затухания	Установившееся значение	Максимальная динамическая ошибка	
9	Расход гудрона из вакуумной колонны К-5	15	20	0	0	-0,03	<b>0,9620</b>
10	Расход дизельной фракции на выходе из вакуумной колонны К-5	25	20	0	0	-0,06	<b>1,0000</b>
11	Расход тяжелого вакуумного газойля на выходе из вакуумной колонны К-5	20	10	0,01	-0,01	0	<b>0,9221</b>

Основные результаты и выводы:

1. Рассмотрены основные принципы и допущения, положенные в основу системного анализа многостадийных процессов первичной переработки нефти.
2. Разработана методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации, позволяющая на основе построения системных интегральных оценок относительной эффективности локальных контуров регулирования выявить неэффективно управляемые технологические параметры и оптимизировать соответствующие многосвязные системы управления.

3. Разработана методика оценки уровня автоматизации и эффективности управления процессом первичной переработки нефти, регламентирующая алгоритмы получения, сортировки, обработки и анализа информации согласно сформулированным требованиям к форме представления исходных данных и результатам их анализа.

4. Для оценки сравнительной эффективности локальных САР был применен DEA-метод многокритериального оценивания, который позволил установить формализованные (количественные) относительные оценки соответствия существующих САР действующим нормативным документам и требованиям, выбранным системным критериям технологической эффективности, промышленной и экологической безопасности, ресурсосбережения и энергоэффективности.

5. Полученные в результате системного анализа количественные оценки позволяют разработать рекомендации по повышению уровня автоматизации и эффективности технологического управления; оптимизации по системным критериям структуры и параметров многосвязных систем управления технологическими процессами с целью повышения эффективности производственного процесса при одновременной минимизации затрат материальных ресурсов и энергии.

6. Разработанные методики были апробированы при решении задачи системного анализа процесса первичной переработки нефти на установке АВТ. В результате реализации этапов 1-8 была проведена оценка уровня автоматизации и эффективности управления процессом, а также получены результаты сравнительного анализа эффективности работы 11 взаимосвязанных локальных САР вакуумного блока установки.

7. Как показывают результаты применения DEA-метода, в данном случае наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления имеют контуры регулирования температуры мазута на выходе из печи подогрева сырья, расходов мазута и перегретого пара в печь многоконтурной САУ процессом подогрева сырья. Это означает необходимость перехода к последующим этапам 10-12 для анализа динамики объектов регулирования и параметрической оптимизации данной многоконтурной САУ. Алгоритмы решения указанных задач и их апробация описаны в последующих главах диссертации.

### **3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ САУ ПОДОГРЕВОМ СЫРЬЯ**

В настоящем разделе на примере САУ подогревом сырья вакуумного блока установки АВТ проводится в рамках общего подхода, предложенного в диссертационном исследовании, анализ динамики объектов регулирования и синтез математических моделей локальных САР в форме передаточных функций по рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий. В разработке математических моделей активное участие принимал аспирант А.С. Морев.

Типовая функциональная схема вакуумного блока установки АВТ представлена на рисунке 3.1. Одной из основных технологических единиц вакуумного блока установки АВТ является печь подогрева сырья (П-3), в которой осуществляется подогрев мазута с целью получения вакуумного газойля. Дополнительным процессом, происходящим в печи подогрева сырья, является перегрев пара, который подается из заводской сети и в дальнейшем поступает в вакуумную колонну (К-10) и в отпарные колонны (К-11, К-12, К-13) (рисунок 3.1).

Основной задачей многоконтурной САУ процессом подогрева сырья является регулирование температуры мазута на выходе из печи. Основными возмущениями, для компенсации которых предназначена данная система, являются: температура мазута на входе в печь, расход мазута в вакуумную колонну и расход перегретого пара на входе в змеевики печи.

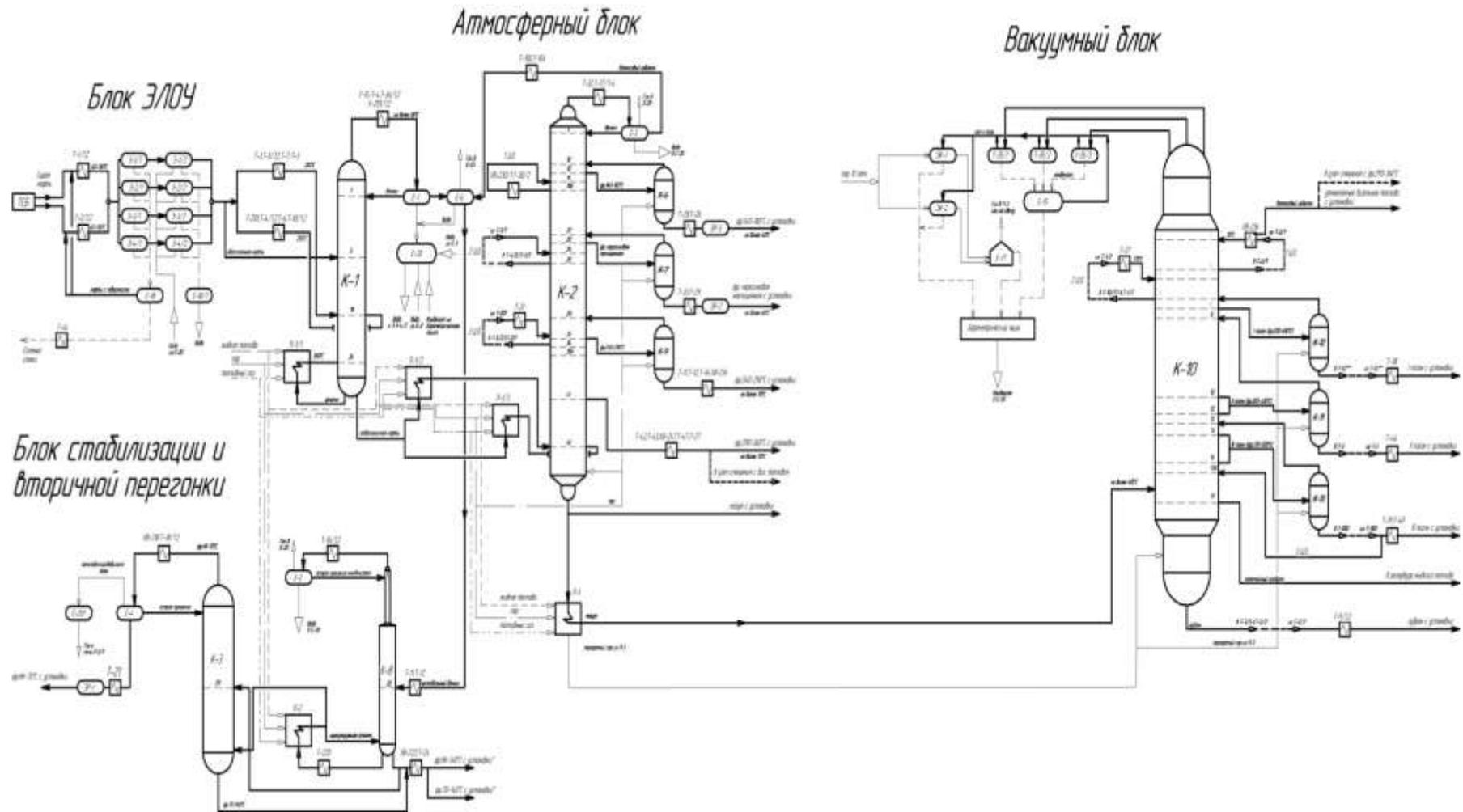


Рисунок 3.1 – Функциональная схема вакуумного блока установки АВТ

### 3.1 Математическое описание объектов управления САУ подогревом сырья

Печь подогрева сырья представляет собой одноходовую коробчатую печь радиантно-конвекционного типа с горизонтальным расположением системы труб.

Таблица 3.1. Основные технические характеристики печи подогрева сырья

Теплопроизводительность	$Q = 29,66 \cdot 10^6$ ккал/час
Расход мазута	390 т/час
Расход перегретого пара	17,1 т/час
Число потоков:	6
Температура мазута на входе	(340-360) °С
Температура мазута на выходе	(390-410) °С
Температура водяного пара на входе	240 °С
Температура водяного пара на выходе	(270-350) °С
КПД печи	0,67
Количество труб:	
- в радиационной секции	54 шт.
- в конвекционной секции	86 шт.
- в пароперегревателе	6 шт.
Эффективная длина труб	24,267 м
Площадь поверхности нагрева	
- радиационной секции	980 м <sup>2</sup>
- конвекционная секция	895 м <sup>2</sup>
- пароперегреватель	120 м <sup>2</sup>
Температура дымовых газов:	
- на перевале	793 °С
- на выходе из конвекционной зоны	470 °С
Давление мазута на входе в печь	(8-14) кгс/см <sup>2</sup>
Давление водяного пара на входе в печь	10 кгс/см <sup>2</sup>

Шестиходовая трубная система состоит из труб, образующих конвекционную и радиационную зоны и пароперегреватель. Мазут подается в змеевики конвекционной зоны печи с низа вакуумной колонны (К-2) шестью потоками, после чего мазут поступает в радиационную зону, расположенную внизу печи, откуда он поднимается по змеевикам вверх. Подача перегретого водяного пара, имеющего температуру 290°С, способствует предотвращению разложения мазута при его нагревании, снижению коксования трубной системы печи и увеличению доли отгона на входе в вакуумную колонну (К-10) в змеевики каждого потока.

Мазут, перемешиваясь с перегретым паром, поступает в трубы радиационной зоны. По одной из труб мазут поднимается вверх с уровня 5,73 м до уровня 10,955 м, после чего

по змеевикам опускается до уровня 9,755 м и выходит из установки в вакуумную колонну К-10. Мазут поднимается вверх по змеевикам и выходит из установки на уровнях 9,355 м и 8,955 м, соответственно.

Пар, поступающий из заводской сети, перегревается в змеевиках пароперегревателя до температуры 365°C и поступает в колонны К-10, К-11, К-12 и К-13.

Для сжигания жидкого топлива применяются 24 инжекционные горелки типа ГП; водяной пар используется для распыления жидкого топлива. Мазут вводится по наружной трубе, а водяной пар - по внутренней трубе, их расход регулируется запорной арматурой. Подогретая парожидкостная эмульсия подается двумя потоками к соплу и завихрителю горелки, в которой происходит её распыление, и образование топливовоздушной смеси, после чего в камере сгорания происходит воспламенение.

При математическом описании печи подогрева сырья как объекта регулирования САУ были приняты следующие упрощения и допущения.

1. Поскольку при изменении температуры мазута в диапазоне от 330°C до 390°C его вязкость незначительна, то мазут можно рассматривать как жидкость, близкую к идеальной жидкости.

2. Зависимость между изменением температуры поверхности трубы и величиной теплового потока считается незначительной, поэтому она не рассматривается при моделировании.

3. Можно пренебречь изменениями кинетической и потенциальной энергии во времени.

4. Давление можно считать приблизительно постоянным.

Указанные допущения позволяют записать следующее уравнение энергетического баланса для протекающего по трубопроводу мазута [106,107]:

$$q_d = M \frac{\partial i}{\partial x} + S\rho \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (3.1)$$

где  $q_d$  – линейная плотность теплового потока от стенки трубы к мазуту;  $M$  – массовый расход мазута;  $i$  – удельная энтальпия мазута;  $\rho$  – плотность мазута;  $S$  – площадь сечения трубы.

Подставим в уравнение (3.1) значения удельной теплоемкости  $c$  и температуры  $T$  вместо энтальпии  $i$ , что позволит записать следующее соотношение:

$$q_d = Mc \frac{\partial T}{\partial x} + S\rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Перейдем к относительной пространственной координате:

$$\xi = x/L, \quad (3.3)$$

где  $L$  – общая длина рассматриваемой трубы.

Тогда уравнение (3.2) примет вид:

$$q_d = \frac{Mc}{L} \frac{\partial T}{\partial \xi} + S\rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.4)$$

После линеаризации в области начального установившегося состояния, соответствующего начальным значениям температуры  $T_0$ , массового расхода  $M_0$ , плотности теплового потока  $q_0$ , уравнение (3.4) может быть записано следующим образом:

$$\Delta q_d = S\rho c \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{M_0 c}{L} \frac{\partial \Delta T}{\partial \xi} + \frac{c}{L} \frac{\partial T_0}{\partial \xi} \Delta M + \frac{c}{L} \frac{\partial \Delta T}{\partial \xi} \Delta M, \quad (3.5)$$

где  $\Delta T$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta q_d$  – приращения температуры, массового расхода и плотности теплового потока, соответственно:

$$T = T_0 + \Delta T; \quad M = M_0 + \Delta M; \quad q_d = q_0 + \Delta q_d. \quad (3.6)$$

Введем относительные единицы для температуры, массового расхода и плотности теплового потока, соответственно:

$$\varphi_T = \Delta T / T_0; \quad \varphi_M = \Delta M / M_0; \quad \varphi_{q_d} = (\Delta q_d L) / (M_0 c). \quad (3.7)$$

Тогда уравнение (3.5) может быть записано как:

$$\varphi_{q_d}(\xi, t) = T(\xi) \frac{\partial \varphi_T(\xi, t)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_T(\xi, t)}{\partial \xi} + \varepsilon(\xi) \varphi_M(\xi, t), \quad (3.8)$$

где  $T(\xi)$  и  $\varepsilon(\xi)$  определяются согласно следующим соотношениям:

$$T(\xi) = \frac{SLq_0}{M_0}, \quad \varepsilon(\xi) = \frac{Lq_0}{M_0 c}. \quad (3.9)$$

Если считать линейную плотность теплового потока постоянной на всех участках трубопровода, то справедливо соотношение [106,107]:

$$\varepsilon(\xi) = T_{20} - T_{10}, \quad (3.10)$$

где  $T_{10}$  и  $T_{20}$  – температуры в начале и в конце трубопровода, соответственно.

Преобразуя по Лапласу уравнение (3.8) при нулевых начальных условиях, получим:

$$\varphi_{q_d}(\xi, s) = T(\xi)s\varphi_T(\xi, s) + \frac{\partial\varphi_T(\xi, s)}{\partial\xi} + \varepsilon(\xi)\varphi_M(\xi, s), \quad (3.11)$$

Введем в рассмотрение поток тепла через стенку трубы, который может быть определен согласно следующему выражению:

$$q_d = U\alpha(T_{sd} - T), \quad (3.12)$$

где  $U = \pi d$ ,  $d$  – внутренний диаметр трубы,  $T_{sd}$  – температура внутренней поверхности трубы,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы [45, 89].

Поскольку внутренний диаметр трубы  $d$ , по которой движется мазут, сопоставим с толщиной ее стенки  $\delta$ , то необходимо проанализировать динамику распространения тепла через стенку трубы. Для этого выделим в плоской стенке элементарный слой толщиной  $dy$ , расположенный на расстоянии  $y$  от нагреваемой поверхности. Предположим, что температуры граничных поверхностей стенки постоянны и равны,  $T_{s1}$  и  $T_{s2}$ , соответственно, следовательно, температурное распределение в стенке можно считать одномерным. Обозначим температуру рассматриваемого слоя  $T_s$ .

Рассмотрим элементарный слой и запишем для него уравнение энергетического баланса. Пусть  $q$  – это входящий тепловой поток, поступающий на единичную площадь рассматриваемого слоя, тогда выходящий тепловой поток определяется как  $q + (\partial q / \partial y)dy$ . В силу закона сохранения энергии, разность между входящим и выходящим тепловыми потоками за единицу времени, равна изменению внутренней энергии слоя, т.е. можно записать следующее уравнение [46, 90]:

$$q - \left( q + \frac{\partial q}{\partial y} dy \right) = \frac{\partial(c_s \rho_s T_s dy)}{\partial t}. \quad (3.13)$$

Будем считать, что удельная теплоемкость и плотность не изменяются во времени, тогда:

$$-\frac{\partial q}{\partial y} = c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t}. \quad (3.14)$$

Дополним уравнение (3.14) законом Фурье, согласно которому тепловой поток пропорционален градиенту температуры с коэффициентом пропорциональности, равным коэффициенту теплопроводности стенки трубы  $\lambda_s$ , который можно, в первом приближении, рассматривать как постоянную, не зависящую от температуры величину. Тогда, учитывая соответствующие начальные и граничные условия, можно записать следующие уравнения:

$$-\frac{\partial q_0}{\partial y} - \frac{\partial \Delta q}{\partial y} = c_s \rho_s \frac{\partial \Delta T_s}{\partial t}, \quad (3.15)$$

$$q_0 + \Delta q = -\lambda_s \left( \frac{\partial T_{s0}}{\partial y} + \frac{\partial \Delta T_s}{\partial y} \right), \quad (3.16)$$

где  $\Delta q$ ,  $\Delta T_s$  - это отклонения переменных  $q$ ,  $T_s$  от их установившихся значений  $q_0$  и  $T_{s0}$ , соответственно.

С учетом следующих соотношений, справедливых для установившегося состояния:

$$\frac{\partial q_0}{\partial y} = 0; \quad q_0 = -\lambda_s \frac{T_{s20} - T_{s10}}{\delta_s}, \quad (3.17)$$

где  $\delta_s$  - толщина стенки трубы,  $T_{s10}$  и  $T_{s20}$  - температуры граничных поверхностей стенки в установившемся режиме, уравнения (3.15) и (3.16) примут вид:

$$-\frac{\partial \Delta q}{\partial y} = c_s \rho_s \frac{\partial \Delta T_s}{\partial t}, \quad (3.18)$$

$$\Delta q = -\lambda_s \frac{\partial \Delta T_s}{\partial y}. \quad (3.19)$$

С учетом относительных отклонений  $\varphi_q = \frac{\Delta q}{q_0}$  и  $\varphi_{T_s} = \frac{\Delta T_s}{T_{s10} - T_{s20}}$  переменных  $q$ ,  $T_s$

от их установившихся значений  $q_0$  и  $T_{s0}$ , соответственно, уравнения (3.18) и (3.19) примут вид:

$$-\frac{\partial \varphi_q}{\partial t} = c_s \rho_s \frac{(T_{s10} - T_{s20})}{q_0} \frac{\partial \varphi_{T_s}}{\partial t}, \quad (3.20)$$

$$\varphi_q = \lambda_s \frac{(T_{s10} - T_{s20})}{q_0} \frac{\partial \varphi_{T_s}}{\partial y}. \quad (3.21)$$

Учет (3.17) и переход к безразмерным переменным  $\eta = \frac{y}{\delta}, \tau = \frac{t}{T_S}$ , где  $T_S = \frac{\delta_S^2 c_S \rho_S}{\lambda_S}$ ,

позволяет получить следующие уравнения:

$$\frac{\partial \varphi_q}{\partial \eta} + \frac{\partial \varphi_{T_S}}{\partial \tau} = 0, \quad (3.20)$$

$$\varphi_q + \frac{\partial \varphi_{T_S}}{\partial \eta} = 0. \quad (3.21)$$

Преобразуем уравнения (3.20)-(3.21) по Лапласу относительно безразмерного времени  $\tau$  при нулевом начальном условии  $\varphi_{T_S}(\eta, 0) = 0$ , что позволит получить уравнения относительно изображений  $\bar{\varphi}_q, \bar{\varphi}_{T_S}$ :

$$\frac{d\bar{\varphi}_q(\eta, s)}{d\eta} + s\bar{\varphi}_{T_S}(\eta, s) = 0, \quad (3.22)$$

$$\frac{d\bar{\varphi}_{T_S}(\eta, s)}{d\eta} + \bar{\varphi}_q(\eta, s) = 0. \quad (3.23)$$

Повторно применив к уравнениям (3.22) и (3.23) преобразование Лапласа по безразмерной координате  $z = \eta$ , получим следующие уравнения для двойных изображений  $\bar{\bar{\varphi}}_q, \bar{\bar{\varphi}}_{T_S}$ :

$$z\bar{\bar{\varphi}}_q - \bar{\bar{\varphi}}_{q1} + s\bar{\bar{\varphi}}_{T_S} = 0, \quad (3.24)$$

$$\bar{\bar{\varphi}}_q - \bar{\bar{\varphi}}_{T_S1} + z\bar{\bar{\varphi}}_{T_S} = 0. \quad (3.25)$$

Выразив из (3.24) - (3.25) двойные изображения  $\bar{\bar{\varphi}}_q, \bar{\bar{\varphi}}_{T_S}$ , можно получить после их обратного преобразования по переменной  $z$  следующие выражения для относительных изменений теплового потока:

$$\bar{\varphi}_q(\eta, s) = \bar{\varphi}_{q1}(s)ch\sqrt{s}\eta - \bar{\varphi}_{T_S1}(s)\sqrt{s}sh\sqrt{s}\eta, \quad (3.26)$$

$$\bar{\varphi}_{T_S}(\eta, s) = -\bar{\varphi}_{q1}(s)\frac{sh\sqrt{s}\eta}{\sqrt{s}} + \bar{\varphi}_{T_S1}(s)ch\sqrt{s}\eta. \quad (3.27)$$

Рассматривая другую граничную поверхность ( $\eta=1$ ), аналогично можно получить выражения для изображений по Лапласу относительных изменений теплового потока  $\bar{\varphi}_{q2}, \bar{\varphi}_{Ts2}$ :

$$\bar{\varphi}_{q2}(s) = \bar{\varphi}_{q1}(s)ch\sqrt{s} - \bar{\varphi}_{Ts1}(s)\sqrt{s}sh\sqrt{s}, \quad (3.28)$$

$$\bar{\varphi}_{Ts}(s) = -\bar{\varphi}_{q1}(s)\frac{sh\sqrt{s}}{\sqrt{s}} + \bar{\varphi}_{Ts1}(s)ch\sqrt{s}. \quad (3.29)$$

Уравнения (3.28) и (3.29) могут быть переписаны в следующем виде:

$$\bar{\varphi}_{q2}(s) = G_1(s)\bar{\varphi}_{q1}(s) - G_2(s)\bar{\varphi}_{Ts2}, \quad (3.30)$$

$$\bar{\varphi}_{Ts1}(s) = G_3(s)\bar{\varphi}_{q1}(s) - G_1(s)\bar{\varphi}_{Ts2}. \quad (3.31)$$

Здесь

$$G_1(s) = \frac{1}{ch\sqrt{s}}, \quad (3.32)$$

$$G_2(s) = \sqrt{s}th\sqrt{s}, \quad (3.33)$$

$$G_3(s) = \frac{th\sqrt{s}}{\sqrt{s}}. \quad (3.34)$$

Дополним уравнения (3.30)-(3.31) уравнениями, описывающими процессы теплопередачи на обеих граничных поверхностях стенки.

Согласно [45, 92], линейное приближение для приращения теплового потока  $q_1$  может быть записано в следующем безразмерном виде:

$$\varphi_{q1} = \varphi_{q1}^* - \chi_1\varphi_{Ts1}, \quad (3.35)$$

где слагаемое  $\varphi_{q1}^*$  описывает влияние на изменение теплового потока  $q_1$  основных внешних факторов, таких как изменение коэффициента теплопередачи или температуры среды и др.; константа  $\chi_1$  может быть определена при условии конвективного характера теплообмена согласно следующему соотношению [45, 92]:

$$\chi_1 = \frac{\alpha_1 \delta_s}{\lambda_s}. \quad (3.36)$$

Аналогично (3.35) и (3.36), может быть записано уравнение, описывающее распространение тепла к другой граничной поверхности стенки:

$$\varphi_{q2} = \varphi_{q2}^* - \chi_2 \varphi_{Ts2}, \quad (3.37)$$

где

$$\chi_2 = \frac{\alpha_2 \delta_s}{\lambda_s}. \quad (3.38)$$

Тогда для изображений тепловых потоков можно записать следующие уравнения:

$$\bar{\varphi}_{q1}(s) = Q_{11}(s) \bar{\varphi}_{q1}^*(s) + Q_{12}(s) \bar{\varphi}_{q2}^*(s), \quad (3.39)$$

$$\bar{\varphi}_{q2}(s) = Q_{21}(s) \bar{\varphi}_{q1}^*(s) + Q_{22}(s) \bar{\varphi}_{q2}^*(s), \quad (3.40)$$

где  $Q_{11}(s)$ ,  $Q_{12}(s)$ ,  $Q_{21}(s)$ ,  $Q_{22}(s)$  - передаточные функции, которые могут быть представлены в общей дробно-иррациональной форме:

$$Q_{kl}(s) = \frac{B_{kl}(s)}{A(s)}, \quad (3.41)$$

где:

$$A(s) = (\chi_1 + \chi_2) ch \sqrt{s} + (\chi_1 \chi_2 + s) \frac{sh \sqrt{s}}{\sqrt{s}}, \quad (3.42)$$

$$B_{21}(s) = \chi_2, \quad (3.43)$$

$$B_{22}(s) = \chi_1 ch \sqrt{s} + \sqrt{s} sh \sqrt{s}, \quad (3.44)$$

$$B_{11}(s) = \chi_2 ch \sqrt{s} + \sqrt{s} sh \sqrt{s}, \quad (3.45)$$

$$B_{12}(s) = \chi_1. \quad (3.46)$$

При выполнении условия  $\varphi_{q1} = \varphi_{q1}^*$ , из которого вытекает выполнение соотношений  $Q_{11}(s) = 1$ ,  $Q_{12}(s) = 0$  получаем следующие выражения для передаточных функций:

$$W_q(s) = \frac{1}{ch \sqrt{s} + \frac{1}{\chi_2} \sqrt{s} sh \sqrt{s}}, \quad (3.47)$$

$$W_T(s) = \frac{\frac{1}{\chi_2} \sqrt{s} sh \sqrt{s}}{ch \sqrt{s} + \frac{1}{\chi_2} \sqrt{s} sh \sqrt{s}}. \quad (3.48)$$

Передаточные функции (3.47) и (3.48) являются иррациональными, что существенно затрудняет их применение в инженерной практике.

Можно показать, что передаточные функции (3.47) и (3.48) могут быть аппроксимированы с помощью аperiodических звеньев первого порядка и записаны в виде:

$$W_q(s) \approx \frac{1}{1 + T_q s}, \quad (3.49)$$

$$W_T(s) \approx \frac{T_b}{1 + T_q s}, \quad (3.50)$$

с соответствующими постоянными времени:

$$T_q = \rho_s c_s \delta \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{2\lambda_s} \right), \quad (3.51)$$

$$T_b = \frac{\rho_s c_s \delta}{\alpha}. \quad (3.52)$$

Определим вынужденный тепловой поток  $q$  к наружной поверхности стенки с помощью передаточных функций (3.49)-(3.50):

$$\Delta q_d = W_q(s) \Delta q + W_T(s) \Delta q_d^*, \quad (3.53)$$

где  $\Delta q_d^*$  - это изменение теплового потока, определяемое изменением температуры мазута и коэффициента теплопередачи, которое может быть найдено в зависимости от начального установившегося состояния согласно выражению:

$$\Delta q_d^* = -U \alpha_0 \Delta T + q_0 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0}. \quad (3.54)$$

Как известно, изменение коэффициента теплопередачи  $\alpha$  в основном зависит от изменения расхода [46, 93], т.е. справедливо соотношение:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right)^n. \quad (3.55)$$

Поскольку при движении жидкости по трубе с цилиндрической формой сечения можно принять, что  $n \approx 0.8$  в (3.55), то данное соотношение можно переписать в следующем приближенном линейном виде:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = n \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right). \quad (3.56)$$

После подстановки (3.56) в уравнение (3.55) получаем:

$$\Delta q_d^* = -U\alpha_0\varphi_T + nq_0\varphi_M. \quad (3.57)$$

После подстановки (3.57) в (3.53) с учетом относительных единиц (3.7) и выражения:

$$\varphi_q = \frac{\Delta q}{q_{0m}}, \quad (3.58)$$

где  $q_{0m}$  – усредненная плотность теплового потока в установившемся начальном состоянии:

$$q_{0m} = \frac{M_0 c (T_{20} - T_{10})}{L}, \quad (3.59)$$

получим соотношение:

$$\varphi_{qd}(\xi, s) = \varepsilon_m W_q(s) \varphi_q(\xi, s) + W_T(s) [n\varepsilon(\xi) \varphi_M(\xi, s) - \alpha \varphi_T(\xi, s)], \quad (3.60)$$

где:

$$\varepsilon_m = \frac{T_{20} - T_{10}}{60}, \quad (3.61)$$

$$\alpha = \frac{U\alpha_0 L}{M_0 c}. \quad (3.62)$$

Передачные функции  $W_q(s)$  и  $W_T(s)$  и соответствующие постоянные времени могут быть определены согласно (3.49)-(3.52).

Для описания динамики температуры мазута, который протекает по трубе, из уравнений (3.11) и (3.60) могут быть получены соответствующие передачные функции. Для описания относительного изменения температуры, исключая из рассмотрения тепловой поток от поверхности трубы к потоку мазута, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\varphi_T(\xi, s)}{d\xi} + [T(\xi)s + \alpha W_T(s)] = \varepsilon_m W_q(s) \varphi_q(\xi, s) - \varepsilon(\xi) [1 - n W_T(s)] \varphi_M(\xi, s), \quad (3.63)$$

которое может быть преобразовано к линейному неоднородному уравнению первого порядка общего вида:

$$\frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} + F(\xi)\varphi(\xi) = R(\xi), \quad (3.64)$$

имеющему известное общее решение:

$$\varphi(\xi) = \left[ \varphi(0) + \int_0^\xi R(z) e^{\int_0^z F(\eta) d\eta} dz \right] e^{-\int_0^\xi F(\eta) d\eta} = \varphi(0) e^{-\int_0^\xi F(\eta) d\eta} + \int_0^\xi R(z) e^{-\int_0^z F(\eta) d\eta} dz. \quad (3.65)$$

В (3.65) функции  $\varphi(\xi) = \bar{\varphi}_T(\xi, s)$ ,  $\varphi(0) = \bar{\varphi}_{T1}(s)$  представляют собой преобразования по Лапласу изменений температуры жидкости на входе в трубопровод. Тогда можно записать:

$$F(\eta) = T(\eta)s + \alpha W_T(\xi), \quad (3.66)$$

$$R(z) = \varepsilon_m W_q(s) \varphi_q(z, s) - \varepsilon(z) [1 - n W_T(s)] \varphi_M(z, s). \quad (3.67)$$

После подстановки выражений (3.66), (3.67) в общее решение (3.65), можно найти искомые передаточные функции.

Обозначим относительное изменение температуры в начале трубопровода как  $\varphi_{T1}$ . Если расход жидкости на входе трубопровода можно считать постоянным, то в произвольном сечении он зависит только от того, как изменяется масса жидкости в рассматриваемом сечении трубопровода с координатой  $\xi$  по сравнению с началом трубопровода:

$$\varphi_M(\xi, t) = \frac{SL}{M_0} \int_0^\xi \frac{d\rho}{dt} d\xi. \quad (3.68)$$

Для несжимаемых жидкостей равенство  $\varphi_M = 0$  справедливо для любой координаты по всей длине трубопровода, а для сжимаемых жидкостей это равенство выполняется только при условии, что давление в трубопроводе можно считать постоянным:

$$\varphi_M(\xi, t) = \frac{SL}{M_0} \int_0^\xi \left( \frac{d\rho}{dt} \right) \frac{dT}{dt} d\xi. \quad (3.69)$$

В инженерных расчетах влияние относительного изменения расхода можно считать незначительным, и в первом приближении даже для газов и перегретых паров можно принять справедливым выполнение условия  $\varphi_M(\xi) \approx 0$ .

Подставив (3.66) и (3.67) в уравнение (3.65) при  $\varphi_M = \varphi_q = 0$ , получим:

$$\bar{\varphi}_T(\xi, s) = e^{-T_d(\xi)s + \alpha\xi W_T(s)} \bar{\varphi}_{T1}(s), \quad (3.70)$$

где, согласно выражению (3.10):

$$T_d(\xi) = \frac{S}{M_0} \int_0^\xi \rho_0 dx = \frac{m_{0\xi}}{M_0}. \quad (3.71)$$

Из (3.71) следует, что  $m_{0\xi}$  - масса жидкости на участке трубы между ее началом и сечением с координатой  $\xi$ . Постоянная времени  $T_d(\xi)$  равна времени транспортного запаздывания, которое необходимо для прохождения частицей жидкости в начальном установившемся состоянии расстояния от начала трубопровода до рассматриваемого сечения.

Для определения передаточной функции по каналу «изменение температуры мазута на входе в трубу (на входе в печь) - изменение температуры мазута на выходе из печи» подставим  $\xi = 1$  в (3.71), после чего получим:

$$\bar{\varphi}_{T2}(s) = W_{TM2}(s) \varphi_{T1}(s), \quad (3.72)$$

$$W_{TM2}(s) = e^{-T_d s - \alpha W_T(s)}. \quad (3.73)$$

Транспортное запаздывание можно определить с помощью следующего соотношения:

$$T_d = \frac{m_0}{M_0} = \frac{L}{\omega_0}, \quad (3.74)$$

где  $m_0$  представляет собой общую массу мазута, который находится в трубе;  $\omega_0$  - это средняя скорость, с которой мазут движется по трубе в начальном установившемся режиме.

Подстановка выражения (3.50) в (3.73) позволяет получить:

$$W_{TM2}(s) = e^{-T_d s - \alpha \frac{T_b s}{T_q s + 1}}. \quad (3.75)$$

Найдем передаточную функцию, связывающую изменение тепловой мощности печи с изменением температуры мазута на выходе из печи, считая, что плотность теплового потока, подводимого к наружной поверхности трубы, изменяется, а температура и расход жидкости в начале рассматриваемой трубы остаются неизменными ( $\varphi_{T1} = \varphi_{M1} = 0$ ). При этом можно пренебречь изменением расхода по длине трубопровода вследствие теплового расширения жидкости, т.е.  $\varphi_M(\xi, t) \approx 0$ . Влияние относительного изменения плотности теплового потока на температуру в произвольном сечении трубы может быть описано с помощью следующей зависимости, полученной на основе уравнений (3.65)-(3.67):

$$\bar{\varphi}_T(\xi, s) = \varepsilon_m W_q(s) \int_0^\xi e^{-\int_z^\xi [T(\eta)s + \alpha W_T(s)] d\eta} \cdot \bar{\varphi}_q(z, s) dz. \quad (3.76)$$

Допустим, что изменением приращения теплового потока  $\Delta q$  по длине трубы можно пренебречь, тогда относительную величину  $\varphi_q$  можно считать не зависящей от  $\xi$  и записать в виде следующего выражения:

$$\varphi_q = \frac{\Delta q}{q_{0m}} = \frac{L\Delta q}{Q_0} = \frac{\Delta Q}{Q_0} = \varphi_Q, \quad (3.77)$$

согласно которому она определяется как относительное изменение суммарного потока тепла  $Q$ , которое равно подводимой тепловой мощности. Следовательно, можно записать выражение:

$$\bar{\varphi}_T(\xi, s) = \bar{\varphi}_Q \varepsilon_m W_q(s) \int_0^\xi e^{T_d(z)s - T_d(\xi)s + \alpha W_T(s)(z - \xi)} dz. \quad (3.78)$$

Подставив  $\xi = 1$  в (3.78), получим:

$$\bar{\varphi}_{T2}(s) = W_{TM1}(s) \bar{\varphi}_Q(s), \quad (3.79)$$

где  $W_{TM1}(s)$  - искомая передаточная функция по каналу «изменение тепловой мощности печи - изменение температуры мазута на выходе из печи», которая может быть определена согласно соотношению:

$$W_{TM1}(s) = \varepsilon_m W_q(s) \int_0^{\xi} e^{T_d(z)s - T_d(\xi)s + \alpha W_T(s)(z-1)} dz. \quad (3.80)$$

Принимая

$$T_d(z) \approx T_d z, \quad (3.81)$$

и интегрируя выражение (3.80), получим:

$$W_{TM1}(s) = \varepsilon_m \frac{W_q(s)}{T_d s + \alpha W_T(s) + 1} W_{TM2}(s). \quad (3.82)$$

Подставив (3.49)-(3.50) в (3.82), получим:

$$W_{TM1}(s) = \frac{\varepsilon_m}{s(T_d + \alpha T_b + T_b T_q s) + 1} W_{TM2}(s). \quad (3.83)$$

Перейдем к рассмотрению динамики изменения температуры на выходе в зависимости от расхода. После подстановки  $\varphi_{T1} = \varphi_Q = 0$  в уравнения (3.65)-(3.67), можно получить следующее выражение:

$$\bar{\varphi}_T(\xi, s) = [1 - W_T(s)] \int_0^{\xi} e^{-z} [T(\eta)s + \alpha W_T(s)] d\eta \cdot \varepsilon(z) \bar{\varphi}_M(z, s) dz. \quad (3.84)$$

Для вычисления интеграла в выражении (3.84) необходимо определить зависимость  $\varepsilon(\xi)$ , которая описывает начальное распределение плотности теплового потока или температуры по длине трубы в установившемся режиме. Если можно считать, что плотность теплового потока не меняется в зависимости от координаты, то  $\varepsilon(\xi)$  является константой:

$$\varepsilon(\xi) = \frac{T_{20} - T_{10}}{60} = \varepsilon_m. \quad (3.85)$$

Для несжимаемой жидкости расход на всех участках трубопровода одинаков, и  $\varphi_M$  не зависит от  $\xi$ , следовательно, величину  $\bar{\varphi}_M(\xi, s)$  можно с допустимой в инженерных расчетах точностью заменить ее средним значением  $\bar{\varphi}_{Mm}(s)$ . Тогда из уравнения (3.84) следует:

$$\varphi_{T2}(s) = W_{TM4}(s) \varphi_M(s), \quad (3.86)$$

$$W_{TM4}(s) = \varepsilon_m (1 - nW_T(s)) \int_0^{\xi} e^{T_d(z)s - T_d(1)s + \alpha W_T(s)(z-1)} dz. \quad (3.87)$$

После интегрирования выражения (3.87), получим:

$$W_{TM4}(s) = \varepsilon_m \frac{1 - nW_T(s)}{T_d s + \alpha W_T(s) + 1} W_{TM2}(s). \quad (3.88)$$

После подстановки (3.50) в (3.88) получим следующее выражение для искомой передаточной функции:

$$W_{TM4}(s) = \frac{\varepsilon_m}{s} \frac{1 + (T_q - nT_b)s}{(T_d + \alpha T_b + T_b T_q s + 1)} W_{TM2}(s). \quad (3.89)$$

Постоянные времени и коэффициенты найденных передаточных функций были рассчитаны на основе исходных данных, представленных в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Исходные данные для расчета коэффициентов передаточных функций

Наименование/обозначение параметра	Значение параметра
Материал труб печи	Сталь 15X5M
Общая длина труб, $L$	558,141 м
Полезная длина труб змеевиков печи	24,267 м
Скорость движения мазута, $\omega_0$	7 м/с
Толщина стенки трубы, $\delta$	0,008 м
Коэффициент теплопроводности стенки трубы, $\lambda_s$	33 Вт/м $^{\circ}$ C
Плотность стали 15X5M, $\rho_s$	7500 кг/м $^3$
Теплоемкость стали 15X5M, $c_s$	483 Дж/кг $^{\circ}$ C
Коэффициент теплоотдачи от стенки, $\alpha$	5000 Вт/м $^2$ $^{\circ}$ C
Расход жидкого топлива в начальном установившемся режиме, $B_0$	кг/с

В результате расчетов были получены следующие значения постоянных времени и коэффициентов передаточных функций:

$$\begin{aligned} T_q &= 9,1 \text{ сек}; T_b = 5,8 \text{ сек}; T_d = 79,73 \text{ сек}, \\ \varepsilon_m &= 1; \alpha = 27,57. \end{aligned} \quad (3.90)$$

Подстановка численных значений (3.90) в выражения для искомым передаточных функций позволяет получить:

$$W_{TM2}(s) = e^{-79,73s - \frac{160s}{9,31s+1}}, \quad (3.91)$$

$$W_{TM1}(s) = 48 \frac{1}{742,3s^2 + 239,6s + 1} e^{-79,73s - \frac{160s}{9,31s+1}}, \quad (3.92)$$

$$W_{TM4}(s) = 3,6 \frac{4,67s + 1}{742,3s^2 + 239,6s + 1} e^{-79,73s - \frac{160s}{9,31s+1}}. \quad (3.93)$$

Для упрощения моделирования найденных передаточных функций можно разложить входящие в их состав экспоненты в ряд Тейлора и ограничиться линейными членами разложения бесконечного ряда. Анализ влияния числа членов ряда Тейлора на точность моделирования показал, что можно ограничиться двумя первыми членами бесконечного ряда.

Для упрощения использования данной передаточной функции при решении задачи синтеза замкнутой системы управления переходная характеристика объекта управления по каналу расхода топлива в печь подогрева сырья, описываемого передаточной функцией (3.92) с учетом двух первых членов разложения экспоненты в бесконечный ряд Тейлора, была аппроксимирована следующей передаточной функцией, содержащей звено транспортного запаздывания:

$$W_{TM1}(s) = 48 \frac{1}{742,3s^2 + 239,6s + 1} e^{-175s}. \quad (3.94)$$

Моделирование в прикладном пакете MatLab переходной характеристики объекта управления, описываемого передаточной функцией (3.94) и сравнение с переходной характеристикой объекта управления, описываемого передаточной функцией (3.92) позволили сделать вывод о высокой точности аппроксимации (рисунок 3.2).

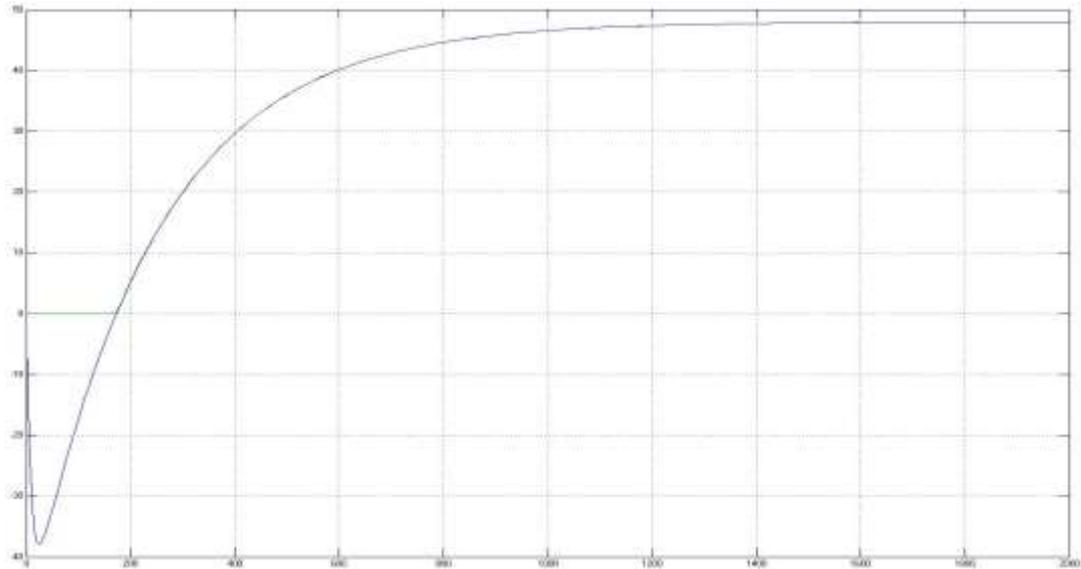


Рисунок 3.2 - Сравнение переходных характеристик объектов управления, описываемых передаточными функциями (3.94) и (3.92)

### 3.2 Моделирование динамики движения жидкости и пара по трубам

Рассмотрим математическое описание процессов движения жидкости и пара по трубопроводу, обладающих существенно меньшей инерционностью по сравнению с другими технологическими процессами, протекающими в вакуумном блоке установки АВТ. Для описания данных процессов можно использовать апериодические звенья первого порядка, коэффициент передачи которых равен единице при изменении расхода на одну условную единицу. В самом общем виде передаточная функция участка трубопровода может быть записана как:

$$W_{\text{тр}}(s) = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (3.95)$$

Здесь постоянная времени  $T$  может быть рассчитана с помощью соотношений:

$$T = n \frac{L}{\omega}, \quad \omega = \frac{M}{S\rho}, \quad (3.96)$$

где  $L$  – общая длина трубопровода;  $\omega$  – скорость движения жидкости или пара по трубопроводу;  $M$  – расход жидкости или пара;  $S$  – площадь сечения трубопровода;  $\rho$  – плотность жидкости или пара;  $n = \frac{c_p}{c_v}$  – коэффициент, учитывающий соотношение

между изобарной теплоемкостью  $c_p$  вещества и его изохорной теплоемкостью  $c_v$ .

Для жидкостей справедливо следующее равенство:

$$c_p = c_v. \quad (3.97)$$

Для пара выполняется соотношение:

$$c_p = c_v + R, \quad (3.98)$$

где  $R = 461 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  – газовая постоянная пара, и постоянная  $n$  может быть определена из следующего соотношения:

$$n = \frac{c_p}{c_p - R}. \quad (3.99)$$

Тогда выражение для вычисления постоянной времени  $T$  принимает вид:

$$T = \frac{c_p}{c_p - R} \cdot \frac{L\pi D^2 \rho}{4M}. \quad (3.100)$$

где  $D$  – диаметр условного прохода трубопровода.

Для моделирования динамических процессов движения жидкости и пара по трубам были получены следующие передаточные функции.

1. Передаточная функция участка трубопровода для подачи пара в пароперегреватель печи подогрева сырья:

$$W_{pnn2}(s) = \frac{1}{3,1s + 1}, \quad (3.101)$$

постоянная времени которой рассчитана по соотношению (3.100) на основе исходных данных, приведенных в таблице 3.3 для длины трубопровода  $L=7 \text{ м}$ .

Таблица 3.3. Исходные данные для расчета постоянных времени передаточных функций (3.101) и (3.102)

Наименование/обозначение параметра	Значение параметра
Температура перегретого пара, $t$	$300^\circ\text{C}$
Расход перегретого пара, $M$	$2 \text{ кг/с}$
Плотность перегретого пара, $\rho$	$46,25 \text{ кг/м}^3$
Теплоемкость перегретого пара, $c_p$	$6136,67 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$
Диаметр трубопровода, $D$	$0,15 \text{ м}$

2. Передаточная функция участка трубопровода для подачи перегретого пара в змеевики с мазутом печи:

$$W_{pнз}(s) = \frac{1}{3,5s + 1}, \quad (3.102)$$

постоянная времени которой рассчитана по соотношению (3.100) на основе исходных данных, приведенных в табл. 3.3, для длины трубопровода  $L = 5$  м.

3. Передаточная функция участка трубопровода для подачи мазута в печь подогрева сырья:

$$W_{pГ}(s) = \frac{1}{16s + 1}, \quad (3.103)$$

постоянная времени которой рассчитана по соотношению (3.100) на основе исходных данных, приведенных в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Исходные данные для расчета постоянной времени передаточной функции (3.103)

Наименование/обозначение параметра	Значение параметра
Температура пара, $t$	100°C
Расход пара, $M$	1,25 кг/с
Плотность пара, $\rho$	850 кг/м <sup>3</sup>
Длина трубопровода, $L$	3 м
Диаметр трубопровода, $D$	0,1 м

4. Передаточная функция участка трубопровода для подачи пара в вакуумную колонну

$$W_{pнл}(s) = \frac{1}{22,7s + 1}, \quad (3.104)$$

постоянная времени которой рассчитана по соотношению (3.100) на основе исходных данных, приведенных в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Исходные данные для расчета постоянной времени передаточной функции (3.104)

Наименование/обозначение параметра	Значение параметра
Температура пара, $t$	330°C
Расход пара, $M$	0,56 кг/с
Теплоемкость пара, $c_p$	125,413 кДж/кг·°C
Плотность пара, $\rho$	201,7 кг/м <sup>3</sup>
Длина участка трубопровода, $L$	2 м
Диаметр трубы, $D$	0,2 м

5. Передаточная функция участка трубопровода для подачи мазута в печь подогрева сырья:

$$W_{pm}(s) = \frac{1}{14,21s + 1}, \quad (3.105)$$

постоянная времени которой рассчитана по соотношению (3.100) на основе исходных данных, приведенных в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Исходные данные для расчета постоянной времени передаточной функции (3.105)

Наименование/обозначение параметра	Значение параметра
Температура мазута, $t$	330°C
Расход мазута, $M$	18 кг/с
Плотность мазута, $\rho$	815 кг/м <sup>3</sup>
Длина участка трубопровода, $L$	10 м
Диаметр трубы, $D$	0,2 м

### Выводы по третьей главе:

1. В рамках общего подхода, предложенного в диссертационном исследовании, проведен анализ динамики объектов регулирования САУ подогревом сырья установки АВТ и синтез математических моделей локальных САР в форме передаточных функций по рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий.

2. Рассмотрена типовая функциональная схема вакуумного блока установки АВТ, одной из основных технологических единиц которой является печь подогрева сырья, предназначенная для нагревания мазута с целью получения вакуумного газойля.

3. Рассмотрена многоконтурная САУ процессом подогрева сырья, основной задачей которой является регулирование температуры мазута на выходе из печи, а основными возмущениями, для компенсации которых предназначена САУ, являются температура мазута на входе в печь, расход мазута в вакуумную колонну и расход перегретого пара на входе в змеевики печи.

4. Рассмотрено математическое описание объектов управления локальных САУ, полученное на основе: уравнения энергетического баланса, составленного для потока мазута в трубопроводе и линеаризованного в области начального установившегося состояния, соответствующего начальным значениям температуры мазута, его массового расхода и плотности теплового потока; уравнения энергетического баланса для элементарного слоя стенки трубы, дополненного уравнением Фурье и линеаризованного в области установившихся значений, поступающего на единичную площадь рассматриваемого слоя теплового потока и температуры стенки; уравнений, описывающих процессы теплопередачи на граничных поверхностях стенки трубопровода.

5. После перехода к безразмерным единицам, применения преобразования Лапласа и операций упрощения указанные уравнения позволяют получить структурное представление объектов регулирования локальных САУ по каналам «изменение тепловой мощности печи - изменение температуры мазута на выходе из печи»; «изменение расхода на входе - изменение температуры мазута на выходе из печи» в виде последовательного соединения звеньев второго порядка, описываемых дробно-рациональными передаточными функциями, со звеньями запаздывания.

6. Для математического описания процессов движения жидкости и пара по трубопроводу, обладающих существенно меньшей инерционностью по сравнению с другими технологическими процессами, протекающими в вакуумном блоке установки АВТ, использовались апериодические звенья первого порядка, которыми представлены следующие передаточные функции

- 1) передаточная функция участка трубопровода для подачи пара в пароперегреватель печи подогрева сырья;
- 2) передаточная функция участка трубопровода для подачи перегретого пара в змеевики с мазутом печи;
- 3) передаточная функция участка трубопровода для подачи мазута в печь подогрева сырья;
- 4) передаточная функция участка трубопровода для подачи пара в вакуумную колонну.

Полученное математическое описание ориентировано на использование в дальнейшем в оптимизационных процедурах при решении задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ процессом подогрева сырья (глава 4).

## **4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ КАСКАДНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

### **4.1 Обоснование выбранного подхода**

Эффективность внедрения систем и устройств автоматического управления зависит не только от степени оснащения ими производства, но и в значительной мере определяется качеством их наладки, в том числе, выбором оптимальных параметров настройки систем. На этапе решения задачи синтеза САУ определяется эффективная структура системы автоматического управления и выбор алгоритма управления, поиск оптимальных значений параметров настройки регуляторов осуществляется на этапе параметрической оптимизации системы.

Замкнутые динамические САУ с обратными связями, могут при неправильном выборе алгоритма функционирования регулятора или неправильном выборе его параметров настройки потерять устойчивость. Поэтому вопрос обеспечения определенного запаса устойчивости САУ с обратной связью является одним из наиболее значимых.

В широко распространенном случае, когда оптимальные параметры настройки определяются из условия достижения средней квадратичной ошибкой регулирования своего минимального значения, не возникает потери устойчивости, однако, переходные процессы в такой системе часто имеют характер затухающих колебаний, интенсивность затухания которых оказывается явно недостаточной для того, чтобы систему можно было признать пригодной к эксплуатации. Следовательно, минимум интегральной ошибки регулирования не может быть основным или, по крайней мере, единственным показателем качества работы САУ.

Значения параметров передаточных функций объектов регулирования определены всегда с некоторым допущением и не могут считаться неизменными в процессе эксплуатации объекта ввиду наличия большого числа неучтенных внешних и внутренних факторов воздействия на систему. В то же время САУ должна сохранять устойчивость и обеспечивать приемлемые показатели качества регулирования в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо обеспечить определенную степень инвариантности системы к

изменениям параметров объекта регулирования и внешних воздействий, т.е. ее робастность (грубость).

Таким образом, основными задачами параметрического синтеза и оптимизации САУ наряду с выбором типа регулятора является выбор таких его настроек, которые обеспечивают экстремум заданного критерия качества регулирования при условии устойчивости и робастности САУ.

Для случаев многоконтурных (многосвязных) САУ вероятность потери устойчивости при неверном выборе параметров настройки регулятора одного из контуров управления существенно возрастает. Кроме того, практически сложно обеспечить одновременное достижение минимума среднего квадратического отклонения регулируемых величин для всех контуров управления, ввиду чего указанный критерий качества окончательно теряет свою актуальность. С другой стороны появляется необходимость существенно снизить взаимное влияние локальных контуров регулирования друг на друга.

Обеспечение максимальной степени инвариантности локальных контуров регулирования по отношению друг к другу и к внешним возмущениям может рассматриваться в качестве основного критерия оптимальности в задачах параметрического синтеза многоконтурных САУ, с учетом дополнительных требований по грубости системы регулирования в целом, а также возможности учета дополнительных требований по качеству переходных процессов.

Любую автоматическую систему управления можно исследовать как во временной, так и в частотной областях. При этом расчеты САУ в частотной области, как правило, менее трудоемки. Поэтому частотные методы анализа и синтеза систем управления нашли в теории автоматического управления чрезвычайно широкое применение. Одним из таких методов является расчет оптимальных параметров настройки по расширенным частотным характеристикам или по максимуму амплитудно-частотных характеристик.

Применение указанных методов для решения задач синтеза одноконтурных САУ отличается простотой, наглядностью и удобством инженерной интерпретации, однако, встречает существенные сложности при проектировании регуляторов в условиях ограниченной неопределенности характеристик объектов управления и в целях синтеза многоконтурных САУ.

Для эффективного решения задач синтеза многоконтурных САУ в условиях неопределенности характеристик объектов управления возможно использовать равномерно-частотные показатели в форме  $H^\infty$ - норм  $\|\cdot\|_\infty$  частотных характеристик, которые помимо количественной оценки качества работы САУ, могут быть взяты за основу при формировании критериев оптимальности, а также при анализе условий устойчивости и робастности системы.

Многие важные задачи аналитического конструирования линейных систем автоматического управления (САУ) могут быть сведены к задаче минимизации максимума амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы от внешнего входа к внешнему выходу на множестве стабилизирующих регуляторов (стандартная задача). Это позволяет получить новые эффективные решения основных задач синтеза в их современной постановке [63]. В частности, используя специальные формы условий робастной устойчивости и качества замкнутых САУ с неструктурированными неопределенностями характеристик объекта управления в [63] формулируются задачи минимизации реактивности САУ по отношению к возмущающим воздействиям при заданных ограничениях на степень грубости.

Таким образом, постановка задачи параметрического синтеза и оптимизации многоконтурных каскадных систем из условия минимизации реактивности САУ по отношению к внешним возмущающим воздействиям с учетом возможности дополнительных требований по качеству переходных процессов, формулируемых в виде заданных ограничений на максимумы амплитудно-частотных характеристик локальных замкнутых контуров синтезируемой САУ, представляется обоснованной и актуальной.

#### **4.2 Постановка задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных САУ**

Наиболее распространенные в инженерной практике оптимизационные задачи параметрического синтеза сводятся к выбору и настройке типовых регуляторов, не менее 90% которых реализуют известные П-, ПИ- или ПИД- законы регулирования. Таким образом, большинство инженерных задач параметрической оптимизации САУ сводятся к выбору оптимальных параметров настройки типовых П-, ПИ- или ПИД- регуляторов

применительно к конкретным объектам управления при обеспечении требований, предъявляемых к качественным показателям работы системы.

Рассмотрим широко распространенную на практике задачу параметрического синтеза и оптимизации типовых регуляторов в многоконтурной каскадной системе управления, которая сводится к выбору оптимальных параметров настройки регуляторов при обеспечении технологических требований к качественным показателям переходных процессов в САУ.

Многоконтурная каскадная система управления (рисунок 4.1), включающая  $n$  контуров, может быть описана системой операторных уравнений вида:

$$\begin{cases} z_i(s) = W_{ui}(s) \cdot u_i(s) + W_{fi}(s) \cdot f_i(s) \\ u_i(s) = W_{pi}(s, \Delta_i) \cdot (u_{i+1}(s) - z_i(s)), i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $z_i(s)$  — управляемая переменная  $i$ -го контура;  $W_{ui}(s)$  и  $W_{fi}(s)$  — правильные рациональные передаточные функции объекта управления  $i$ -го контура по каналам управляющего и возмущающего воздействий  $u_i(s)$  и  $f_i(s)$ , соответственно.

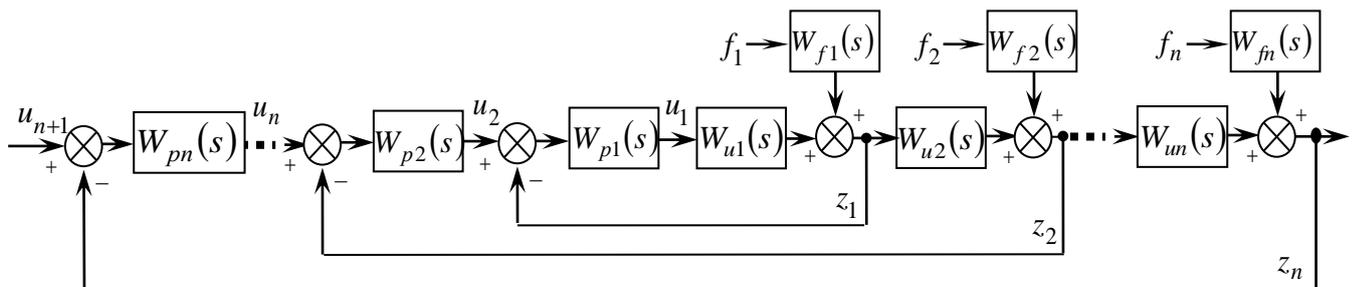


Рисунок 4.1 - Структурная схема многоконтурной каскадной САУ

Передаточная функция  $W_{ui}(s)$  может быть определена в зависимости от заданных номинальных передаточных функций системы согласно следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} W_{u1}(s) &= C_1(s) e^{-s\tau_1} / D_1(s); \\ W_{ui}(s) &= \frac{W_{p(i-1)}(s) \cdot W_{u(i-1)}(s)}{1 + W_{p(i-1)}(s) \cdot W_{u(i-1)}(s)} = C_i(s) / D_i(s), i = \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Передаточная функция  $W_{fi}(s)$  может содержать любую необходимую информацию о спектральном составе возмущения, которое обязательно должно иметь низкочастотный характер, и может быть представлена в виде:

$$W_{fi}(s) = M_i(s) / N_i(s). \quad (4.3)$$

Здесь  $C_i(s), D_i(s), M_i(s), N_i(s)$  представляют собой заданные рациональные полиномы.

Ограничимся рассмотрением классом регуляторов, передаточные функции которых  $W_{pi}(s, \Delta_i), i = \overline{1, n}$  могут быть заданы в следующей общей типовой дробно-рациональной форме:

$$W_{pi}(s, \Delta_i) = \frac{\sum_{j=1}^{r_i} \Delta_{ij} \cdot s^{j-1}}{s^{m_i} \cdot \left( 1 + \sum_{j=r+1}^{k_i} \Delta_{ij} \cdot s^{j-r} \right)}, m_i \geq 0, r_i \geq 1, k_i \geq r_i, \quad (4.4)$$

где  $\Delta_i = (\Delta_{ij}), j = \overline{1, k_i}$  - искомый вектор неизвестных параметров настройки регулятора  $i$ -го контура.

Во многих распространенных на практике случаях [7, 64] в условиях отсутствия полной информации о частотном спектре возмущений, имеющих ограниченную дисперсию, для оценки реакции системы на внешнее воздействие целесообразно выбрать максимальное значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы по рассматриваемому каналу действия возмущения. Таким образом, в роли критерия оптимизации  $i$ -го локального контура регулирования  $I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{fzi}(i\omega, \Delta_i)|$  может выступать максимум АЧХ рассматриваемого контура по каналу возмущающего воздействия, имеющего передаточную функцию  $W_{fzi}(s, \Delta_i)$ .

В результате задача параметрического синтеза и оптимизации каскадной системы сводится к поиску  $n$  векторов параметров  $\Delta_i = (\Delta_{ij}), j = \overline{1, k_i}; i = \overline{1, n}$ , настройки регуляторов, минимизирующих максимумы АЧХ всех контуров номинальной системы по каналам действия возмущений:

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{fzi}(i\omega, \Delta_i)| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}, i = \overline{1, n}, \quad (4.5)$$

где  $G_n$  - множество  $\Delta_i$ , обеспечивающее устойчивость  $i$ -го контура;  $W_{zfi}(i\omega, \Delta_i)$  – амплитудно-фазовая характеристика (АФХ)  $i$ -го контура по каналу действия возмущения, которая определяется как:

$$W_{zfi}(i\omega, \Delta_i) = \frac{W_{fi}(i\omega)}{1 + W_{ui}(i\omega) \cdot W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.6)$$

Согласно (4.6), минимаксный критерий оптимизации  $i$ -го контура записывается в виде:

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} \left| \frac{W_{fi}(i\omega)}{1 + W_{ui}(i\omega) \cdot W_{pi}(i\omega, \Delta_i)} \right| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.7)$$

В качестве требований к качеству переходного процесса в  $i$ -ом контуре целесообразно рассмотреть ограничение на максимальное значение амплитудно-частотной характеристики  $|W_{zui}(i\omega, \Delta_i)|$  рассматриваемого контура по каналу "управляющее воздействие - управляемая величина", определяемой как:

$$W_{zui}(i\omega, \Delta_i) = \frac{W_{ui}(i\omega) \cdot W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}{1 + W_{ui}(i\omega) \cdot W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.8)$$

Такое ограничение может быть сформулировано в виде следующего ограничения на показатель колебательности  $M_i$ , который представляет собой относительное максимальное значение АЧХ  $|W_{zui}(i\omega, \Delta_i)|$  на всей частотной оси:

$$F_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} \left| \frac{W_{ui}(i\omega) W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}{1 + W_{ui}(i\omega) \cdot W_{pi}(i\omega, \Delta_i)} \right| \leq M_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.9)$$

Тогда параметризованная задача оптимизации  $n$  контуров управления каскадной системы записывается в виде (4.7), (4.9); при этом задача параметрического синтеза  $i$ -го контура после задания конкретного выбора передаточной функции регулятора (4.4) в классе передаточных функций (4.4) приводится к стандартной задаче полубесконечной оптимизации:

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{zfi}(i\omega, \Delta_i)| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}. \quad (4.10)$$

$$F_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{zui}(i\omega, \Delta_i)| \leq M_i, \quad (4.11)$$

в которой требуется найти вектор оптимальных параметров  $\Delta_i = (\Delta_{ij})$ ,  $j = \overline{1, k_i}$  типового регулятора  $W_{pi}(s, \Delta_i)$ , обеспечивающего минимальную, согласно критерию (4.10), реакцию  $i$ -го контура на внешнее возмущающее воздействие в условиях необходимости выполнения условия (4.11), ограничивающего показатель колебательности переходных процессов оптимизируемого контура.

### 4.3 Решение задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных САУ на основе альтернансного метода

В данном разделе на базе альтернансного метода параметрической оптимизации разработан алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации многоконтурных каскадных систем управления, который позволяет обеспечить максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению к внешним возмущениям при заданных ограничениях на максимумы амплитудно-частотных характеристик замкнутых контуров синтезируемой системы.

Как было показано в разделе 4.2, для каждого локального  $i$ -го контура регулирования решение задачи параметрического синтеза и оптимизации проводится в два этапа, на первом из которых выбирается конкретная структура передаточной функции регулятора  $W_{pi}(s, \Delta_i)$  типа (4.4), а на втором - определяется вектор его параметров  $\Delta_i = (\Delta_{ij})$ ,  $j = \overline{1, k_i}$  с помощью решения задачи вида (4.10)-(4.11).

В общем случае, в соответствии с (4.4) выбор конкретного вида регулятора сводится к заданию параметров  $m_i \geq 0, r_i \geq 1, k_i \geq r_i$  передаточной функции регулятора  $W_{pi}(s, \Delta_i)$ . В рассматриваемых случаях при  $r_i \leq 3$  передаточная функция (4.4) определяет структуру типовых П-, ПИ- и ПИД- регуляторов, которые применяются в большинстве промышленных систем автоматического управления. При  $r_i = k_i = 2; s_i = 1$  в (4.4.)  $i$ -ый контур включает ПИ-регулятор; если в (4.4.) принять  $r_i = k_i = 3; s_i = 1$  в состав  $i$ -ого контура входит типовой ПИД-регулятор.

При выбранной передаточной функции регулятора  $W_{pi}(s, \Delta_i)$  задача (4.10)-(4.11) параметрического синтеза типовых регуляторов представляет собой задачу математического программирования, имеющую бесконечное число ограничений вида (4.11), которая может быть решена на базе альтернансного метода параметрической оптимизации [7, 8, 64].

Согласно данному методу, решение задачи (4.10)-(4.11), представляющее собой некоторый вектор параметров  $\Delta_i^{onm}$ , обладает специальными альтернансными свойствами, в соответствии с которыми на оси частот  $\omega \in [0; +\infty[$  существуют не менее  $R_{fi} \geq 1$  различных точек  $\omega_{fiq}$ ,  $q = \overline{1, R_{fi}}$  и  $R_{ui} \geq 1$  различных точек  $\omega_{uis}$ ,  $s = \overline{1, R_{ui}}$ , в которых частотные характеристики  $|W_{zfi}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$  и  $|W_{zui}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$  принимают свои максимальные значения, равные  $I_i(\Delta_i^{onm})$  и  $F_i(\Delta_i^{onm}) = M_i$ , соответственно; при этом выполняется условие:

$$R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1, \quad (4.12)$$

где  $k_i$  - число искомых параметров настройки регулятора  $W_{pi}(s, \Delta_i)$ .

Исключением является случай, когда  $R_{fi} = 1$  и (или)  $R_{ui} = 1$ , т.е. существует минимально возможное число точек на оси частот, в которых частотные характеристики  $|W_{zfi}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$  и  $|W_{zui}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$  принимают свои максимальные значения. Тогда выполняется следующее условие:

$$R_{fi} + R_{ui} < k_i + 1, \text{ если } k_i \geq 2. \quad (4.13)$$

В случае справедливости условия (4.12) на основе указанных альтернансных свойств можно записать систему  $k_i + 1$  уравнений для АЧХ  $|W_{zfi}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$  и  $|W_{zui}(i\omega, \Delta_i^{onm})|$ , которая является замкнутой относительно всех  $k_i + 1$  неизвестных параметров, а именно:  $k_i$  компонент  $\Delta_{ij}^{onm}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$  вектора  $\Delta_i^{onm}$  и значение минимаксного критерия  $I_i(\Delta_i^{onm})$ .

Если известна дополнительная информация о форме соответствующих АЧХ, данная система уравнений может быть дополнена условием существования экстремума указанных частотных характеристик в точках их максимумов, что позволяет записать следующую систему  $2(k_i + 1)$  уравнений:

$$\begin{cases} \left| W_{zfi} \left( i\omega_{fiq}^{onm}, \Delta_i^{onm} \right) - I_i \left( \Delta_i^{onm} \right) = 0; \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{zfi} \left( i\omega_{fiq}^{onm}, \Delta_i^{onm} \right) \right| = 0; \\ \left| W_{zui} \left( i\omega_{uis}^{onm}, \Delta_i^{onm} \right) - M_i = 0; \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{zui} \left( i\omega_{uis}^{onm}, \Delta_i^{onm} \right) \right| = 0; \\ q = \overline{1, R_{fi}}; s = \overline{1, R_{ui}}; R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1, \end{cases} \quad (4.14)$$

замкнутую относительно  $2(k_i + 1)$  неизвестных, включающих  $k_i$  параметров настроек регулятора  $\Delta_{ij}^{onm}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ ; величину минимакса  $I_i \left( \Delta_i^{onm} \right)$  и заранее неизвестные частоты  $\omega_{fiq}$ ,  $q = \overline{1, R_{fi}}$  и  $\omega_{uis}$ ,  $s = \overline{1, R_{ui}}$ .

Для типового случая, когда  $R_{fi} + R_{ui} = k_i < k_i + 1$ , дополнительное уравнение записывается из условия равенства нулю определителя, который составляется из производных по неизвестным параметрам настройки  $\Delta_{ij}^{onm}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$  амплитудно-частотных характеристик соответствующего контура по каналам действия управляющего и возмущающего воздействий [7, 63]:

$$\det \left[ \frac{\partial \left| W_{zui} \left( i\omega_{uis}^{onm}, \Delta_i^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{ij}}; \frac{\partial W_{zfi} \left( i\omega_{fiq}^{onm}, \Delta_{fis}^{onm} \right)}{\partial \Delta_{ij}} \right] = 0, \quad (4.15)$$

$$s = \overline{1, R_{ui}}; q = \overline{1, R_{fi}}; R_{ui} + R_{fi} = k_i; j = \overline{1, k_i}.$$

При выполнении условия (4.13) переходят к предварительному однозначному выбору комбинации величин  $R_{fi}$  и  $R_{ui}$ , которая допустима для данного варианта, что означает редукцию задачи к совместному решению системы уравнений вида (4.14), (4.15).

В случае оптимизации  $i$ -го контура с ПИ-регулятором число искоемых параметров настройки регулятора  $k_i = 2$ :  $\Delta_{i1}^{onm}$ ,  $\Delta_{i2}^{onm}$ . АЧХ контура с ПИ-регулятором могут иметь либо по одному экстремуму по обоим каналам, т.е.  $R_{fi} = R_{ui} = 1$  (рис. 4.2, а), либо один экстремум по каналу управления и два экстремума по каналу возмущения, т.е.

$R_{fi} = 2; R_{ui} = 1$  (рис. 4.2, б), либо два экстремума по каналу управления и один экстремум по каналу возмущения, т.е.  $R_{fi} = 1; R_{ui} = 2$  (рис. 4.2 в).

В первом случае имеет место исключение из свойства (4.12) и для поиска оптимальных параметров настройки регулятора необходимо решить систему (4.14) совместно с (4.15) для  $q = 1, s = 1$ . Во втором и третьем случаях реализуется вариант (4.12) и для нахождения вектора оптимальных параметров необходимо решить систему уравнений (4.14) для  $q = \overline{1,2}, s = 1$  или  $q = 1, s = \overline{1,2}$ .

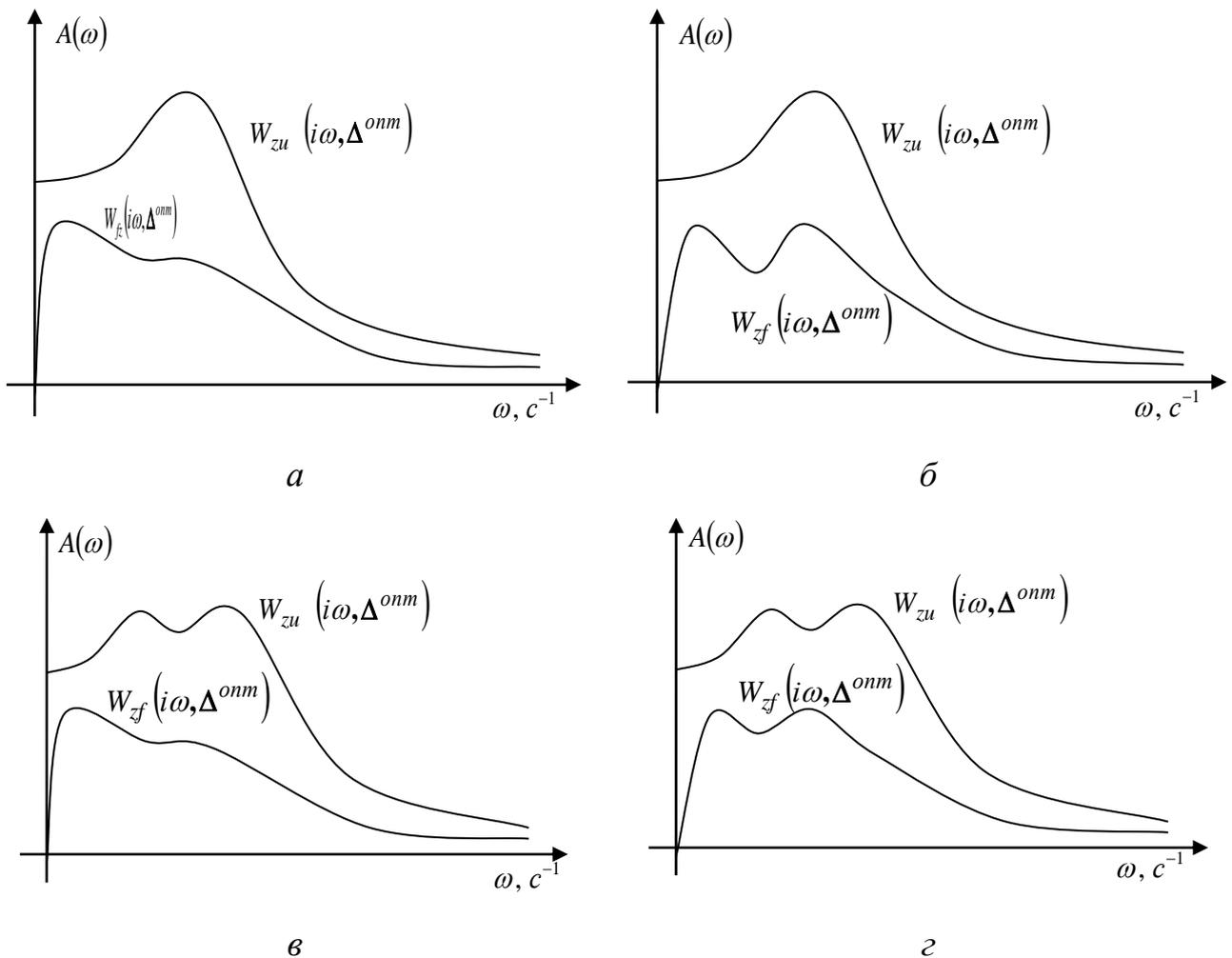


Рисунок 4.2 - Типовые формы амплитудно-частотных характеристик САР с ПИ- и ПИД-регуляторами

Для  $i$ -го контура с ПИД-регулятором число искомых параметров  $k_i=3$ :  $\Delta_{i1}^{\text{ОПТ}}$ ,  $\Delta_{i2}^{\text{ОПТ}}$  и  $\Delta_{i3}^{\text{ОПТ}}$ . В этом случае возможны следующие случаи для различных значений  $R_{fi}$  и  $R_{ui}$ :

- а)  $R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1$ , при  $R_{fi} = 2$  и  $R_{ui} = 2$  (рис. 4.2, з);
- б)  $R_{fi} + R_{ui} = k_i$ , при  $R_{fi} = 1$  и  $R_{ui} = 2$  (рис. 4.2, в);
- в)  $R_{fi} + R_{ui} = k_i$ , при  $R_{fi} = 2$  и  $R_{ui} = 1$  (рис. 4.2, б).

Оптимальное решение задачи параметрической оптимизации ПИД-регулятора является одновременно единственным решением системы уравнений, реализуемой для конкретного набора максимумов АЧХ, при этом другие два варианта систем уравнений не будут иметь решения. Таким образом, возникает необходимость проводить исследования для каждого из приведенных случаев и определять вектор параметров  $\Delta_{ij}^{\text{ОПТ}}$ ,  $j = \overline{1, 3}$ , являющийся единственным решением рассматриваемой задачи.

Для решения задачи параметрического синтеза и оптимизации многоконтурной каскадной САУ на базе альтернансного метода предлагается следующий алгоритм, определяющий последовательность и содержание стандартных вычислительных процедур поиска оптимальных параметров настройки регуляторов локальных контуров (рисунок 4.3).

1. На первом этапе решения задачи формулируются требования к качеству регулирования в частотной области в виде задания ограничений на показатели колебательности  $M_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  для всех локальных контуров регулирования.

2. На втором этапе выбирается структура и определяются оптимальные параметры настройки  $\Delta_{1j}^{\text{ОПТ}}$ ,  $j = \overline{1, k_1}$  типового регулятора локального контура  $i=1$  по описанной выше схеме альтернансного метода, исходя из требований обеспечения заданной степени колебательности первого контура по каналу задающего воздействия и минимизации реакции контура на внешнее нерегулируемое возмущающее воздействие  $f_1$ .

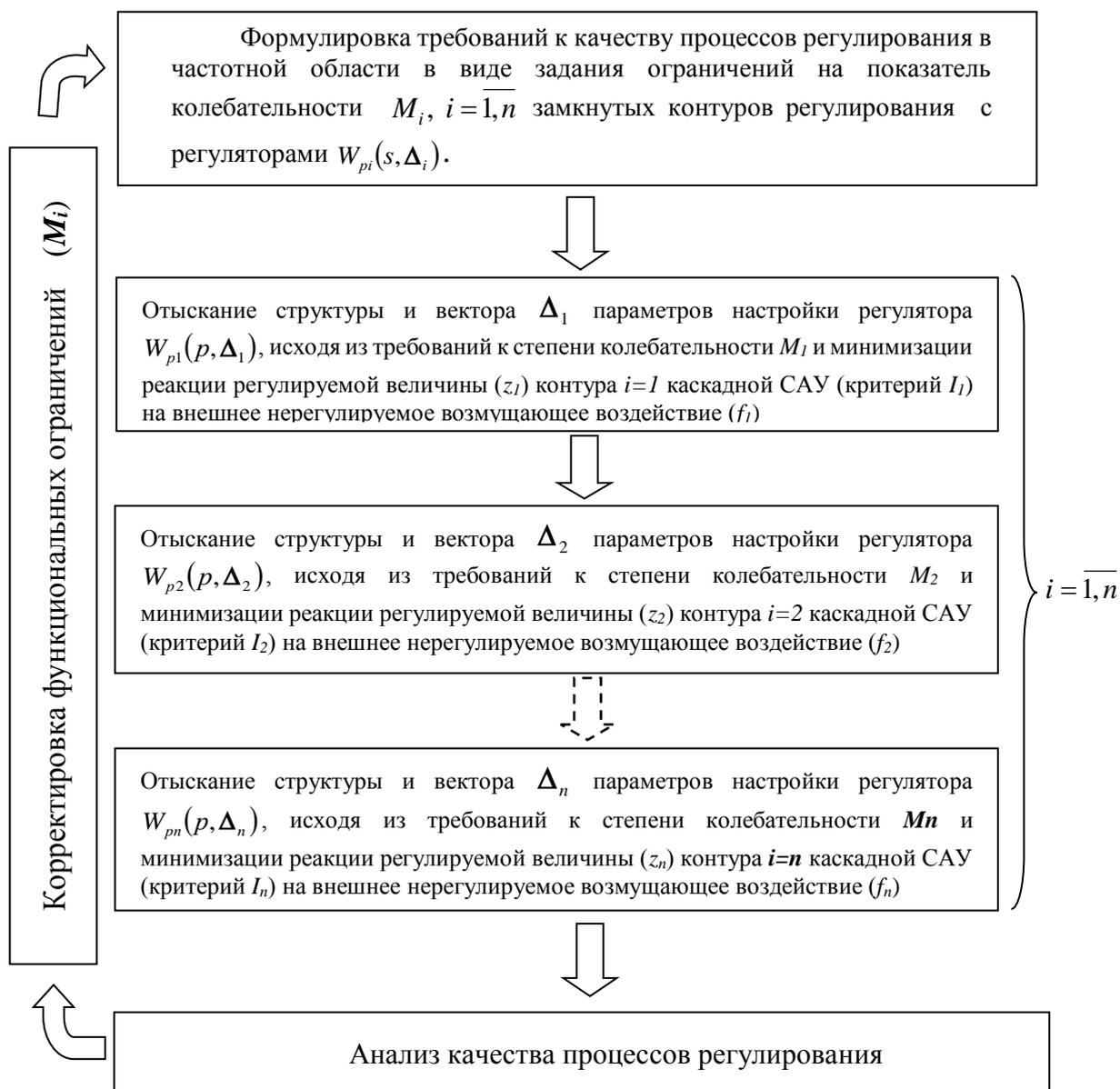


Рисунок 4.3 - Алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадной САУ

3. На каждом последующем этапе решается задача параметрического синтеза и оптимизации типового регулятора  $i$ -го контура управления ( $i = \overline{2, n}$ ), т.е. выбирается структура и определяются оптимальные параметры настройки  $\Delta_{ij}^{\text{опт}}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ ,  $i = \overline{2, n}$  типового регулятора по схеме альтернансного метода, исходя из требований обеспечения заданной степени колебательности  $M_i$  рассматриваемого контура по каналу задающего воздействия и минимизации реакции контура на внешнее нерегулируемое возмущающее

воздействие  $f_i$ . При этом структуры и оптимальные параметры настройки регуляторов  $\Delta_{lj}^{\text{опт}}$ ,  $j = \overline{1, k_l}$ ,  $l = \overline{1, i-1}$  контуров от 1-го до  $(i-1)$ -го включительно считаются известными и задаются согласно значениям, определенным на предыдущих этапах.

4. На заключительном этапе проводится оценка качества полученных переходных процессов системы и её устойчивости.

Во многих случаях динамика объектов управления описывается мультипликативными передаточными функциями, состоящими из апериодических звеньев первого и второго порядка и звеньев транспортного запаздывания, которые необходимо включить в рассмотрение (см. главу 3).

Для реализации предложенного алгоритма при наличии и отсутствии звеньев запаздывания в структуре объектов регулирования разработаны инженерные методики решения задач параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурных системах автоматического управления, которые в дальнейшем апробируются применительно к решению задачи оптимизации многоконтурной системы управления процессом подогрева сырья вакуумного блока установки АВТ.

#### **4.4 Параметрическая оптимизация многоконтурной САУ подогревом сырья**

Проведенный в главе 2 системный анализ многостадийного процесса первичной нефтепереработки выявил, что несмотря на достаточно высокий уровень автоматизации и качества управления процессом в целом, ряд взаимосвязанных параметров локальных САУ не соответствует установленным технологическим требованиям, что означает необходимость разработки решений по повышению эффективности управления и оптимизации параметров соответствующих многоконтурных систем управления.

Как показывают результаты системного анализа и основанного на применении DEA-метода сравнительного оценивания качественных показателей (глава 2, таблица 2.7), наихудшие обобщенные интегральные оценки качества процессов управления имеют локальные контуры регулирования температуры мазута на выходе из печи подогрева сырья, а также расходов мазута и перегретого пара в печь.

Таким образом, системный анализ качества управления многостадийным процессом нефтепереработки на действующих установках АВТ нефтеперерабатывающих заводов,

основанный на описанных в главе 2 методиках системного анализа и оценки эффективности управления, приводит к необходимости параметрической оптимизации типовых регуляторов многоконтурных САУ, что представляет собой отдельную актуальную инженерную задачу [31].

Решение задачи параметрической оптимизации типовых регуляторов многоконтурной САУ предлагается проводить с использованием описанного в разделах 4.1-4.3 алгоритма параметрического синтеза и оптимизации на базе альтернативного метода каскадных систем управления, что позволяет обеспечить достижение предельных показателей качества регулирования при заданных ограничениях, формируемых в частотной области с помощью соответствующих условий, наложенных на максимумы амплитудно-частотных характеристик локальных замкнутых контуров синтезируемой САУ.

С этой целью разработан алгоритм параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурных системах при отсутствии и наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования.

Применение разработанных алгоритмов обеспечивает максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению друг к другу и внешним возмущениям. Минимизация реакции системы на внешние возмущения рассматривается в качестве основного критерия оптимальности многоконтурной САУ с учетом дополнительных требований по грубости системы регулирования.

На примере системы автоматического управления процессом подогрева сырья вакуумного блока перегонки нефти установки АВТ апробируются разработанные алгоритмы решения задач параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов локальных контуров в многоконтурной системе при отсутствии и наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов.

#### **4.4.1 Анализ структуры САУ подогревом сырья**

Типовая САУ процессом подогрева сырья вакуумного блока установки АВТ является многоконтурной (многосвязной) системой с типовыми регуляторами, реализующими ПИ- или ПИД- законы регулирования в локальных контурах

Рассмотрим типовую структурную схему САУ подогрева сырья вакуумного блока перегонки нефти установки АВТ, представленную на рисунке 4.4.

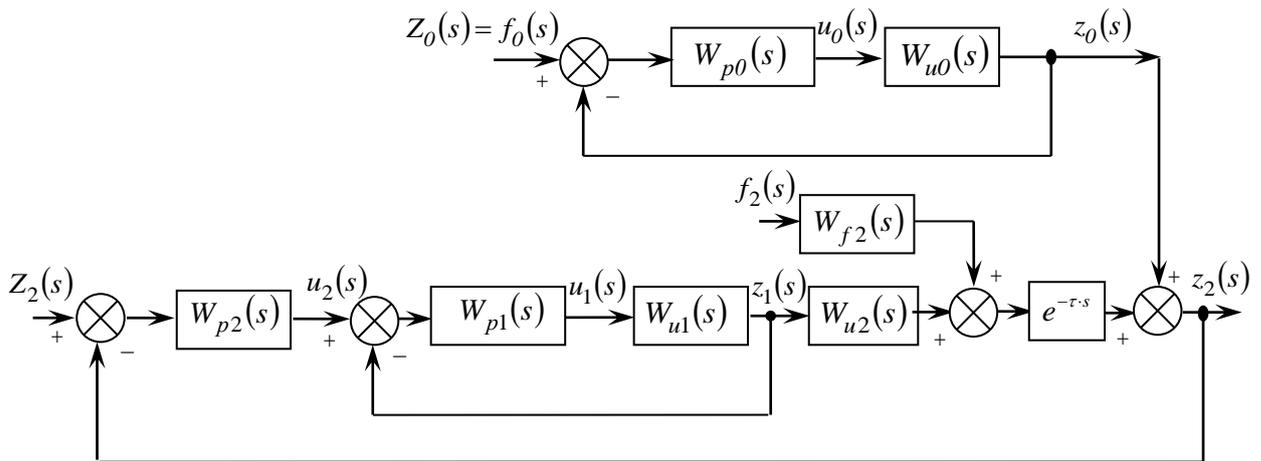


Рисунок 4.4 - Типовая структурная схема САУ подогревом сырья

Данная САУ представляет собой многоконтурную систему, состоящую из нескольких локальных систем автоматического регулирования (САР), представляющих типовые структуры:

1) каскадную систему регулирования с двумя контурами регулирования (регуляторы  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  и  $W_{p2}(s, \Delta_2)$ ) по температуре мазута на выходе из печи ( $z_2$ ) и изменению расхода мазута, подаваемого в печь ( $z_1$ );

2) одноконтурную систему регулирования (регулятор  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ) расхода пара в печь ( $z_0$ ).

Объектом регулирования внутреннего контура каскадной системы с передаточной функцией  $W_{u1}(s)$  является участок трубопровода, по которому топливо подается в печь. Передаточная функция объекта регулирования внешнего контура каскадной системы представляет собой линейную комбинацию передаточной функции замкнутого внутреннего контура и передаточной функции  $W_{u2}(s)$ , которая описывает изменение температуры объема сырья ( $z_2$ ), нагреваемого в печи, и может быть представлена апериодическим звеном второго порядка (глава 3).

На каскадную систему действуют внешние возмущения, к основным из которых можно отнести изменение расхода ( $f_2$ ) перегретого пара в печь и изменение расхода ( $f_0$ ) перерабатываемого сырья (мазута). При этом расход ( $z_0$ ) подаваемого в печь перегретого пара регулируется локальной одноконтурной САР (регулятор  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ), в которой

управляющим воздействием ( $u_0$ ) является изменение расхода пара в змеевики печи. Объект управления, описываемый передаточной функцией  $W_{u0}(s)$ , представляет собой участок паропровода, по которому пар подается в печь

В рассматриваемой структурной схеме САУ звено транспортного запаздывания отнесено к выходам объекта и фильтра помехи  $f_2$ .

Передаточные функции  $W_{u0}(s)$ ,  $W_{u1}(s)$ ,  $W_{u2}(s)$  были получены на этапе анализа и математического моделирования динамики объектов регулирования САУ (см. главу 3), на этом же этапе были определены значения постоянных коэффициентов передаточных функций, приведенных в таблице 4.3.

Как показано на структурной схеме САУ (рис. 4.4), каждый  $i$ -ый локальный контур в каскадной системе регулирования и контур регулирования расхода пара в печь характеризуются следующими величинами:  $z_i(s)$  - управляемая переменная,  $Z_i(s)$  - задающее воздействие,  $u_i(s)$  и  $f_i(s)$  - управляющее и возмущающее воздействия, соответственно, где  $i = \overline{0, 2}$ .

Передаточные функции регуляторов  $W_{pi}(s, \Delta_i)$ ,  $i = \overline{0, 2}$  считаются заданными с точностью до вектора параметров  $\Delta_i = (\Delta_{ij})$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ , и представимыми в типовой дробно-рациональной форме вида (4.4).

Амплитудно-фазовая характеристика внутреннего контура каскадной системы регулирования ( $i=1$ ), т.е. замкнутой системы регулирования расхода мазута, подаваемого в печь (канал  $Z_1 \equiv u_2(s) \rightarrow z_1(s)$ ) имеет вид:

$$W1_{zu}(i\omega, \Delta_1) = \frac{W_{u1}(i\omega) \cdot W_{p1}(i\omega, \Delta_1)}{1 + W_{u1}(i\omega) \cdot W_{p1}(i\omega, \Delta_1)}. \quad (4.16)$$

Амплитудно-фазовая характеристика внешнего контура каскадной системы регулирования ( $i=2$ ), т.е. замкнутой системы регулирования температуры мазута на выходе из печи (канал  $Z_2 \rightarrow z_2(s)$ ), имеет вид:

$$W2_{zu}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2) = \frac{W1_{zu}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2)}{1 + W1_{zu}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2)}. \quad (4.17)$$

Амплитудно-фазовая характеристика замкнутой системы регулирования расхода пара в печь по каналу  $Z_0 \rightarrow z_0(s)$  (контур регулирования  $i=0$ ) может быть записана следующим образом:

$$W_{0_{zu}}(i\omega, \Delta_0) = \frac{W_{u0}(i\omega) \cdot W_{p0}(i\omega, \Delta_0)}{1 + W_{u0}(i\omega) \cdot W_{p0}(i\omega, \Delta_0)}. \quad (4.18)$$

Для контура  $i=2$  амплитудно-фазовая характеристика системы по каналу внешнего возмущения  $f_2(s) \rightarrow z_2(s)$  принимает вид:

$$W_{2_{f2}}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2) = \frac{W_{f2}(i\omega)}{1 + W_{1_{zu}}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2)}. \quad (4.19)$$

Для контура  $i=2$  амплитудно-фазовая характеристика системы по каналу внешнего возмущения  $f_0(s) \rightarrow z_2(s)$  определяется согласно выражению:

$$W_{2_{f0}}(i\omega, \Delta_0, \Delta_1, \Delta_2) = \frac{W_{0_{zu}}(i\omega, \Delta_0)}{1 + W_{1_{zu}}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2)}. \quad (4.20)$$

#### 4.4.2 Решение задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья

В данном разделе предлагается алгоритм решения задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества многоконтурной САУ процессом подогрева сырья установки АВТ, структура которой подробно рассмотрена в разделе 4.4.1.

На первом этапе решения задачи параметрического синтеза определяются структуры регуляторов  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ,  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  и  $W_{p2}(s, \Delta_2)$ . Для всех контуров регулирования предлагается выбрать типовые ПИД-регуляторы с общей передаточной функцией типа (4.4) при  $r_i = 3$ ,  $m_i = 1$ ,  $k_i = 0$ :

$$W_{пид}(s, \Delta) = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 s + \Delta_3 s^2}{s}, \quad (4.21)$$

как обладающие наибольшими возможностями и универсальностью реализуемых законов управления.

Тогда на следующем этапе необходимо определить векторы параметров настройки  $\Delta_i = (\Delta_{ij}), j = \overline{1,3}, i = \overline{0,2}$  ПИД-регуляторов  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ,  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  и  $W_{p2}(s, \Delta_2)$ .

Как показано в разделах 4.2-4.3, задача параметрической оптимизации типовых регуляторов в структуре многоконтурной САУ сводится к задаче оптимизации по частотным критериям качества соответствующих параметров настройки ПИД-регуляторов  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ,  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  и  $W_{p2}(s, \Delta_2)$  с требованиями к качеству управления, сформулированными в виде ограничений на максимумы соответствующих амплитудно-частотных характеристик замкнутых локальных контуров.

Для решения задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ температурой мазута на основе общего алгоритма (рисунок 4.2) решения задачи параметрического синтеза и оптимизации каскадных САУ была разработана последовательность вычислительных процедур поиска оптимальных настроек типовых регуляторов локальных контуров (рисунок 4.5).

В последующих разделах предложенный алгоритм апробируется применительно к решению задачи параметрической оптимизации САУ подогревом сырья при наличии и при отсутствии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов регулирования.

4.4.2.1 Решение задачи при отсутствии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов

В данном разделе решается задача оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной САУ подогревом сырья при отсутствии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов регулирования.

Согласно разработанной методике, решение задачи можно разделить на следующие этапы:

1. Первый этап: параметрическая оптимизация внутреннего контура  $i=1$  каскадной системы

Первым этапом решения рассматриваемой задачи параметрической оптимизации является определение параметров настройки регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  внутреннего

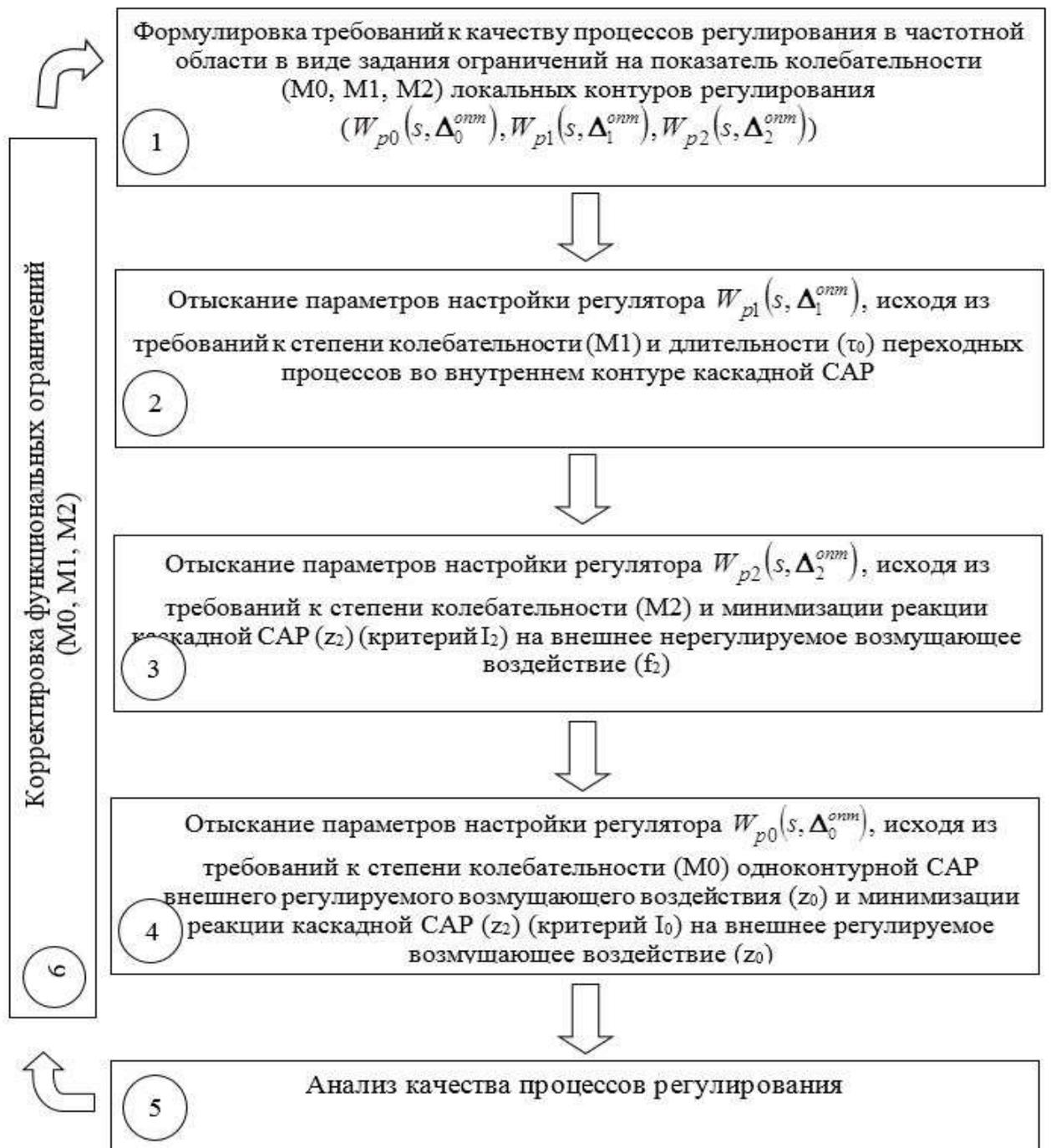


Рисунок 4.5 - Алгоритм решения задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья

контура регулирования каскадной САУ температурой мазута ( $i=1$ ), для которого не задан канал возмущающее воздействие - регулируемая величина.

Параметры настройки регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  для контура  $i=1$  могут быть определены различными методами, том числе, с использованием частотных характеристик. Эффективным подходом в такой ситуации может стать фиксация значения резонансной частоты ( $\omega_{us}$ ) АЧХ замкнутого контура  $|W1_{zu}(i\omega, \Delta_1)|$  по каналу задающего воздействия, где  $W1_{zu}(i\omega, \Delta_1)$  определяется согласно (4.16), и одного из параметров настройки регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1)$ . Тогда оставшиеся два неизвестных параметра настройки регулятора можно определить, решив систему уравнений, аналогичную системе (4.14). В случае, когда АЧХ системы по каналу задающего воздействия с ПИД-регулятором имеет единственный максимум, как показано на рисунке 4.2, б, расчетная система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\left| W1_{zu}(i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_1^{onm}) \right| - M = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W1_{zu}(i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_1^{onm}) \right| = 0, \quad (4.22)$$

с двумя неизвестными – любыми двумя из трех параметров настройки регулятора, где  $\left| W1_{zu}(i\omega, \Delta_1^{onm}) \right|$  – АЧХ системы при оптимальных значениях параметров настройки регулятора.

Предварительный выбор значений частоты  $\omega_{u1}$  может осуществляться из условия, что при значении показателя  $M = 1,1-1,5$  переходная характеристика имеет слабую колебательность с частотой, близкой к резонансной частоте  $\omega_p = \omega_{u1}$ .

Значение  $\omega_p$  позволяет приблизительно определить время достижения первого максимума  $\tau_m$ :

$$\tau_m \cong \frac{\pi}{\omega_p}. \quad (4.23)$$

Тогда длительность переходного процесса  $\tau_{nep}$  можно определить, предполагая, что за время  $\tau_{nep}$  в системе происходят 1–2 колебания:

$$\tau_{nep} \cong (1 \div 2) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p}. \quad (4.24)$$

Для передаточных функций, представленных в таблице 4.4, оптимальные параметры настройки ПИД-регулятора внутреннего контура  $i=1$ , полученные в

результате решения системы (4.22) для различных значений показателя колебательности  $M$ , приведены в таблице 4.1.

На рисунке 4.6 показан переходный процесс во внутреннем контуре  $i=1$  каскадной системы с оптимальными параметрами настройки регулятора для заданной резонансной частоты  $\omega_p = 0,5$  Гц, что позволяет обеспечить длительность переходного процесса  $\tau_{пер} \cong 20$  секунд при достижении первого максимума за время  $\tau_m \cong 5$  секунд. Переходный процесс соответствует АЧХ системы по каналу задания, представленной на рисунке 4.7.

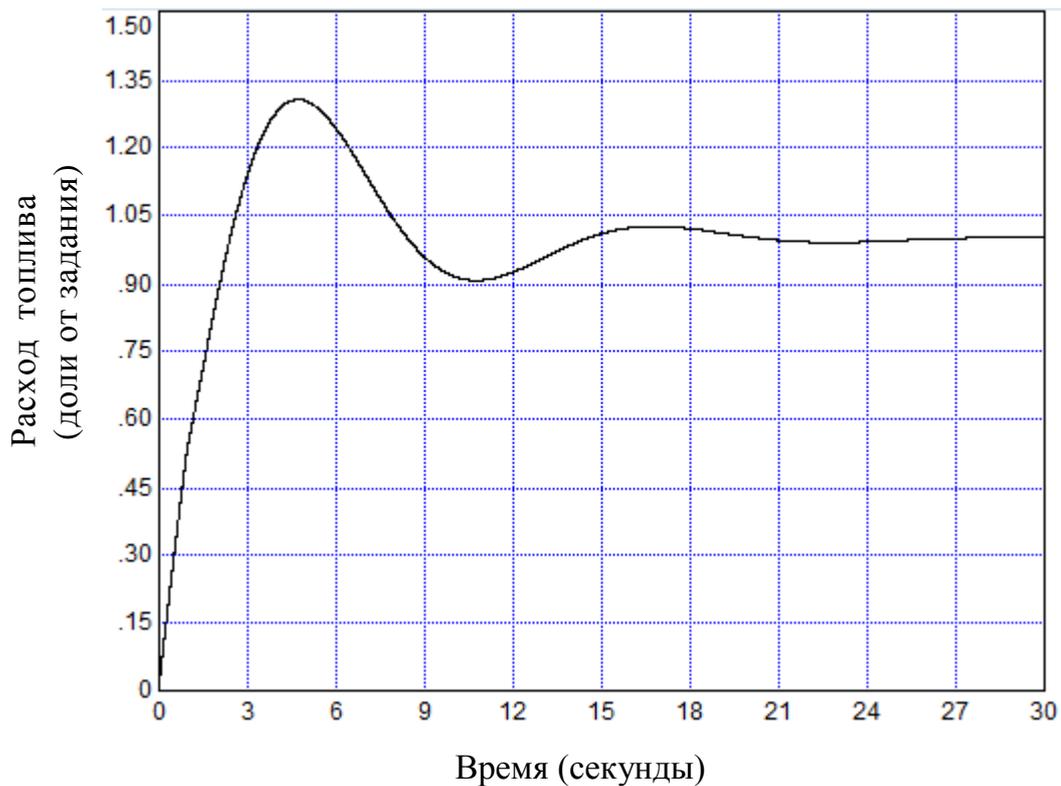


Рисунок 4.6 – Переходный процесс во внутреннем контуре  $i=1$  каскадной САУ температурой мазута

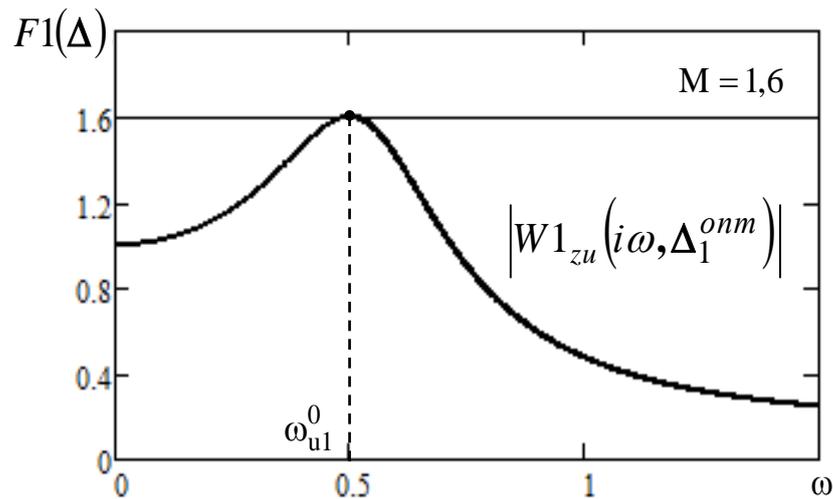


Рисунок 4.7 - АЧХ внутреннего контура регулирования ( $i=1$ ) каскадной САУ по каналу задания

Таблица 4.1. Результаты решения задачи параметрической оптимизации внутреннего контура  $i=1$  каскадной системы для объектов регулирования без запаздывания

$Ml$	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,5	1,6
$\Delta_{11}^{onm}$	15	15	15	10	10	10	10	10	6	6
$\Delta_{12}^{onm}$	48,8	30,6	22,3	16,5	13,8	11,9	10,42	9,29	7,27	6,23
$\Delta_{13}^{onm}$	2,44	10,88	17,18	6,83	9,07	10,9	12,4	13,6	1,94	2,82

2. Второй этап: параметрическая оптимизация внешнего контура  $i=2$  каскадной системы

Вторым этапом решения задачи параметрической оптимизации является настройка внешнего контура  $i=2$  каскадной системы, т.е. поиск вектора параметров настроек  $\Delta_2^{onm}$  регулятора  $W_{p2}(s, \Delta_2)$  из условия минимизации реакции САУ на возмущающее воздействие  $f_2$ . Решение осуществляется по описанной выше схеме альтернансного метода при фиксированных (полученных на этапе 1) оптимальных значениях параметров настройки  $\Delta_1^{onm}$  регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1^{onm})$ . При этом критерий оптимизации  $I2(\Delta_2)$  задается в виде функционала (4.10), минимизирующего максимум амплитудно-частотной характеристики  $|W2_{f2}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2)|$  контура по каналу действия

возмущения  $f_2$ , определяемой согласно (4.19), а ограничение  $F2(\Delta_2)$  вида (4.11) накладывается на максимум амплитудно-частотной характеристики  $|W2_{zu}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2)|$  контура по каналу задающего воздействия, определяемой согласно (4.17).

В данном случае указанные АЧХ внешнего контура каскадной системы с оптимальными параметрами настройки регулятора имеют по два равных максимума, что соответствует случаю, представленному на рис. 4.2 з, а расчетная система уравнений альтернансного метода (4.14) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} |W2_{zf2}(i\omega_{fq}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})| - I2(\Delta_2^{onm}) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} |W2_{zf2}(i\omega_{fq}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})| = 0; \\ |W2_{zu}(i\omega_{us}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})| - M2 = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} |W2_{zu}(i\omega_{us}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})| = 0; \quad (4.25) \\ q = \overline{1, R_f}; \quad s = \overline{1, R_u}; \quad R_f + R_u = n + 1, \quad R_f = R_u = 2 \end{aligned}$$

и решается относительно восьми неизвестных:  $n=3$  параметров  $\Delta_{2i}^{onm}$ ,  $i=\overline{1,3}$  настройки регулятора  $W_{p2}(s, \Delta_2)$ ; величины минимизируемого критерия  $I2(\Delta_2^{onm})$ ;  $R_f=2$  неизвестных значений частот  $\omega_{fq}^{onm}$ ,  $q = \overline{1, R_f}$ ;  $R_u=2$  неизвестных значений частот  $\omega_{us}^{onm}$ .

На рисунке 4.8 приведен вид АЧХ по каналам управления и возмущения внешнего контура  $i=2$  каскадной системы управления с регулятором  $W_{p2}(s, \Delta_2^{onm})$  с оптимальными настройками  $\Delta_2^{onm}$ , определенными по схеме альтернансного метода в результате решения системы (4.25).

АЧХ, представленные на рисунке 4.8, получены для передаточных функций, значения показателя колебательности  $M2$  и оптимальных параметров  $\Delta_2^{onm}$  настройки ПИД-регулятора, приведенных в таблице 4.4.

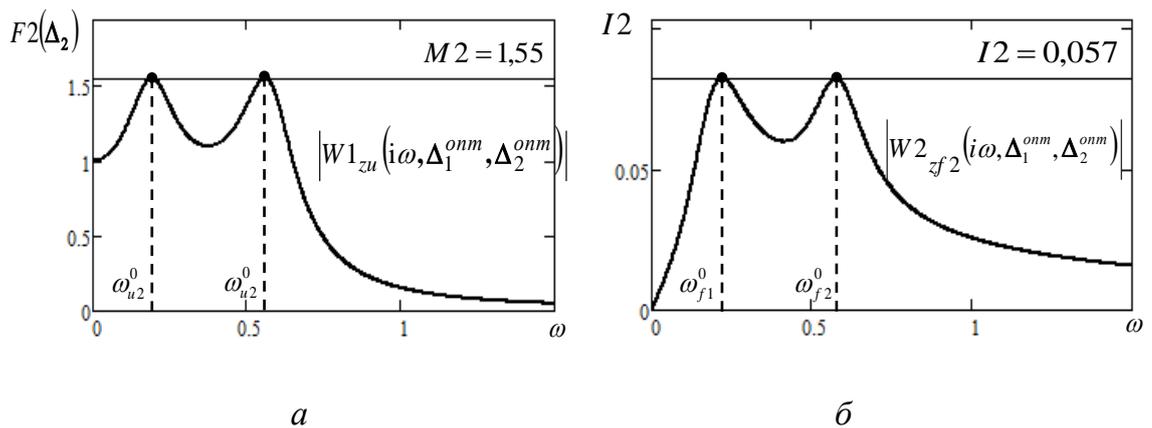


Рисунок 4.8 - АЧХ внешнего контура регулирования ( $i=2$ ) каскадной САУ по каналу задания ( $a$ ) и по каналу возмущения ( $b$ ) для объекта регулирования без транспортного запаздывания

Результаты решения задачи для различных заданных значений показателя колебательности  $M2$  внешнего контура представлены в таблице 4.2 и на рисунках 4.9-4.10. Все расчеты проведены для передаточных функций, приведенных в таблице 4.4.

Таблица 4.2. Результаты решения задачи параметрической оптимизации внешнего контура  $i=2$  каскадной системы для объектов регулирования без запаздывания

$M2$	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
$\Delta_{21}^{onm}$	0,118	0,144	0,171	0,198	0,226	0,254	0,282	0,311	0,340	0,369
$\Delta_{22}^{onm}$	1,421	1,467	1,511	1,554	1,595	1,634	1,671	1,708	1,742	1,776
$\Delta_{23}^{onm}$	3,711	3,824	3,938	4,052	4,167	4,282	4,398	4,514	4,630	4,746
$I2(\Delta_2^{onm})$	0,072	0,074	0,075	0,077	0,079	0,080	0,082	0,084	0,085	0,087

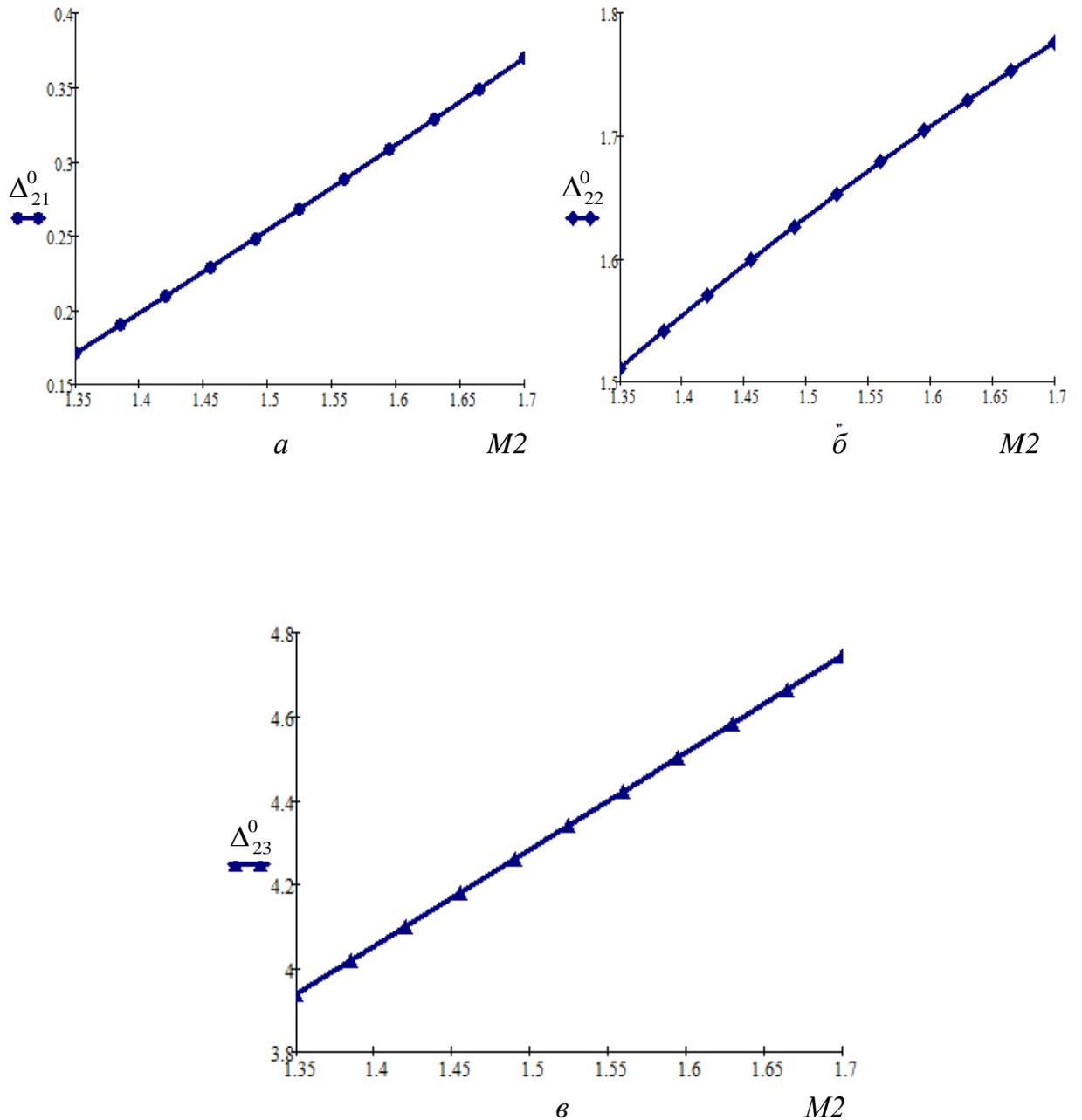


Рисунок 4.9 - Зависимости значений оптимальных параметров настройки регулятора внешнего контура  $i=2$  от величины показателя колебательности  $M2$  при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования:

$$a - \text{для } \Delta_{21}^{opt}; \tilde{b} - \text{для } \Delta_{22}^{opt}; v - \text{для } \Delta_{23}^{opt}$$

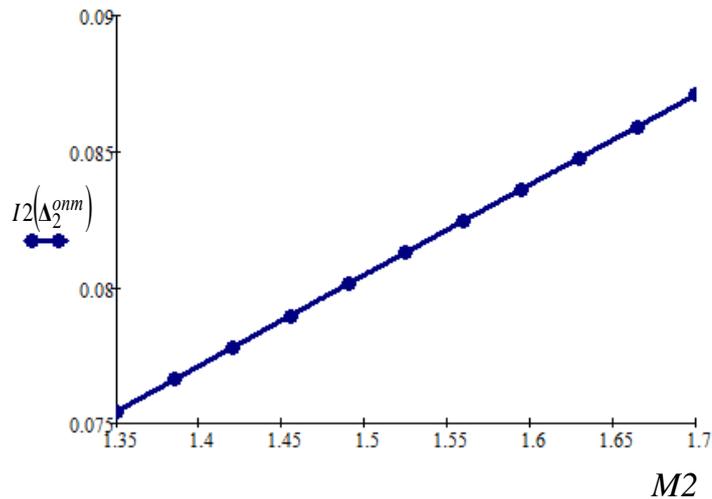


Рисунок 4.10 - Зависимость значения критерия оптимизации  $I2(\Delta_2^{onm})$  внешнего контура  $i=2$  от величины показателя колебательности  $M2$  при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

### 3. Третий этап: параметрическая оптимизация контура регулирования $i=0$ расхода пара в печь

На третьем этапе решения задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья определяется вектор  $\Delta_0^{onm}$  параметров настройки регулятора  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  локальной САУ расхода пара в печь.

Особенностью применения здесь описанной выше процедуры альтернативного метода является выбор в качестве критерия оптимальности  $IO(\Delta_0)$  максимума АЧХ каскадной САУ по каналу возмущения  $\left|W_{2zf0}(i\omega, \Delta_0, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})\right|$  определяемой по выражению (4.20)), для которой синтезируемый контур регулирования выступает в качестве внешнего контролируемого воздействия при заранее фиксированных оптимальных значениях параметров настройки локальных регуляторов каскадной системы  $\Delta_1^{onm}$  и  $\Delta_2^{onm}$ , найденных на этапах 1 и 2. Ограничение  $F0(\Delta_0)$  задается аналогично предыдущему случаю, т.е. оно лимитирует максимум АЧХ оптимизируемого контура  $i=0$  по каналу управляющего воздействия  $\left|W_{0zu}(i\omega_{us}^{onm}, \Delta_0^{onm})\right|$ , определяемой согласно выражению (4.18).

Поскольку в данном случае в качестве минимизируемого функционала  $I0(\Delta_0)$  выступает максимум АЧХ внешнего контура  $i=2$  по каналу возмущения  $f_0$ , а не максимум АЧХ контура  $i=0$ , содержащего регулятор  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ , искомый вектор параметров  $\Delta_0^{onm}$  настроек регулятора  $W_{p0}$  позволяет скорректировать частотные свойства замкнутой САУ расхода пара в печь в условиях заданных ограничений на ее показатель колебательности  $M0$ , исходя из условия минимизации влияния по каналу «возмущающее воздействие - регулируемая величина» на каскадную САУ.

АЧХ системы управления по каналу возмущения  $f_0$  имеет два равных максимума, следовательно, расчетная система семи уравнений, построенная на основе альтернансного метода, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} |W2_{zf0}(i\omega_{fq}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm}) - I0(\Delta_0^{onm})| = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} |W2_{zf0}(i\omega_{fq}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})| = 0; \\ |W0_{zu}(i\omega_{us}^{onm}, \Delta_0^{onm}) - M0| = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} |W0_{zu}(i\omega_{us}^{onm}, \Delta_0^{onm})| = 0; \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$q = \overline{1, R_f}; \quad S = \overline{1, R_u}; \quad R_f + R_u = n, \quad R_f = 2, R_u = 1.$$

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{\partial |W0_{zu}(i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_0^{onm})|}{\partial \Delta_{01}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{01}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f2}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{01}} \\ \frac{\partial |W0_{zu}(i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_0^{onm})|}{\partial \Delta_{02}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{202}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f2}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{02}} \\ \frac{\partial |W0_{zu}(i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_0^{onm})|}{\partial \Delta_{03}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{03}}; \frac{\partial W2_{zf0}(i\omega_{f2}^{onm}, \Delta_0^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm})}{\partial \Delta_{03}} \end{array} \right] = 0. \quad (4.27)$$

Система (4.26)-(4.27) может быть решена относительно семи неизвестных:  $n=3$  оптимальных параметров настройки регулятора  $\Delta_{0i}^{onm}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ; величины критерия оптимальности  $I0(\Delta_0^{onm})$ ;  $R_f=2$  неизвестных значений частот  $\omega_{fq}^{onm}$ ,  $q = \overline{1, 2}$  и неизвестного значения частоты  $\omega_{u1}^{onm}$ .

На рисунке 4.11, *а* показана АЧХ по каналу задания контура управления с регулятором  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  с оптимальными настройками  $\Delta_0^{opt}$ , найденными в результате решения системы (4.25)-(4.26). Как видно из рисунка, данная АЧХ имеет один максимум, равный величине ограничения на показатель колебательности  $M0$ .

На рисунке 4.11, *б* показана АЧХ внешнего контура с регулятором  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  по каналу задания с оптимальными настройками  $\Delta_0^{opt}$ , найденными в результате решения системы (4.26)-(4.27).

Результаты решения задачи параметрической оптимизации САР расхода пара в печь, полученные для различных значений показателя колебательности  $M0$ , представлены в таблице 4.3 и на рисунках 4.12-4.13. Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.4.

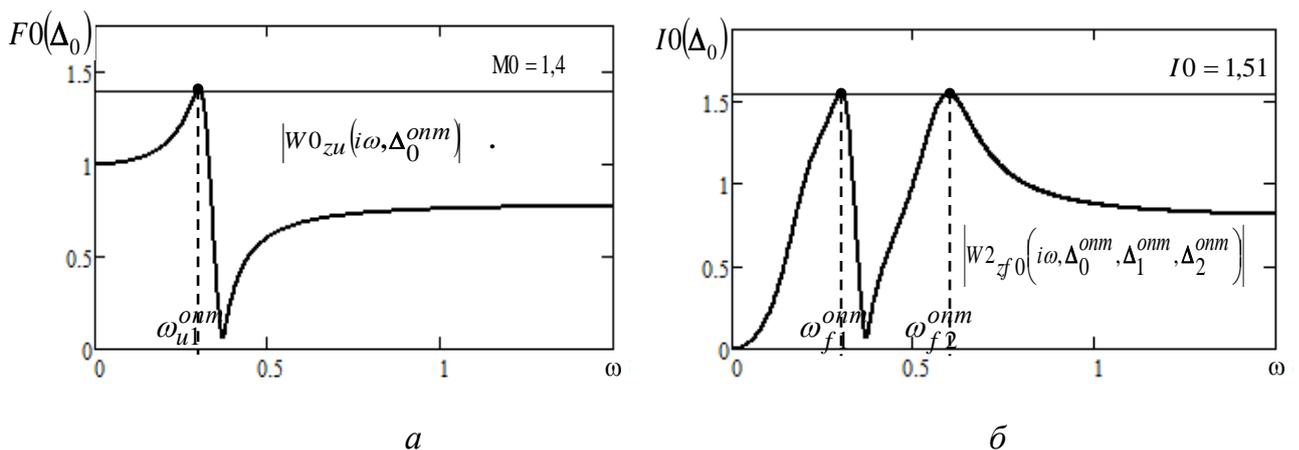


Рисунок 4.11 - АЧХ замкнутого контура регулирования ( $i=0$ ) по каналу задания (*а*) и АЧХ внешнего контура  $i=2$  каскадной системы по каналу возмущения  $f0$  (*б*) при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

Таблица 4.3. Результаты решения задачи параметрической оптимизации локального контура  $i=0$  регулирования расхода пара в печь при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

$MO$	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
$\Delta_{01}^{onm}$	1,776	1,760	1,778	1,816	1,897	1,967	2,130	2,302	2,546	2,864
$\Delta_{02}^{onm}$	0,474	0,316	0,198	0,105	0,033	-0,034	-0,081	-0,126	-0,164	-0,197
$\Delta_{03}^{onm}$	10,953	11,530	12,274	13,173	14,330	15,609	17,401	19,499	22,216	25,727
$IO(\Delta_0^{onm})$	1,377	1,432	1,488	1,542	1,598	1,652	1,708	1,763	1,818	1,873

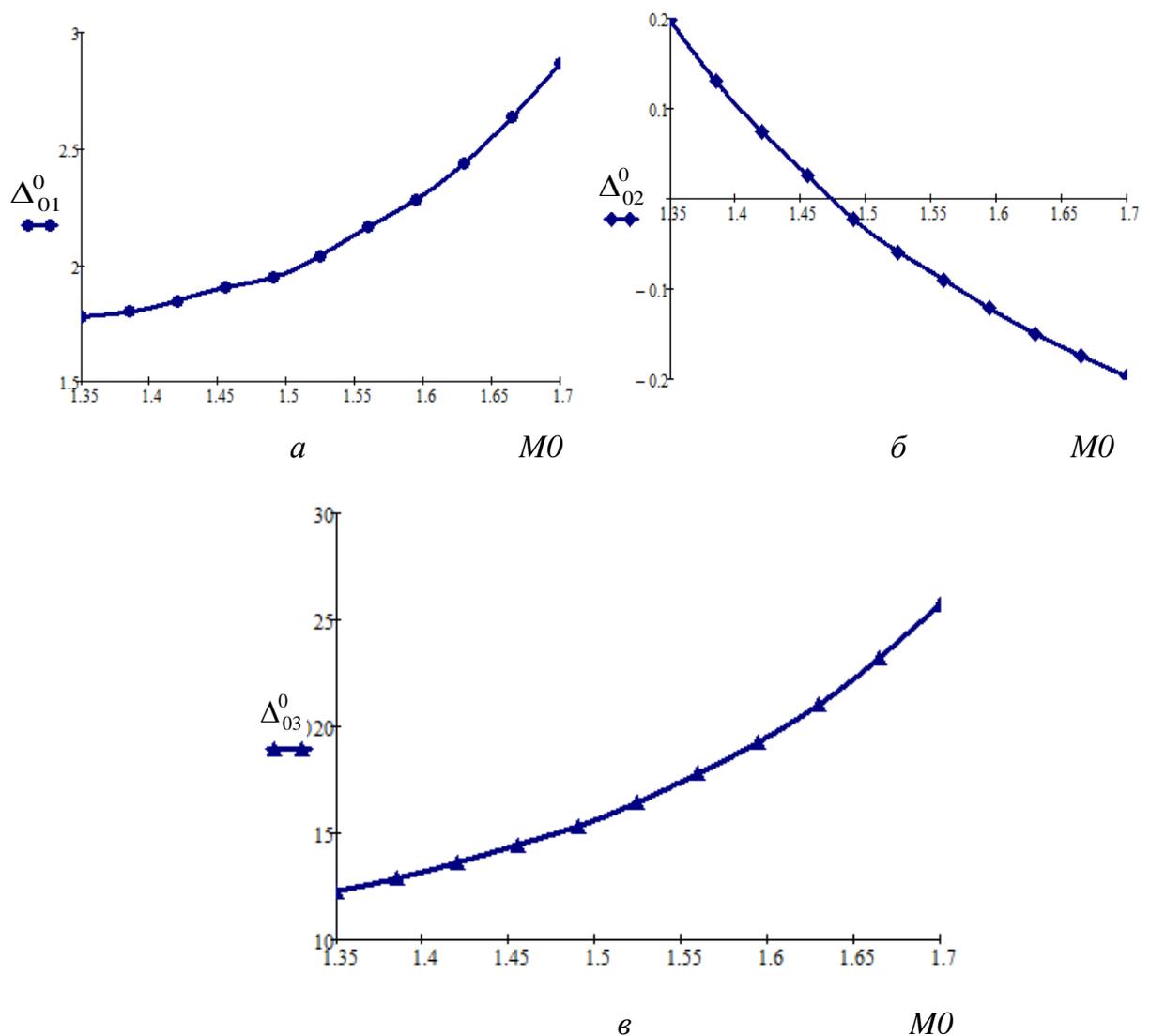


Рисунок 4.12 - Зависимости значений оптимальных параметров настройки регулятора контура  $i=0$  от величины показателя колебательности  $MO$  при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования:

$a$  - для  $\Delta_{01}^{onm}$ ;  $b$  - для  $\Delta_{02}^{onm}$ ;  $c$  - для  $\Delta_{03}^{onm}$

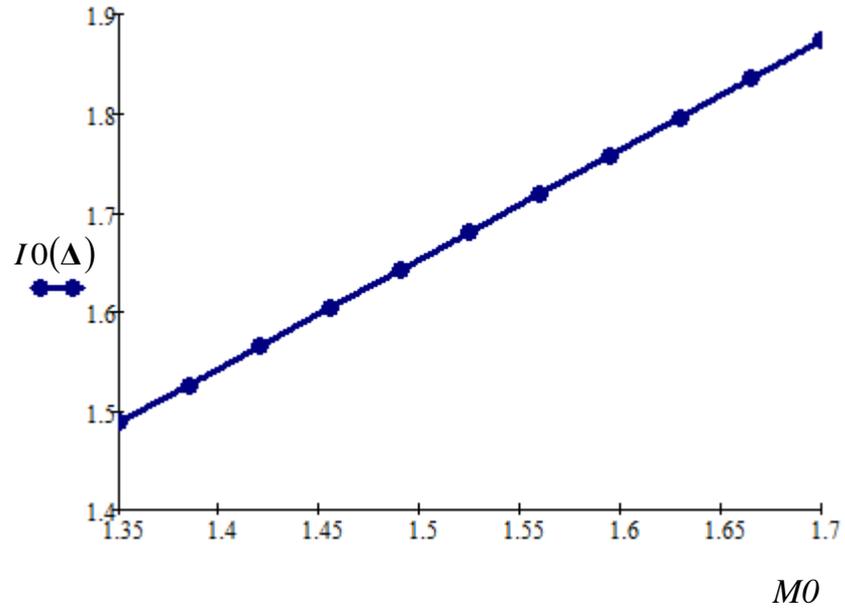


Рисунок 4.13 - Зависимость значения критерия оптимизации  $IO(\Delta_0^{onm})$  внешнего контура от величины показателя колебательности  $MO$  при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

Таблица 4.4. Передаточные функции и параметры настройки регуляторов САУ при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объектов

Контур САУ, $i$	Передаточные функции объектов регулирования	Оптимальные параметры настройки регулятора
1 (M1=1,6)	$W_{u1}(s) = \frac{1}{16 \cdot s + 1};$	$\Delta_{11}^{opt} = 6;$ $\Delta_{12}^{opt} = 6,23;$ $\Delta_{13}^{opt} = 2,82;$
2 (M2=1,55)	$W_{u2}(s) = \frac{48}{742 \cdot s^2 + 239 \cdot s + 1}; \quad W_{f2}(s) = \frac{3,6 \cdot (4,67 \cdot s + 1)}{742 \cdot s^2 + 239 \cdot s + 1}$	$\Delta_{21}^{opt} = 0,28;$ $\Delta_{22}^{opt} = 1,67;$ $\Delta_{23}^{opt} = 4,4;$
0 (M0=1,4)	$W_{u0}(s) = \frac{1}{3,6 \cdot s + 1}$	$\Delta_{01}^{opt} = 1,8;$ $\Delta_{02}^{opt} = 0,11;$ $\Delta_{03}^{opt} = 13,2.$

4. Четвертый этап: анализ качества переходных процессов в синтезированной САУ температурой мазута

На предыдущих этапах решения задачи структурно-параметрического синтеза были найдены вектора  $\Delta_0^{opt}$ ,  $\Delta_1^{opt}$  и  $\Delta_2^{opt}$  параметров настройки регуляторов  $W_{p0}(s, \Delta_0)$ ,  $W_{p1}(s, \Delta_1)$ ,  $W_{p2}(s, \Delta_2)$  для ряда заданных значений показателей колебательности ( $M0$ ,  $M1$ ,  $M2$ ) локальных контуров регулирования САУ температурой мазута установки АВТ.

На заключительном этапе необходимо проанализировать переходные процессы в системе управления, т.е. оценить качество процессов управления во временной области.

На рисунке 4.14 показан переходный процесс в синтезируемой САУ при заданном значении температуры мазута  $Z_1=390^\circ\text{C}$  и внешних возмущениях: изменением расхода перегретого пара ( $f_0 \rightarrow z_2$ ), приложенного в момент времени  $t_1=60$  сек, и изменением расхода нагреваемого мазута ( $f_2 \rightarrow z_2$ ), приложенного в момент времени  $t_2=120$  сек. На рисунке 4.15 представлен переходный процесс в синтезируемой САУ при задании

температуры мазута ( $Z_1=390^{\circ}\text{C}$ ) и одновременном действии внешних возмущений изменением расхода перегретого пара ( $f_0 \rightarrow z_2$ ) и изменением расхода нагреваемого мазута ( $f_2 \rightarrow z_2$ ), которые приложены в момент времени  $t=100$  сек. Передаточные функции и оптимальные параметры настройки регуляторов САУ приведены в таблице 4.4.

Таким образом, в результате оптимизации многоконтурной САУ температурой мазута получены следующие показатели качества переходных процессов:

- максимальное перерегулирование - 3,3%;
- время регулирования – 49 с;
- степень затухания – 2,1;
- установившееся значение –  $390^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальное динамическое отклонение –  $12,8^{\circ}\text{C}$ .

Данные показатели качества удовлетворяют предъявляемым к САУ подогревом сырья технологическим требованиям.

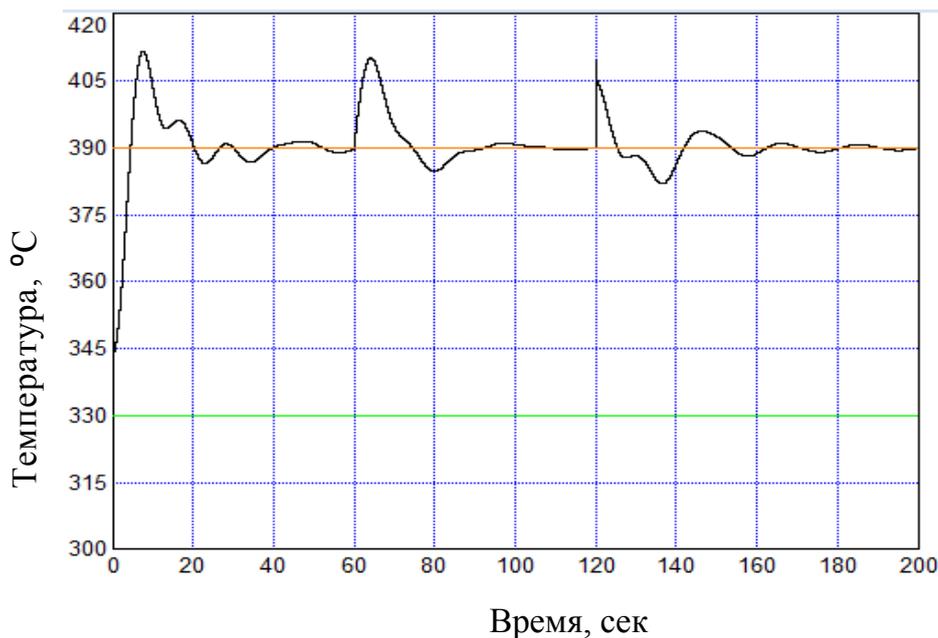


Рисунок 4.14 - Переходный процесс в САУ подогревом сырья при возмущения расхода пара ( $t_1=60$  сек) и расходом мазута ( $t_2=120$  сек) при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

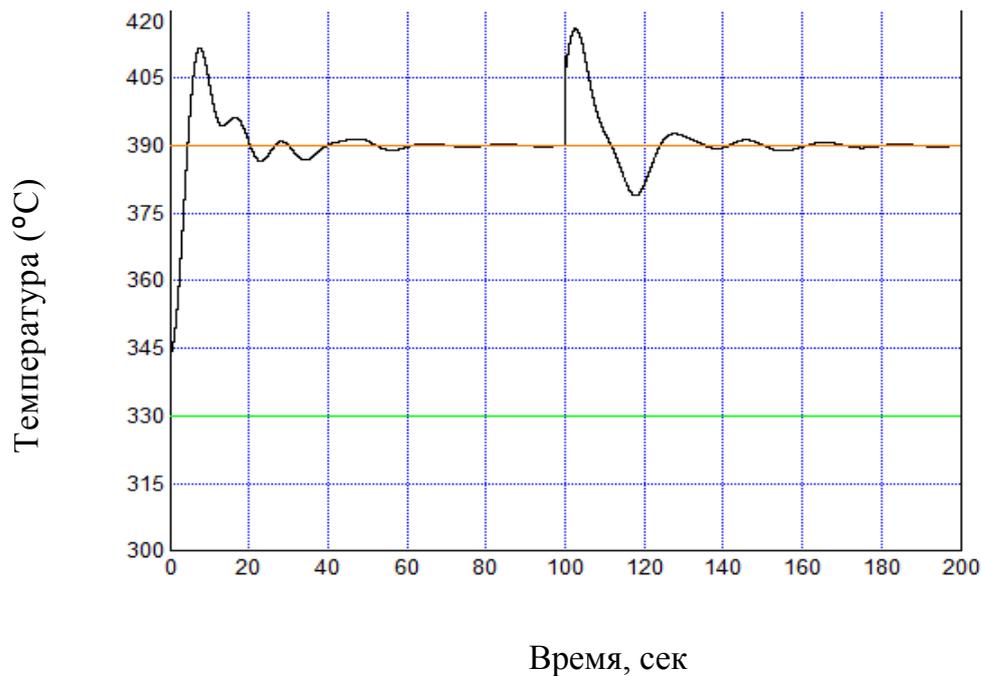


Рисунок 4.15 - Переходный процесс в САУ подогревом сырья при одновременном действии возмущений по расходу мазута и расходу пара при отсутствии звеньев запаздывания в структуре объекта регулирования

#### 4.4.2.2 Решение задачи при наличии звена транспортного запаздывания в структуре объекта

В предыдущем разделе задача параметрической оптимизации многоконтурной САУ с типовыми регуляторами решена для случая описания объектов управления с помощью апериодических звеньев первого и второго порядков

В то же время во многих случаях, динамика объектов регулирования описывается мультипликативными передаточными функциями, состоящими из апериодических звеньев второго порядка и звена транспортного запаздывания (глава 3).

В данном разделе на основе разработанных в диссертации алгоритмов решается задача параметрической оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья для объекта регулирования внешнего контура с транспортным запаздыванием.

Типовая структурная схема САУ температурой мазута для объекта регулирования с транспортным запаздыванием представлена на рисунке 4.4.

В рассматриваемой структуре САУ звено транспортного запаздывания отнесено к выходам объекта и фильтра помехи  $f_2$ . При этом звено транспортного запаздывания описывается в виде следующей аппроксимации Паде первого порядка:

$$e^{-\tau^0 s} = \frac{1 - \tau^0 \cdot s/2}{1 + \tau^0 \cdot s/2} = \frac{2 - \tau^0 s}{2 + \tau^0 s}. \quad (4.28)$$

В настоящем разделе диссертационного исследования решение задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ при наличии звена транспортного запаздывания в структуре модели объекта проводится согласно разработанному в разделе 4.4.1 алгоритму, базирующемуся на альтернансном методе параметрической оптимизации, и включает в себя следующие этапы.

1. Первый этап: параметрическая оптимизация внутреннего контура  $i=1$  каскадной системы

Первым этапом решения рассматриваемой задачи параметрической оптимизации является определение параметров настройки регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1)$  внутреннего контура регулирования каскадной САУ температурой мазута ( $i=1$ ), для которого не задан канал возмущающее воздействие - регулируемая величина. Этот этап проводится аналогично первому этапу решения задачи оптимизации многоконтурной каскадной системы при отсутствии звеньев транспортного запаздывания в структуре объектов управления, и, следовательно, результаты решения совпадают с результатами, приведенными в разделе 4.4.2.1.

2. Второй этап: параметрическая оптимизация внешнего контура  $i=2$  каскадной системы

Вторым этапом решения задачи параметрической оптимизации является настройка внешнего контура  $i=2$  каскадной системы, т.е. поиск вектора параметров настроек  $\Delta_2^{onm}$  регулятора  $W_{p2}(s, \Delta_2)$  из условия минимизации реакции САУ на возмущающее воздействие  $f_2$  при учете звена транспортного запаздывания. Решение осуществляется по описанной выше схеме альтернансного метода при фиксированных (полученных на этапе 1) оптимальных значениях параметров настройки  $\Delta_1^{onm}$  регулятора  $W_{p1}(s, \Delta_1^{onm})$ . При этом критерий оптимизации  $I2(\Delta_2)$  задается в виде функционала

(4.10), минимизирующего максимум амплитудно-частотной характеристики  $|W_{2zf2}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2)|$  контура по каналу действия возмущения  $f_2$ , определяемой согласно (4.19), а ограничение  $F2(\Delta_2)$  вида (4.11) накладывается на максимум амплитудно-частотной характеристики  $|W_{2zu}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2)|$  контура по каналу задающего воздействия, определяемой согласно выражению:

$$W_{2zu}(i\omega, \Delta_1, \Delta_2) = \frac{W_{1zu}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2) \cdot e^{-i\omega\tau}}{1 + W_{1zu}(i\omega, \Delta_1) \cdot W_{u2}(i\omega) \cdot W_{p2}(i\omega, \Delta_2) \cdot e^{-i\omega\tau}}. \quad (4.29)$$

В данном случае АЧХ внешнего контура  $i=2$  по каналу управляющего воздействия имеет два максимума, т.е.  $R_u = 2$ , а АЧХ внешнего контура  $i=2$  системы по каналу возмущающего воздействия имеет один максимум, т.е.  $R_f = 1$ . Вид АЧХ контура  $i=2$  управления по каналам управления и возмущения при ПИД-законе регулирования с оптимальными параметрами  $\Delta_2^{onm}$ , определенными по схеме альтернативного метода при учете звена запаздывания приведен на рисунке 4.16.

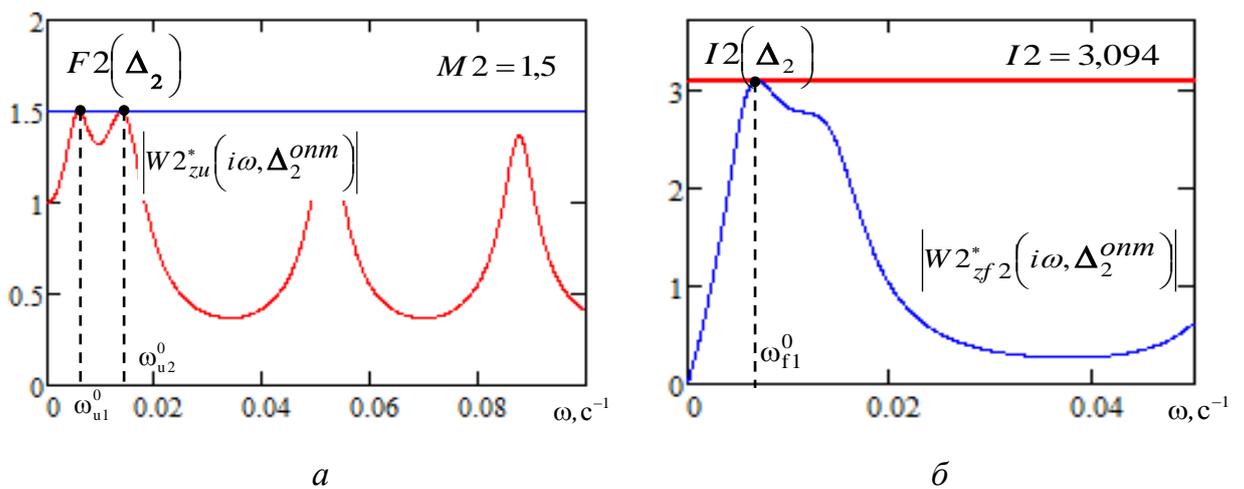


Рисунок 4.16 - АЧХ внешнего контура регулирования  $i=2$  каскадной системы по каналу задания (а) и по каналу возмущения (б) для объекта регулирования с транспортным запаздыванием

Расчетная система уравнений, составленная в соответствии с общей схемой альтернансного метода, может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \left| W 2_{zf2} \left( i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right| - I 2 \left( \Delta_2^{onm} \right) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W 2_{zf2} \left( i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right| = 0; \\ \left| W 2_{uz} \left( i\omega_{uq}^0, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right| - M 2 = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W 2_{uz} \left( i\omega_{uq}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right| = 0; \\ q = \overline{1, R_f}; \quad R_f + R_u = n, \quad R_f = 1, \quad R_u = 2. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Система шести уравнений (4.30) содержит семь неизвестных:  $n=3$  настроек ПИД-регулятора  $\Delta_2^{onm} = (\Delta_{21}^{onm}, \Delta_{22}^{onm}, \Delta_{23}^{onm})$ ; величину критерия оптимальности  $I 2 \left( \Delta_2^{onm} \right)$ ; неизвестную частоту  $\omega_{f1}^{onm}$  и  $R_u=2$  неизвестных частот  $\omega_{uq}^{onm}$ ,  $q = \overline{1, 2}$ . Следовательно, система (4.30) должна быть дополнена следующим условием равенства нулю определителя:

$$\left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{21}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u2}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{21}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zf2} \left( i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{21}} \\ \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{22}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u2}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{22}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zf2} \left( i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{22}} \\ \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{23}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zu} \left( i\omega_{u2}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{23}}; & \frac{\partial \left| W 2_{zf2} \left( i\omega_{f1}^{onm}, \Delta_1^{onm}, \Delta_2^{onm} \right) \right|}{\partial \Delta_{23}} \end{array} \right| = 0 \quad (4.31)$$

Результаты совместного решения уравнений (4.30)-(4.31) для различных значений показателя колебательности  $M 2$  приведены в таблице 4.5 и на рисунках 4.17-4.18.

Таблица 4.5. Результаты решения задачи параметрической оптимизации внешнего контура  $i=2$  каскадной системы при наличии звена запаздывания в структуре объекта регулирования

$M2$	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
$\Delta_{21}^{opt}$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$\Delta_{22}^{opt}$	0,0317	0,0323	0,0329	0,0335	0,0340	0,0345	0,0350	0,0355
$\Delta_{23}^{opt}$	2,6689	2,7268	2,7828	2,8368	2,8890	2,9394	2,9881	3,0353
$I2(\Delta_2^{opt})$	2,9020	2,9664	3,0304	3,0940	3,1574	3,2206	3,2837	3,3466

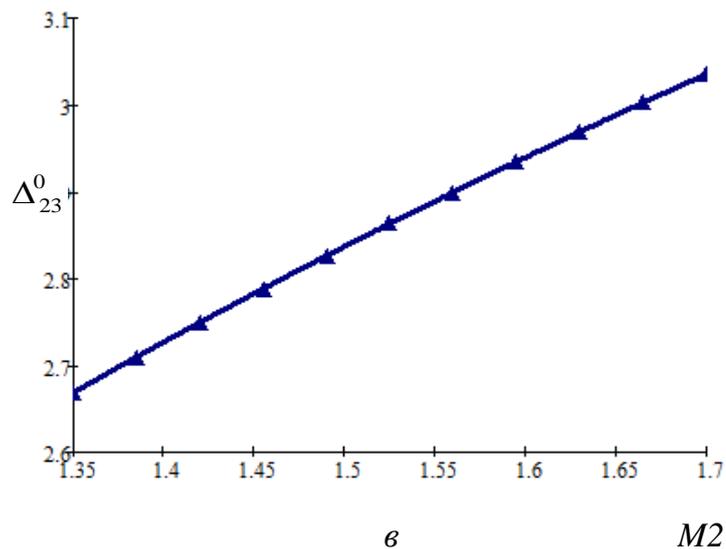
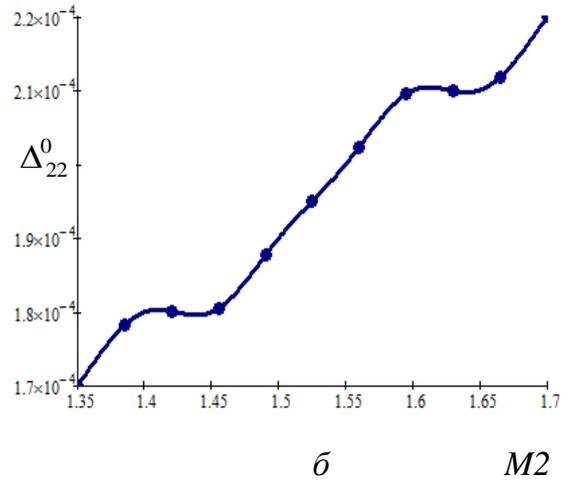
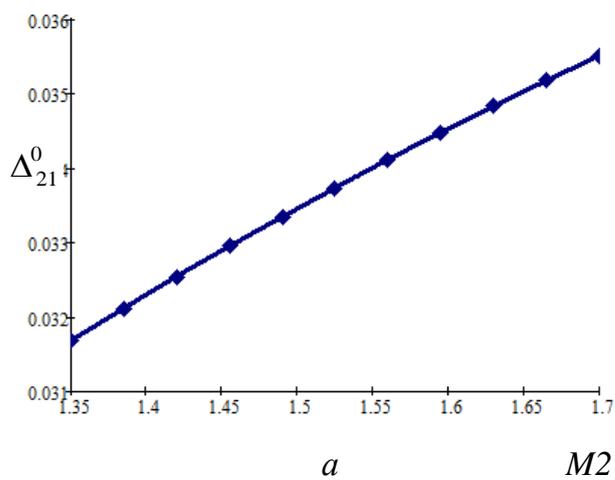


Рисунок 4.17 - Зависимости значений оптимальных параметров настройки регулятора внешнего контура  $i=2$  от величины показателя колебательности  $M2$  для объекта с

запаздыванием:  $a$  - для  $\Delta_{21}^{onm}$ ;  $b$  - для  $\Delta_{22}^{onm}$ ;  $c$  - для  $\Delta_{23}^{onm}$

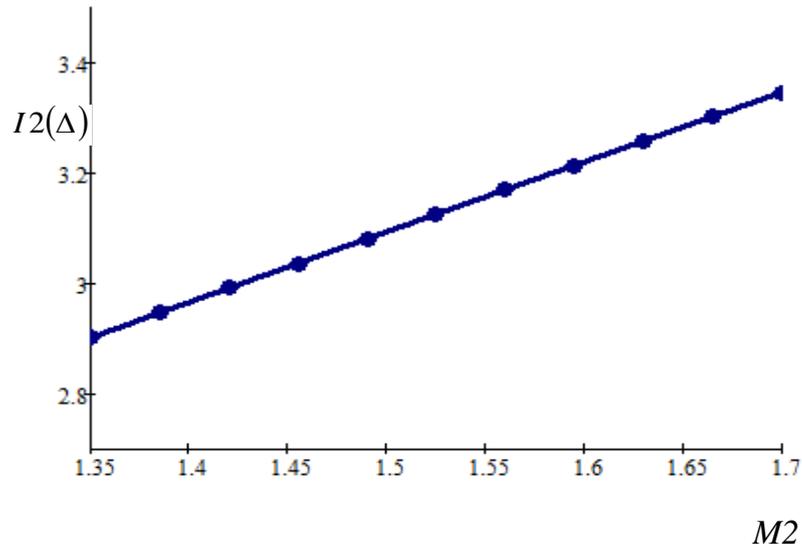


Рисунок 4.18 - Зависимость значения критерия  $I2(\Delta_2^{onm})$  оптимизации внешнего контура  $i=2$  для объекта с запаздыванием от величины показателя колебательности  $M2$

3. Третий этап: параметрическая оптимизация контура регулирования  $i=0$  расхода пара в печь.

На третьем этапе решения задачи параметрической оптимизации многоконтурной САУ определяется вектор  $\Delta_0^{onm}$  параметров настройки регулятора  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  локальной САУ расхода пара в печь по схеме альтернативного метода.

Как было показано в разделе 4.4.2.1, особенностью применения здесь описанной выше процедуры альтернативного метода является выбор в качестве критерия оптимальности  $IO(\Delta_0)$  максимума АЧХ каскадной САУ по каналу возмущения, для которой синтезируемый контур регулирования выступает в качестве внешнего контролируемого воздействия. Ограничение  $FO(\Delta_0)$  задается аналогично предыдущему случаю, т.е. оно лимитирует максимум АЧХ оптимизируемого контура (4.19) по каналу управляющего воздействия при заранее фиксированных оптимальных значениях

параметров настройки локальных регуляторов каскадной системы  $\Delta_1^{onm}$  и  $\Delta_2^{onm}$ , найденных на этапах 1 и 2.

Настройка контура регулирования  $i=0$  осуществляется согласно методике, приведенной в п.п. 4.4.2.1, для объектов регулирования, передаточные функции которых приведены в таблице 4.7.

Расчетная система семи уравнений, построенная на основе альтернансного метода, записывается аналогично (4.25)-(4.26).

На рисунке 4.19, а приведен вид АЧХ по каналу задания контура управления с регулятором  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  при оптимальных параметрах настройки  $\Delta_0^{onm}$ , которая имеет один максимум равный величине ограничения на показатель колебательности  $M0$ . АЧХ контура управления с регулятором  $W_{p0}(s, \Delta_0)$  по каналу возмущения  $f_0$  имеет два равных максимума (рис. 4.19, б).

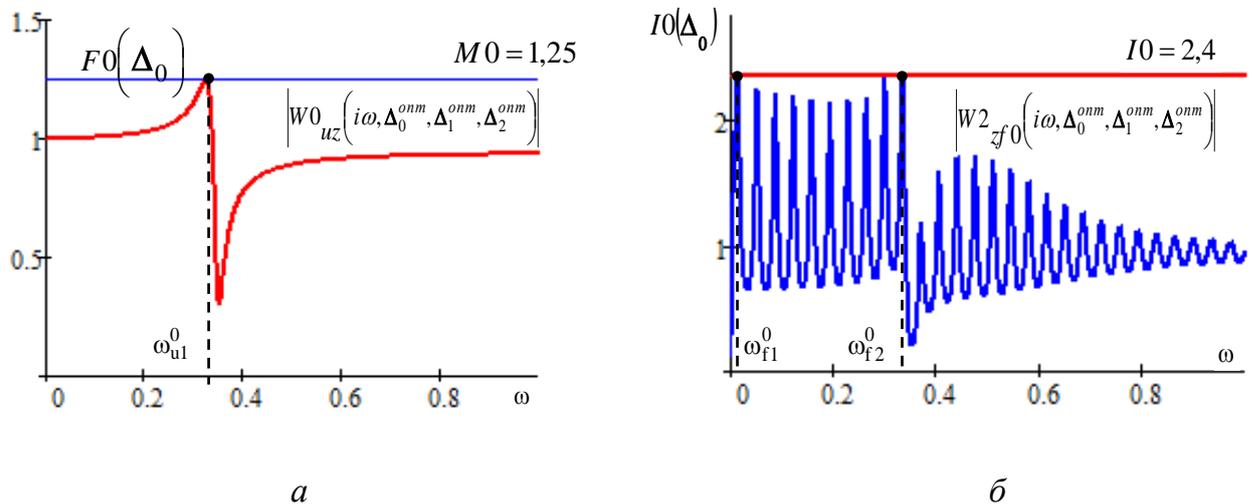


Рисунок 4.19 - АЧХ контура регулирования  $i=0$  по каналу задания (а) и АЧХ внешнего контура  $i=2$  каскадной системы по каналу возмущения (б) для объекта с запаздыванием

Результаты решения задачи параметрической оптимизации САР расхода пара в печь, полученные для различных значений показателя колебательности  $M0$ , и их анализ приведены в таблице 4.6 и на рисунках 4.20-4.21. Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.6 Результаты решения задачи параметрической оптимизации САР расхода пара в печь

$MO$	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
$\Delta_{01}^{opt}$	7,797	7,964	8,394	8,468	8,593	8,682	8,742	8,78	8,81	8,832
$\Delta_{02}^{opt}$	1,189	0,965	0,779	0,639	0,523	0,426	0,344	0,274	0,212	0,158
$\Delta_{03}^{opt}$	36,571	36,61	38,926	38,915	39,407	39,724	39,905	39,961	39,999	40,006
$IO(\Delta_0^{opt})$	2,34	2,341	2,342	2,343	2,344	2,345	2,346	2,347	2,348	2,349

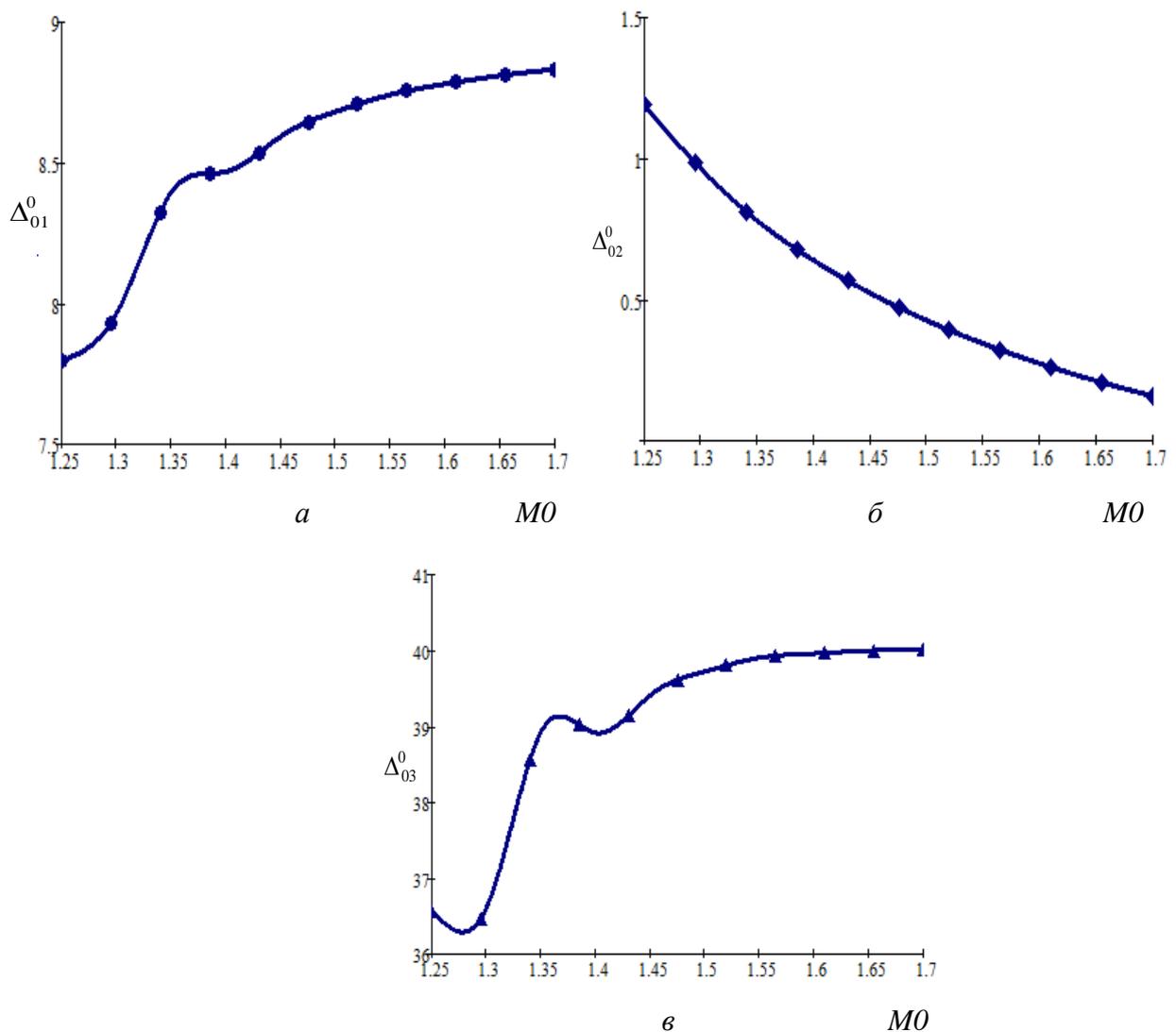


Рисунок 4.20 - Зависимости значений оптимальных параметров настройки регулятора контура  $i=0$  от величины показателя колебательности  $MO$ : а - для  $\Delta_{01}^{opt}$ ; б - для  $\Delta_{02}^{opt}$ ; в - для  $\Delta_{03}^{opt}$

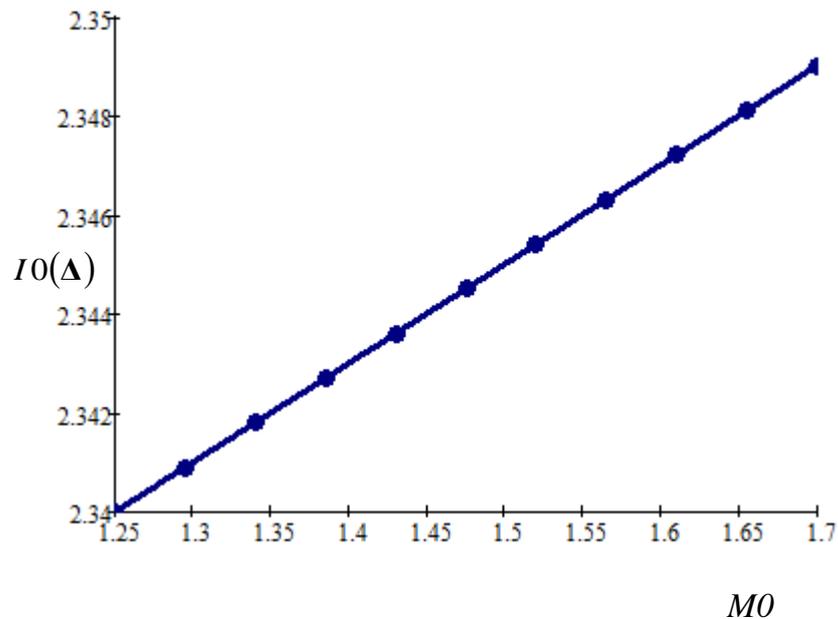


Рисунок 4.21 - Зависимость значения критерия  $IO(\Delta_0^{opt})$  оптимизации внешнего контура от величины показателя колебательности  $MO$

#### 4. Четвертый этап: анализ качества переходных процессов в синтезированной САУ

На предыдущих этапах решения задачи параметрической оптимизации САУ подогревом сырья вакуумного блока установки АВТ были получены значения параметров настройки регуляторов для ряда значений показателей колебательности ( $MO$ ,  $M1$ ,  $M2$ ) локальных контуров регулирования.

На заключительном этапе необходимо проанализировать переходные процессы в системе управления, т.е. оценить качество процессов управления во временной области.

На рисунках 4.22-4.23 показаны переходные процессы в синтезируемой САУ при  $MO=1,25$  для полученных настроек регуляторов  $\Delta_0^{opt} = (7,797; 1,19; 36,57)$ . На рисунке 4.22 показан переходный процесс в синтезируемой САУ при заданном значении температуры мазута  $Z_1=390^\circ\text{C}$  и внешних возмущениях: изменением расхода перегретого пара ( $f_0 \rightarrow z_2$ ), приложенного в момент времени  $t_1=1500$  сек, и изменением расхода нагреваемого мазута ( $f_2 \rightarrow z_2$ ), приложенного в момент времени  $t_2=3000$  сек. На рисунке 4.23 представлен переходный процесс в синтезируемой САУ при задании температуры

мазута ( $Z_1=390^\circ\text{C}$ ) и одновременном действии внешних возмущений изменением расхода перегретого пара ( $f_0 \rightarrow z_2$ ) и изменением расхода нагреваемого мазута ( $f_2 \rightarrow z_2$ ), которые приложены в момент времени  $t=1500$  сек. Передаточные функции многоконтурной САУ приведены в таблице 4.7.

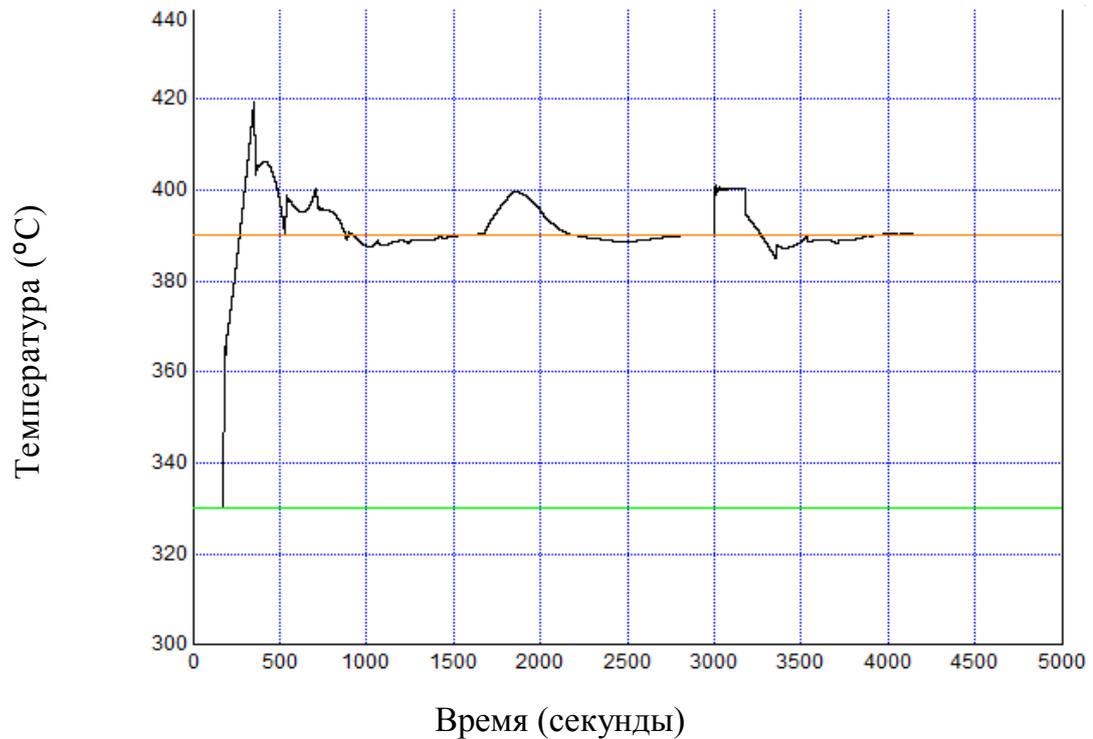


Рисунок 4.22 - Переходные процессы в САУ температурой мазута установки АВТ при наличии транспортного запаздывания в структуре объекта регулирования: возмущение расходом мазута – 1500 секунда; возмущение расходом пара - 3000 секунда.

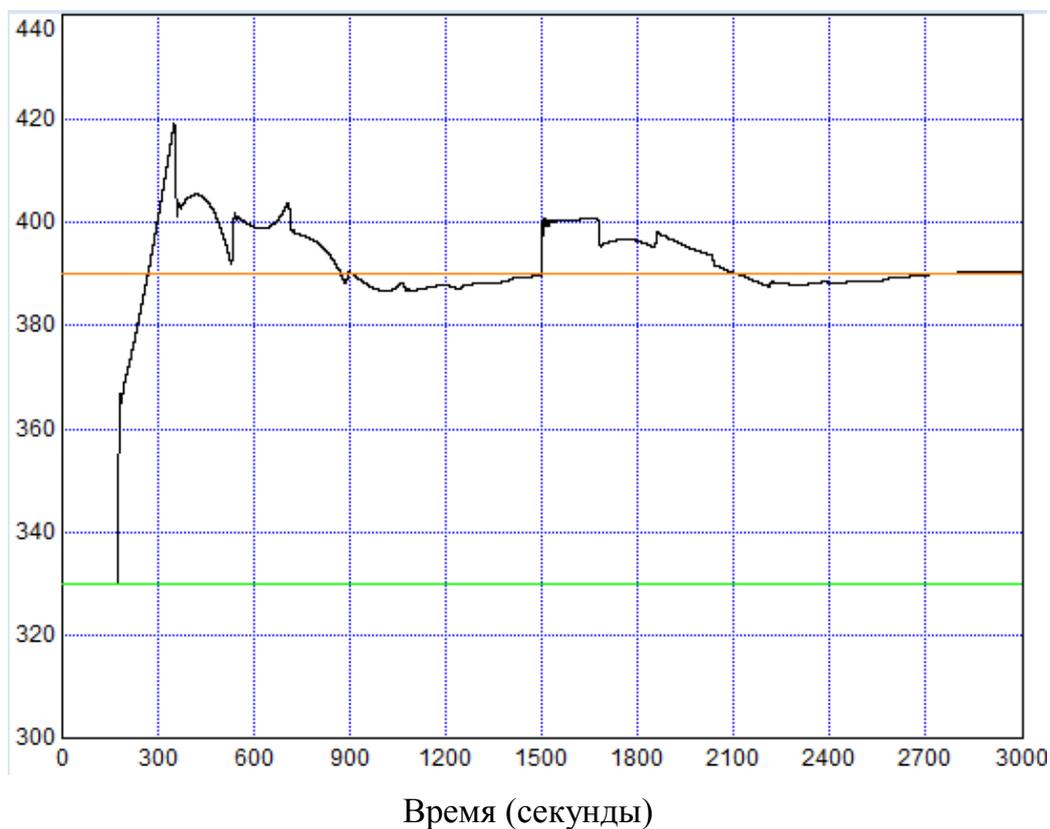


Рисунок 4.23 - Переходные процессы в САУ температурой мазута установки АВТ при наличии транспортного запаздывания в структуре объекта регулирования при одновременном действии возмущений по расходу мазута и расходу пара

Таким образом, в результате оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья при наличии транспортного запаздывания в структуре объекта регулирования получены следующие показатели качества переходных процессов:

- максимальное перерегулирование - 5,1%;
- время регулирования – 1020 с;
- степень затухания – 1,9;
- установившееся значение – 390°C;
- максимальное динамическое отклонение – 19,8°C.

Таблица 4.7. Передаточные функции и параметры настройки регуляторов САУ подогревом сырья при наличии звена запаздывания в структуре объекта

Контур САУ, $i$	Передаточная функция, $W(s)$	Транспортное запаздывание, $\tau, c$
1 ( $M1=1,6$ )	$W_{u1}(s) = \frac{1}{16 \cdot s + 1};$	$e^{-175 \cdot s} \cdot 0$
2 ( $M2=1,5$ )	$W_{u2}(s) = \frac{48}{742 \cdot s^2 + 239 \cdot s + 1};$ $W_{f2}(s) = \frac{3,6 \cdot (4,67 \cdot s + 1)}{742 \cdot s^2 + 239 \cdot s + 1}$	$e^{-175 \cdot s},$ $\tau = 175 c$
0 ( $M0=1,25$ )	$W_{u0}(s) = \frac{1}{3,6 \cdot s + 1}$	0

#### 4.4.2.3 Техническая реализация и анализ эффективности оптимальных алгоритмов управления

Полученные результаты решения задачи параметрической оптимизации могут быть широко использованы на практике для настройки типовых регуляторов многоконтурных систем управления многостадийными процессами нефтепереработки.

В частности, найденные в разделе 4.4.2.2 оптимальные алгоритмы управления были апробированы при настройке типовых регуляторов многоконтурной САУ подогревом сырья АВТ-4 АО «КНПЗ», построенной на базе широко применяемых контроллеров DeltaV.

Для управления процессом предусмотрены панели настроек локальных контуров регулирования и панели визуализации значений технологических параметров процесса. Панели настроек предназначены для внесения в них оптимальных значений параметров настройки типовых регуляторов локальных САУ, реализующих П-, ПИ- и ПИД- законы регулирования. Панели визуализации предназначены для визуального контроля текущих основных технологических параметров процесса и значений установленных заданий.

Полученные в результате решения задачи оптимизации многоконтурной САУ значения параметров настроек типовых ПИД-регуляторов  $\Delta_{01}^{onm}$ ,  $\Delta_{02}^{onm}$ ,  $\Delta_{03}^{onm}$ ,  $\Delta_{11}^{onm}$ ,  $\Delta_{12}^{onm}$ ,  $\Delta_{13}^{onm}$ ,  $\Delta_{21}^{onm}$ ,  $\Delta_{22}^{onm}$ ,  $\Delta_{23}^{onm}$  задаются в соответствующих окнах панели настроек локальных контуров многоконтурной САУ.

На рисунке 4.24 представлены панели настроек, а на рисунке 4.25 - панели визуализации значений параметров локальных контуров САУ: контура регулирования расхода пара в печь подогрева сырья П-3, контура регулирования расхода мазута в печь подогрева сырья П-3, контура регулирования температуры мазута из печи подогрева сырья П-3.

Внешний вид мнемосхем печи П-3 и вакуумного блока АВТ-4 АО «КНПЗ» представлен на рисунках 4.26 и 4.27, соответственно.

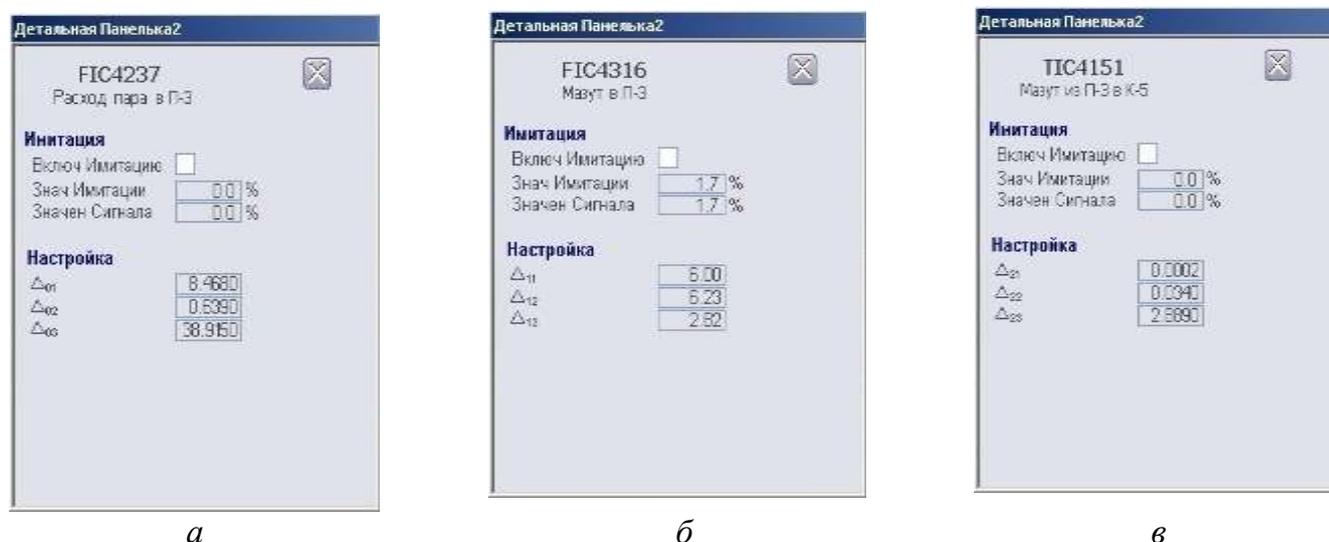
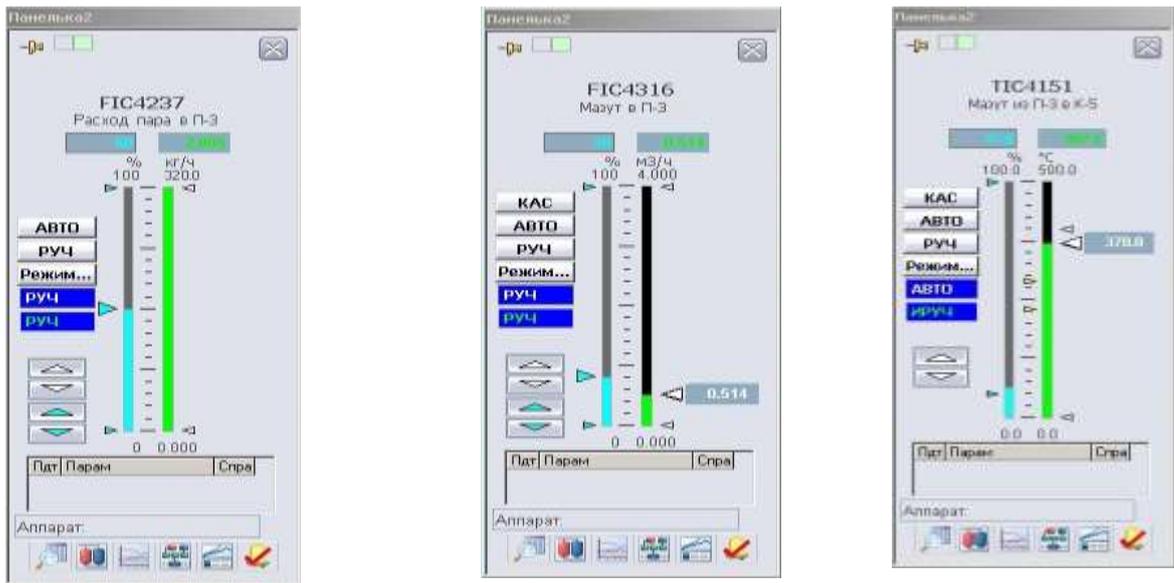


Рисунок 4.24 – Внешний вид панелей настроек локальных контуров САУ: а - контура регулирования расхода пара в печь П-3, б - контура регулирования расхода мазута в печь П-3, в - контура регулирования температуры мазута из печи П-3



а

б

в

Рисунок 4.25 – Внешний вид панелей визуализации локальных контуров САР: а - контура регулирования расхода пара в П-3, б - контура регулирования расхода мазута в П-3, в - контура регулирования температуры мазута из П-3

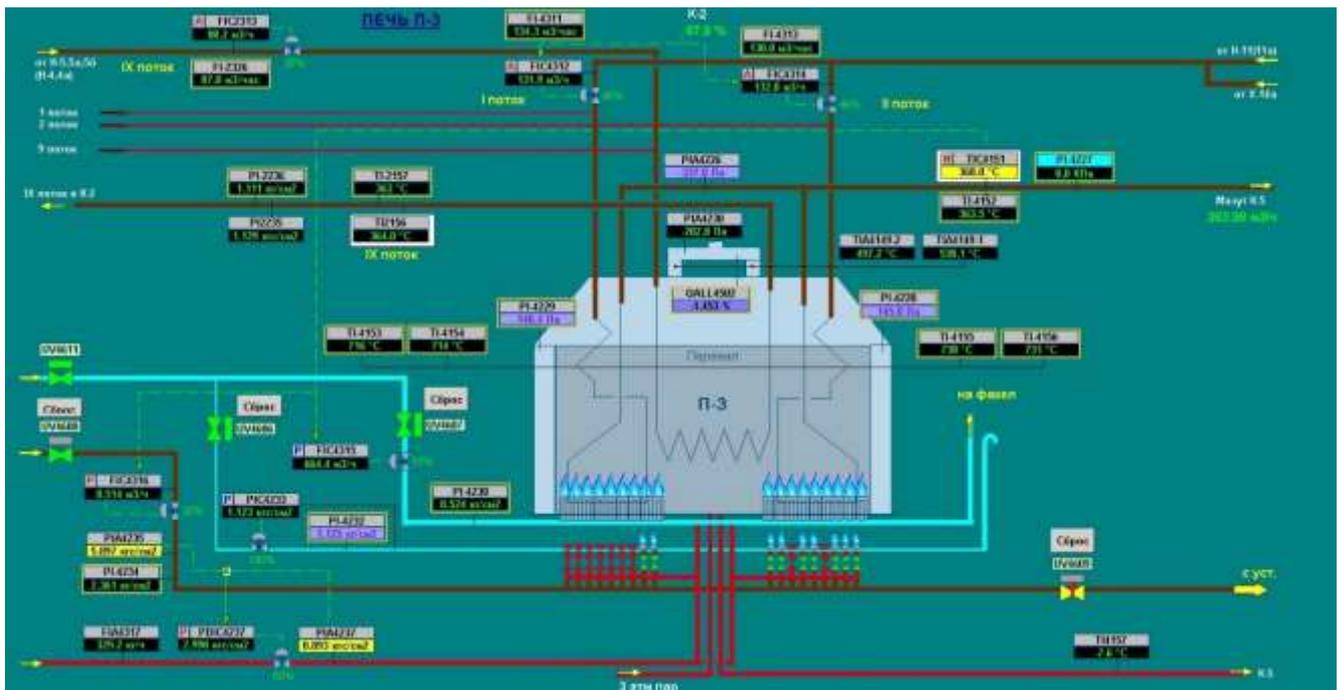


Рисунок 4.26 – Внешний вид мнемосхемы печи П-3 АВТ-4 АО «КНПЗ»

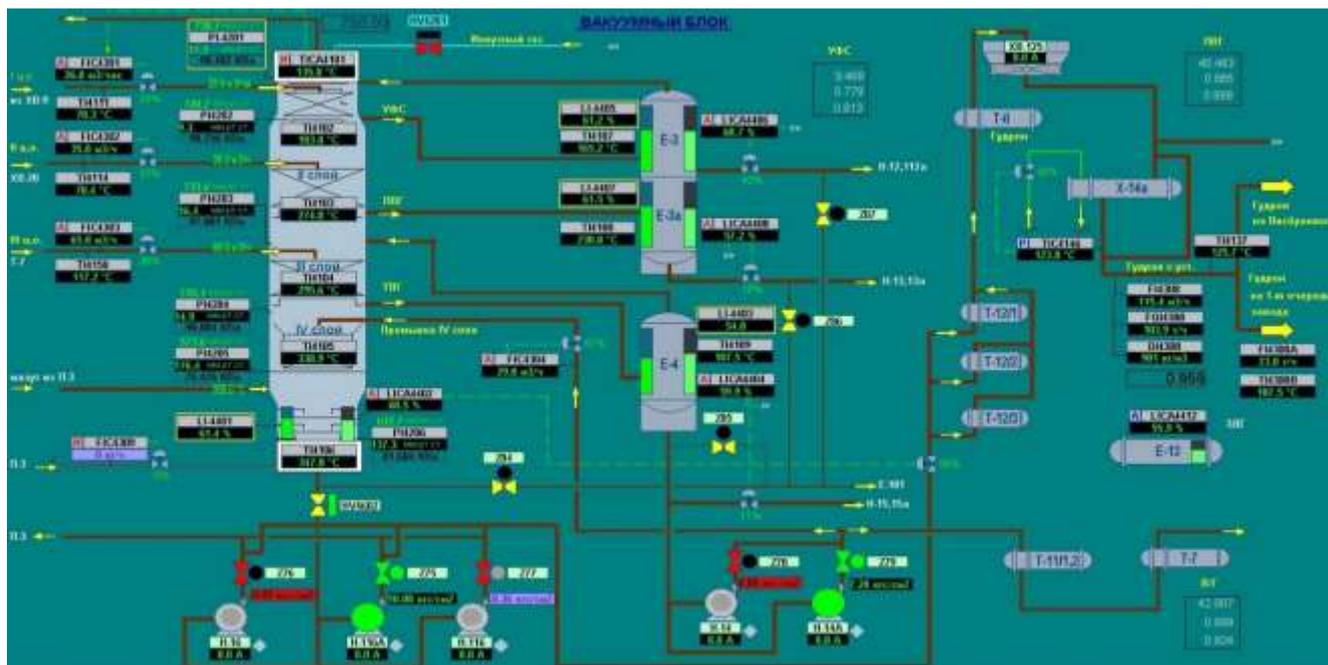


Рисунок 4.27 – Внешний вид мнемосхемы вакуумного блока АВТ-4 АО «КНПЗ»

Для оценки полученных результатов оптимизации многоконтурной САУ подогревом сырья был проведен сравнительный анализ относительной эффективности синтезируемой системы на основе формирования интегральных обобщённых показателей по методике, описанной в п. 2.3.13.

Аналогично описанной в главе 2 методике, применим DEA-метод для интегральной оценки сравнительной эффективности 11 локальных САУ многоконтурной САУ процессом нефтеперегонки вакуумного блока установки АВТ-4 с учетом изменений показателей качества процессов регулирования после реализации оптимальных алгоритмов регулирования в оптимизированных локальных контурах САУ подогревом сырья. В таблице 4.8 представлены наименования управляемых технологических параметров, отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям и интегральные DEA-оценки показателей качества локальных САУ вакуумного блока установки АВТ-4.

В качестве выходных величин  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) рассматриваются отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям в динамическом и установившемся режимах (максимальное перерегулирование, время регулирования, степень затухания, установившееся значение, максимальная динамическая ошибка). В качестве входных величин  $X_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 4$ )

принимаются следующие параметры локальных САР: заданное значение регулируемой величины; возмущения, действующие на систему; технологические параметры оборудования.

Как было указано ранее, для упрощения процедуры поиска обобщенного показателя эффективности  $f_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 11$ ) используется модификация DEA-метода, в которой значения входных величин  $X_j$  и их весовых коэффициентов  $v_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) принимаются постоянными для всех рассматриваемых локальных САР и, поэтому, исключаются из целевой функции (2.43) и системы ограничений (2.44). В итоге, общая постановка задачи формулируется как задача линейного программирования на максимум функционала (2.45) при наличии ограничений, определяющих область значений  $G$  весовых коэффициентов целевой функции вида (2.46).

Согласно общей постановке задачи (2.45)-(2.46), поиск обобщенного показателя эффективности локальной системы управления подогревом сырья в печи П-3 (п.1, таблица 4.8) принимает вид (2.48) при наличии ограничений, определяющих область значений  $G_l$  весовых коэффициентов  $u_{i1}$  (2.49). Здесь коэффициенты  $Y_{in}$ ,  $i=1, 2 \dots 5$ ,  $n=1, 2, \dots, 11$  определяются согласно значениям, приведенным в таблице 4.8.

Аналогично главе 2, вновь формулируются задачи определения обобщенных показателей эффективности для всех анализируемых локальных САР (п. 2-11 таблицы 4.8). В итоге, осуществляется постановка 11 задач поиска обобщенных показателей эффективности  $f_n(u_{in})$  и соответствующего набора весовых коэффициентов  $u_{in}$  ( $n = 1, 2, \dots, 11$ ).

Поставленные задачи, например задача поиска обобщенного показателя эффективности регулирования температурой мазута на выходе из печи П-3 (2.48), (2.49), как и остальные задачи вида (2.45), (2.46), решаются совместно с помощью типовых методов решения задач линейного программирования аналогично п. 2.3.13.

Результатом решения поставленных задач являются обобщенные показатели эффективности  $f_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 11$ ), представленные в таблице 4.8.

Как показывают результаты применения DEA-метода (п. 1, 2, 3 таблицы 4.8), после параметрической оптимизации САУ температурой мазута такие технологические

параметры как температура мазута на выходе из печи П-3, расход мазута в печь П-3 и расход перегретого пара в печь П-3, имевшие наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления (см. таблицу 2.7), получили теперь интегральные оценки, равные единице, что означает полное соответствие предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы технологическим требованиям.

Таблица 4.8. Технологические параметры и оценки показателей качества локальных САР вакуумного блока установки АВТ-4 после оптимизации

№ п/п	Наименование управляемого параметра технологического процесса	Отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям					Интегральная ДЛА-оценка, $f_{in}$
		$Y_{in} = y_{зад_{in}} - y_{факт_{in}},$ $i = 1, 2, 3$			$Y_{in} = - \left  \frac{y_{зад_{in}} - y_{факт_{in}}}{y_{зад_{in}}} \right ,$ $i = 4, 5$		
		Максимальное перерегулирование, %	Время регулирования, с	Степень затухания	Установившееся значение	Максимальная динамическая ошибка	
1	Температура мазута на выходе из печи П-3	1	45	0	-0,01	-0,02	<b>1,0000</b>
2	Расход мазута в печь П-3	0	42	0	0	0	<b>1,0000</b>
3	Расход перегретого пара в печь П-3	2	50	0,02	0	-0,01	<b>1,0000</b>
4	Уровень в атмосферной колонне К-2	10	23	0,05	0	-0,01	<b>0,8978</b>
5	Температура низа вакуумной колонны К-5	5	30	0	-0,01	0	<b>0,9133</b>
6	Расход циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5 I	20	27	0	-0,03	0	<b>1,0000</b>
7	Расход циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5 II	10	15	0,05	0	0	<b>0,8629</b>
8	Расход циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5 III	20	40	0,4	-0,02	-0,01	<b>1,0000</b>

Продолжение таблицы 4.8

№ п/п	Наименование управляемого параметра технологического процесса	Отклонения фактических значений показателей качества от заданных по технологическим требованиям					Интегральная DEA-оценка, $f_n$
		$Y_{in} = y_{зад_{in}} - y_{факт_{in}},$ $i = 1, 2, 3$			$Y_{out} = -\left  \frac{y_{зад_{out}} - y_{факт_{out}}}{y_{зад_{out}}} \right ,$ $i = 4, 5$		
		Максимальное перерегулирование, %	Время регулирования, с	Степень затухания	Установившееся значение	Максимальная динамическая ошибка	
9	Расход гудрона из вакуумной колонны К-5	15	20	0	0	-0,03	<b>0,9422</b>
10	Расход дизельной фракции на выходе из вакуумной колонны К-5	25	20	0	0	-0,06	<b>1,0000</b>
11	Расход тяжелого вакуумного газойля на выходе из вакуумной колонны К-5	20	10	0,01	-0,01	0	<b>0,9779</b>

### Выводы по четвертой главе:

1. Сформулирована задача параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества многоконтурных каскадных систем управления. В роли основного критерия оптимизации параметров настройки регуляторов предлагается рассмотреть критерий, позволяющий получить максимальную степень инвариантности (минимальный отклик) системы по отношению к внешнему возмущению, оцениваемую по максимуму соответствующей АЧХ системы по каналу данного возмущающего воздействия, при дополнительных ограничениях, накладываемых на показатель колебательности системы  $M$ , совпадающий с максимумом АЧХ замкнутой САУ по каналу задающего воздействия.

2. Разработан общий алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества многоконтурных каскадных систем управления на базе альтернативного метода параметрической оптимизации.

3. Разработан алгоритм решения задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной системе автоматического управления, который позволяет найти точное решение задачи параметрического синтеза анализируемой САУ, обеспечивающее при требуемом показателе качества регулирования (показатель колебательности  $M$ ) по каналу задания каждого локального контура управления минимально возможную реакцию на внешние возмущающие воздействия.

4. Предлагаемые алгоритмы решения задачи параметрического синтеза и оптимизации апробированы на примере типовой САУ подогрев сырья вакуумного блока установки АВТ при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования.

5. Получены точные решения задачи параметрической оптимизации типовых регуляторов в многоконтурной системе при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования, обеспечивающие минимально возможную реакцию на внешние возмущающие воздействия при требуемом показателе колебательности по каналу задания каждого локального контура регулирования.

6. Предложена техническая реализация оптимальных алгоритмов регулирования в локальных контурах многоконтурной САУ на базе SCADA EMERSON и программируемого логического контроллера Delta V.

7. Применение DEA-метода для оценки эффективности управления продемонстрировало, что после оптимизации САУ подогревом сырья такие технологические параметры, как температура мазута на выходе из печи подогрева сырья, расход мазута и расход перегретого пара в печь, имевшие наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления, получили теперь интегральные оценки, равные единице, что означает полное соответствие технологическим требованиям, предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы САУ.

## **Заключение**

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрены и проанализированы основные системные проблемы нефтепереработки как ключевого элемента нефтяной отрасли РФ. Установлено, что одной из основных проблем первичной нефтепереработки является недостаточный уровень эффективности работы существующего оборудования и качества управления, решение которой обуславливает необходимость разработки новых системных подходов к увеличению эффективности производства в нефтяной отрасли, оптимизации управления основными процессами и, как следствие, к повышению качества конечных продуктов нефтепереработки без существенных капитальных вложений.

2. Разработана методика системного анализа многостадийного процесса первичной переработки нефти как сложного технического объекта управления и оптимизации, позволяющая на основе построения системных интегральных оценок относительной эффективности локальных контуров регулирования выявить неэффективно управляемые технологические параметры и оптимизировать соответствующие многосвязные системы управления.

3. Разработана методика оценки уровня автоматизации и эффективности управления процессом первичной переработки нефти, регламентирующая алгоритмы получения, сортировки, обработки и анализа информации согласно сформулированным требованиям к форме представления исходных данных и результатам их анализа.

4. Разработанные методики были апробированы при решении задачи системного анализа процесса первичной переработки нефти на установке АВТ, была проведена оценка уровня автоматизации и эффективности управления процессом, а также получены результаты сравнительного анализа эффективности работы 11 взаимосвязанных локальных САР вакуумного блока установки, что позволило на основе применения DEA-метода выявить неэффективно управляемые параметры процесса.

5. Проведен анализ динамики объектов регулирования и синтез математических моделей локальных САР, имеющих наихудшие оценки относительной эффективности, в форме передаточных функций по рассматриваемым каналам действия управляющих и возмущающих воздействий.

6. Сформулирована задача параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества многоконтурных каскадных систем управления, в которой в роли основного критерия оптимизации параметров настройки регуляторов рассматривается максимальная степень инвариантности (минимальный отклик) системы по отношению к внешнему возмущению, оцениваемую по максимуму соответствующей АЧХ системы по каналу данного возмущающего воздействия, при дополнительных ограничениях, накладываемых на показатель колебательности системы  $M$ , совпадающий с максимумом АЧХ замкнутой системы по каналу задающего воздействия.

7. Разработан общий алгоритм решения задачи параметрического синтеза и оптимизации по частотным критериям качества многоконтурных каскадных систем управления на базе альтернативного метода параметрической оптимизации.

8. Разработан алгоритм решения задачи параметрической оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной системе автоматического управления, который позволяет найти точное решение задачи параметрического синтеза анализируемой САУ, обеспечивающее при требуемом показателе качества регулирования (показатель колебательности  $M$ ) по каналу задания каждого локального контура управления минимально возможную реакцию на внешние возмущающие воздействия.

9. Предлагаемые алгоритмы решения задачи параметрического синтеза и оптимизации апробированы на примере типовой САУ подогревом сырья вакуумного блока установки АВТ при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования.

10. Получены точные решения задачи параметрической оптимизации типовых регуляторов в многоконтурной системе при отсутствии и при наличии звеньев транспортного запаздывания в структуре динамических объектов регулирования, обеспечивающие минимально возможную реакцию на внешние возмущающие воздействия при требуемом показателе колебательности по каналу задания каждого локального контура регулирования.

11. Предложена техническая реализация оптимальных алгоритмов регулирования в локальных контурах многоконтурной САУ на базе SCADA EMERSON и программируемого логического контроллера Delta V.

12. На основе DEA-метода проведена оценка эффективности управления оптимизированной САУ, подтвердившая, что технологические параметры, имевшие наихудшие интегральные оценки показателей качества процессов управления, получили теперь интегральные оценки, равные единице, что означает полное соответствие технологическим требованиям, предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы САУ.

**Библиографический список**

1. Алексеев В.М. Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
2. Анализ и синтез химико-технологических систем: [Учеб.] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. - М. : Химия, 1991. - 432 с. : ил. - ISBN 5-7245-0366 (в пер.).
3. Андреев Ю.Н. Оптимальное проектирование тепловых агрегатов. – М.: Машиностроение, 1983. – 229 с.
4. Антонов А.В. Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004. - 454 с. ISBN: 5-06-004862-4.
5. Анфилатов В.С. и др. Системный анализ в управлении. – М.: ФИС, 2003. – 368 с.
6. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
7. Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Сетин С.П., Снопков А.С. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического управления технологическим процессом первичной переработки нефти // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2013. 40, №4. С. 169-180.
8. Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Сетин С.П., Тычинина Ю.А. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического регулирования процесса первичной переработки нефти с объектом регулирования с транспортным запаздыванием // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Сер. Технические науки. 2014. 44, №4. С. 160-169.
9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления // Изд-во: Профессия, 2007.
10. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.
11. Варфоламейев В.И., Воробьев С.Н. Принятие управленческих решений. – М.: КУДЦЦ- ОБРАЗ, 2001. – 288 с.

12. Волин Ю.М., Островский Г.М. Оптимизация технологических процессов в условиях частичной неопределенности исходной информации // Автоматика и телемеханика. 1995. №12.
13. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ. – Изд-во Юрайт, 2012. – 688 с.
14. Волкова В.Н. Концепция современного естествознания. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 200 с.
15. Выгон Г.В., Поманский А.Б. Анализ связи технологической эффективности и рыночной капитализации компаний // Экономика и математические методы, 2000, том 36, №2, 79-87 с.
16. Гайдес М.А. Общая теория систем (системы и системный анализ). – Винница: Глобу пресс, 2005. – 201 с.
17. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. Теория автоматического управления, М: Высшая школа, 2010.
18. ГОСТ 2.701-2008. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
19. ГОСТ 24.104-85 ЕСС АСУ. Автоматизированные системы управления. Общие требования.
20. ГОСТ 34.201-89 ИТ. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем.
21. ГОСТ 34.601-90 ЕСС АСУ. Автоматизированные системы. Стадии создания.
22. ГОСТ 34.602-89 ИТ. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.
23. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». - URL: <http://gosprogrammy.gov.ru/Main/ClientBin/Passports/30/Государственная%20программа%2030.pdf>.
24. ГП «ЦДУ ТЭК». Основные показатели работы нефтяной и газовой отраслей топливно-энергетического комплекса России за январь-декабрь 2014 г. // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2.

25. Диагностика и надежность автоматизированных систем [Текст]: учеб. / Б.М.Бржозовский, А.А.Игнатьев, В.В.Мартынов, А.Г.Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2006. - 379 с.: схем.,граф.,табл. - ISBN 5-94178-116-4 (в пер.).
26. Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений // Межвузовский сборник научных трудов «Высшее образование, бизнес, предпринимательство 2001», г.Самара. – 2001. – С.149-159.
27. Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Формирование системных оценок эффективности региональных промышленных комплексов (применительно к нефтеперерабатывающим производствам) // Труды III Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» СНЦ РАН, г.Самара. – Т.1 – 2001. – С.308-320.
28. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. – 2005. - №10. – С. 56-62.
29. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления., пер. с англ. Б.И. Копылова, М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.
30. Егоров А.А., Сетин С.П., Шендрик С.Н. Разработка алгоритма обследования автоматизированных систем управления технологическим процессом переработки нефти на установках АВТ // Труды VIII Международного форума по проблемам науки, техники и образования, г. Москва. – Т.1 – 2013. – С.124-125.
31. Жилин Д.М. Теория систем: опыт построения курса. – М.: Едиториал УРГС, 2004. – 184 с.
32. Захаркин М.А., Кнеллер Д.В. Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (APC) // Датчики и Системы. - 2010. - №10. - С. 57-71.
33. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического управления Том 1 // Изд-во: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006 в 3-х томах.
34. Ицкович Э.Л. Интеллектуальность средств и систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. № 6.

35. Ицкович Э.Л. Методы рациональной автоматизации производства. М.: Инфра-Инженерия, 2009.
36. Ицкович Э.Л. Современные беспроводные сети связи в системах автоматизации на промышленных предприятиях // Датчики и системы. 2008. № 6.
37. Казиев В.М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. Изд-во ИУИТ, 2007. – 248 с.
38. Катулев А.Н., Северцев Н.А. Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечения безопасности. – М.: Физико-математическая литература., 2000. – 320 с.
39. Катулев А.Н., Северцев Н.А. Математические методы в системах поддержки принятия решений. – М.: Высш. шк., 2005. – 311 с.
40. Ким Д.П. Теория автоматического управления // Изд-во: ФИЗМАТЛИТ, 2007 в 2-х томах.
41. Комплексный аудит качества управления процессом разделения нефти на установках АВТ. Разработка рекомендаций по типовым проектным решениям локальных систем регулирования технологического режима установок АВТ// ОАО «СвНИИ НП», Отчет НИР, 2010.
42. Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем. // Автоматизация проектирования. 1999. №1.
43. Кузнецов А.В. и др. Руководство к решению задач по математическому программированию. – Минск.: Высш. шк., 2001. – 448 с.
44. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: ФОРУМ: ИНФА-М, 2006. – 512 с.
45. Лотош М.М. Основы теории автоматического управления. – М.: Наука. 1979.
46. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
47. Малин А.С., Мухин В.И. Исследование систем управления. – М.: Издат. дом ГУ ВШЭ, 2004. – 400 с.
48. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд. – М.: Химия, 2001. - 568 с.

49. Мастепанов А.М. Перспективы развития нефтяной промышленности России в оценках отечественных и зарубежных специалистов // Нефтяное хозяйство. 2014. №11,12.
50. Медоуз Д.К. и др. За пределами роста. – М.: Издат. гр. Прогресс, «Пангея», 1994. – 304 с.
51. Методы анализа АСУ химико-технологическими процессами: [Учеб.]/ И.Н. Минскер, Э.Л. Ицкович. – М. : Химия, 1990. - 120 с. : ил. - ISBN 5-7245-0539-8.
52. Минэнерго РФ. Итоги работы ТЭК России в 2013 году. Задачи на среднесрочную перспективу.
53. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
54. Моррисон Д., Юренка Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами – ключ к повышению их эффективности // Автоматизация в промышленности. – 2009. - №9. – С. 3-6.
55. Острейковский В.А. Теория надежности: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
56. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления // Издательство: «ЛАНЬ», 2010.
57. Плескач Н.В. Структуры управления с распределенным интеллектом // Промышленные контроллеры и АСУ. 2007. №9.
58. Плешивцева Ю.Э., Дервянов М.Ю., Сетин С.П. Системный анализ качества управления процессом первичной переработки нефти. // Журнал «Нефтяное хозяйство». 2014. № 8.
59. Под редакцией Пупкова К.А., Егупова Н.Д. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления // Изд-во: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2004 в 5-ти томах.
60. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления, М: Наука, 1978.
61. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
62. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности. Вопросы управления сложными системами. – М.: Наука, 2003. – 428 с.

63. Расклад сил на мировом рынке нефти, 2016. – URL: <http://www.mirnefti.ru/index.php?id=3>
64. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод параметрического синтеза  $H_\infty$ -оптимальных систем автоматического управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 1. – С. 79-90.
65. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука. 2000. - 336 с.
66. Рапопорт Э.Я. Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1995. №3.
67. Реклейтис Г., Рейвиндрон А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике, т.1,2. М.: Мир, 1986.
68. Ремизова О.А, Рудакова И.В., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Робастное управление линейным объектом с запаздыванием с применением квадратичных методов синтеза системы // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – Т.54. – №12. – С. 22-29.
69. Розенберг Л.С., Рудяк К.Б., Исаев В.Б. и др. Повышение эффективности работы установки первичной переработки нефти с помощью системы усовершенствованного управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 007. - №2. – С. 6-12.
70. Ротач В.Я. Теория автоматического управления // Изд-во: Издательский дом МЭИ, 2004.
71. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985.
72. Савин М.М., Елсуков В.С., Пятина О.Н. Теория автоматического управления (под ред. проф. В.И. Лачина). – Ростов-на Дону: Феникс, 2007, 469 с.
73. Сафронов А.Н. Обзор нефтеперерабатывающей промышленности в России и за рубежом // Нефтепереработка и нефтехимия. 2014. №12.
74. Сергиенко А.В. Цифровая обработка сигналов. – Спб.: Питер, 2002. – 608 с.
75. Сердюков О.В. и др. Магистральное направление развития промышленных контроллеров // Автоматизация в промышленности. 2007. № 12.
76. Суханов В.П. Переработка нефти. М.: Высшая школа, 1979. – 335 с., ил.

77. Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. М.: Машиностроение, 1988, 156 с.
78. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1977.
79. Системный анализ в управлении. Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин; Под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2002. - 368 с: ил.
80. Системный анализ и принятие решений. Учебн. пособие / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004. – 616 с.
81. Системный анализ и принятие решений : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1. Искусственные системы: методология структурного анализа и проектирования / М. М. Агафонов [и др.] ; под ред. В. В. Исакевича ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2005. – 92 с. ISBN 5-89368-588-1.
82. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами, М: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1993.
83. Суфиянов Р.Ш., Горбенко О.О. Элементы системного анализа. Учеб. пособие. – М.: МГУИЭ, 2009. – 52 с.
84. Тематический обзор ЦНИИТЭнефтехим «Расчетные методы оценки качественных показателей нефтей и нефтепродуктов» (серия Переработка нефти) / Н.З.Бочавер, П.С.Дейнеко, Л.И.Шокина, Г.Л.Левченко. – М.,1982.
85. Технология переработки нефти. В 2-х частях. Часть первая. Первичная переработка нефти / Под ред. О.Ф. Глаголевой и В.м. Капустина. – М.: Химия, КолосС, 2007. – 400 с.: ил. – (Учебники и учеб. Пособия для студентов высш. Учеб. Заведений).
86. Теория автоматического управления /Под ред. А.А.Воронова, М.: Высшая школа, 1986. (в 2-х томах).
87. Ушаков А.И. Методы решения простейших задач оптимального резервирования при наличии ограничений. // Изд-во: Советское радио, 1969. – 176 с.
88. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих производств». Серия 09. Выпуск 37. – 2-е изд., доп. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр

- исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 126 с. : ISBN 978-5-9687-0554-9.
89. Фейлин В.И., Брагинский О.Б., Заболоцкий С.А и др. Исследование состояния и перспектив направлений переработки нефти и газа, нефте- и газохимии в РФ. – М.: Экон-информ, 2011. – 495 с.
  90. Физико-химические свойства нефти. Энтальпия [Электронный ресурс]/ Сайт компании ООО «Д-Мобайл», 2011. - Режим доступа: <http://www.additive.spb.ru/enthalpy.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
  91. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью.- М.: Лаборатория базовых знаний, 2001, 482 с.
  92. Хаджиев С.И., Капустин В.М., Максимов А.Л., Чернышева Е.А., Кадиев Х.М., Герзелиев И.М., Колесниченко Н.В. Перспективные технологии для нефтепереработки и нефтехимии // Нефтепереработка и нефтехимия. 2014. №9.
  93. Чермак И., Петерка В., Заворка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. Перевод с чешского Кичатова Ю.Ф., Шварца И.В. — М.: Мир, 1972. - 624с., ил.
  94. Черный Ю.И. Экономико-управленческие проблемы мировой нефтепереработки.- М.: Издательский центр РГУ им. И.М. Губкина, 2012.-179 с.
  95. Шумский А.А., Шелупанов А.А. Системный анализ в защите информации. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 224 с.
  96. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. – М: Министерство энергетики Российской Федерации, 2014. – URL: <http://www.minenergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy/>
  97. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. Проект. – М: Министерство энергетики Российской Федерации, 2014. – URL: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf>
  98. Antreas D. Athanassopoulos, Nikos Lambroukos, Lawrence Seiford Data envelopment scenario analysis for setting targets to electricity generation plants Eur. J. Opl. Res. 115 (1999) 413 – 428 p.
  99. Banker R.D., Charnes A, Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. Management Science 30/9, 1984.

100. CHARNES A., COOPER W.W. and RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units, *Eur. J. Opl. Res* 1978, №2, 429 – 444 p.
101. FARRELL M.J. The measurement of productive efficiency, *J.R. Statis. Soc. Series A* 120, 1957, 253 – 281 p.
102. Magnus Tambour, Clas Rehnberg Internal markets and performance in Swedish Health Care. Stockholm School of Economics (The Economic Research Institute), Working Paper № 161 March 1997.
103. Mickael Lothgren, Magnus Tambour Alternative approaches to estimate returns to Scale in DEA-models. Stockholm School of Economics (The Economic Research Institute), Working Paper № 90 January 1996.
104. Mickael Lothgren, Magnus Tambour Productivity and customer satisfaction in Swedish pharmacies: a DEA network model. *Eur. J. Opl. Res.* 115 (1999) 449 – 458 p.
105. Minwir Al-Shammari Optimization modeling for estimating and enhancing relative efficiency with application to industrial companies. *Eur. J. Opl. Res.* 115 (1999) 488 – 496 p.
106. Norio Hibiki, Toshiyuki Sueyoshi DEA sensitive analysis by changing a reference set: regional contribution to Japanese industrial development. *Omega, Int. J. Mgmt. Sci.* 27 (1999) 139 – 153 p.
107. Thierry Post, Jaap Spronk Performance benchmarking using interactive data envelopment analysis. *Eur. J. Opl. Res.* 115 (1999) 472 – 487 p.

**Приложение А – Результаты анализа качества систем управления на примере установки АВТ-4 ОАО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод»**

Таблица А.1 - Характеристика входных потоков установки АВТ-4

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение		
<b>СЫРЬЕВЫЕ ПОТОКИ</b>								
1	1	Нефть для нефтеперерабатывающих предприятий	ГОСТ 9965		по группам			Сырьё блока ЭЛОУ
				1.Концентрация солей, мг/дм <sup>3</sup> , не более	I	II	III	
				2.Массовая доля воды, %, не более	100	300	900	
				3.Массовая доля механических примесей, %, не более	0,5	1,0	1,0	
	0,05	0,05	0,05					

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу		Назначение
				4. Давление насыщенных паров, КПа (мм рт. ст.), не более	66,7 (500)		
2	2	Бензин-отгон с гидроочисток	СТП-2021	1. Фракционный состав: - температура конца кипения, °С, не выше *	215		Для дальнейшей переработки на установках завода
*Примечание: Температура конца кипения бензин-отгона при использовании его в качестве прямогонного бензина должна быть не выше 190°С							
РЕАГЕНТЫ							
3	3	Натр едкий технический	ГОСТ 2263	1. Внешний вид	высший сорт	1 сорт	Для защелачивания бензина.
					Бесцветная или окрашенная жидкость. Допускается выкристаллизованный осадок.		

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу		Назначение
					Высший сорт	1 сорт	
				2.Массовая доля гидроксида натрия, %, не менее	46,0	44,0	
				3.Массовая доля углекислого натрия, %, не более	0,6	0,8	
				4.Массовая доля хлористого натрия, %, не более	3,0	3,8	
				5.Массовая доля железа в пересчете на F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %, не более	0,007	0,02	
				6.Массовая доля хлорноватокис-лого натрия, %, не более	0,25	0,3	
4	4	Деземulgатор импортный РЕТ 7580	Импортный (фирма Бейкер Петролайт)	1.Крепость раствора, %	1,5-2		Для обессоливания и обезвоживания нефти
5	5	Деземulgатор Геркулес 1603	ТУ 38.401-58-295-2001	1.Внешний вид	Однородная прозрачная жидкость от светло-желтого до коричневого цвета		Для обессоливания и

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение
				2. Вязкость кинематическая при 20°С, мм <sup>2</sup> /с, не более	100	обезвоживания нефти
				3. Массовая доля сухого остатка, %, в пределах	Не менее 24	
				4. Температура застывания, °С, не выше	Минус 40	
6	6	Аммиачная вода		1. Крепость приготавливаемого раствора, %	1,5-2,0	Для подавления коррозии аппаратов
7	7	Вода хим. очищенная	СТП 2025	1. Массовая концентрация хлоридов, мг/дм <sup>3</sup>	30-65	Для питания котла-утилизатора
				2. Жесткость, мг-экв/м <sup>3</sup>	0,005-0,05	
				3. Водородный показатель, рН	9-10	

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение
				4.Содержание механических примесей	Отсутствие	
8	8	Газ инертный	СТП-2019	1.Компонентный состав:		
	Объемная доля кислорода, %, не более	0,5				
	Объемная доля окиси углерода, %, не более	0,1				
	Объемная доля двуокиси углерода, %, не более	20				
	Объемная доля горючих, %, не более	0,5				
	2.Точка росы, °С, не выше	Минус 25				

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение	
КАТАЛИЗАТОРЫ							
9	9	Сода кальцинированная техническая марка Б	ГОСТ 5100		Сорт		Для подавления коррозии
					I	II	
				1. Внешний вид	Мелкокристаллический порошок белого цвета		
				2. Массовая доля углекислого натрия (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ), %, не менее	Сорт		
					I	II	
					99,0	99,0	
		3. Массовая доля углекислого натрия (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) в <u>непрокаленном</u> продукте, %, не менее	98,2	97,5			
		4. Массовая доля потери при прокаливании (при 270-300°С), %, не более	0,8	1,5			

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государстве нного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприяти я	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу		Назначение
				5.Массовая доля хлоридов в пересчете на NaCl, %, не более	0,5	0,8	
				6.Массовая доля железа в пересчете на F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %, не более	0,003	0,008	
				7.Массовая доля веществ нерастворимых в воде, %, не более	0,04	0,08	
				8.Массовая доля сульфатов в пересчете на Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %, не более	0,05	Не нормируется	
<p>Примечание: А - сырье блока вторичной перегонки установки АВТ.  Б - компонент автомобильного бензина.  В - сырье установок каталитического риформинга при производстве стабильного катализата - компонента автомобильного бензина.</p>							

Таблица А.2 - Характеристика выходных потоков установки АВТ-4

№ п/п	Номер выходного потока	Наименование выходного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу			Назначение	
1	2	3	4	5	6			7	
<b>ПОЛУФАБРИКАТЫ</b>									
1	1	Кремниевый остаток (с висбрекинга)	-	не подлежит оценке качества	-			-	
2	2	Гудрон	СТП 2007	1. Вязкость условная при 80°С с диаметром отверстия 5 мм, сек, не менее не более 2. Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже 3. Массовая доля сероводорода, ppm, не более	СБ		Сырьё битумной установки	Компонент котельного топлива	Сырьё битумной установки для производства нефтяных вязких дорожных битумов (СБ), компоненты топочного и котельного топлива
					Ив	П в			
					20-40	20-40	15	60	
					190		-	-	
					2				
3	3	Газойль легкий вакуумный	СТП 2063	1. Фракционный состав: Температура начала кипения, °С, не ниже	205			Сырьё установок каталитического крекинга, компонентов мазута	

Продолжение таблицы А.2

				Объем отгона до 350°C, %, не более	5	
				Температура конца кипения, °С, не выше	480	
				2. Массовая доля серы, %, не более	Не нормируется, определение обязательно	
				3. Содержание азота, ppm**		
				4. Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup> , не более	Не нормируется, определение обязательно	
				5. Температура застывания, °С, не выше	23	
* Значение показателя при выводе фракции топлива дизельного утяжеленного фракционного состава (УФС) в ЛВГ не нормируется, определение обязательно						
** Определяется по заданию						
4	4	Широкая фракция дизель	-	-	-	
5	5	Нефть обессоленная	СТП-2029	1. Массовая концентрация хлористых солей, мг/дм <sup>3</sup> , не более	5	Сырьё блока АВТ
				2. Массовая доля воды, %, не более	0,1	
ГОТОВАЯ ПРОДУКЦИЯ						
6	6	Фр. Нк-180*	-	-	-	
7	7	Фр. НК 130	-	-	-	
8	8	ДТЛ	-	-	-	
9	9	ДТЗ	-	-	-	
10	10	Газ сухой очищенный	СТП-2018	1. Массовая доля сероводорода, %, не более	0,02	Топливо для технологических печей завода

Продолжение таблицы А.2

				2. Массовая доля компонентов, % масс.:		
				- водорода	1-5	
				- сумма углеводородов C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub>	Не нормируется, определение обязательно	
				- сумма углеводородов C <sub>4</sub> и выше, не более	25	
				3. Низшая теплота сгорания при °С и 101,325 кПа, ккал/м <sup>3</sup> , не менее	10500	
				4. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Не нормируется, определение обязательно	
11	11	Газойль вакуумный	СТП 2013	1. Фракционный состав: - температура начала кипения, °С, не ниже - объем отгона до 360°С, %, не более - температура конца кипения, °С, не выше	205 16 520	Сырье установок каталитического крекинга, компонентов мазута
				2. Цвет в единицах ЦНТ, не более	4	
				3. Массовая доля сероводорода, ppm, не более	2	
<b>ОТХОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДЫЕ И ЖИДКИЕ ОТХОДЫ</b>						
№ п/п	Наименование отхода	Место складирования, транспорт	Периодичность образования	Условие (метод) и место захоронения, обезвреживания	Количество (кг/сутки, т/год)	Примечание

Продолжение таблицы А.2

				<b>утилизации</b>		
1	Отработанная щелочь	Е-32 Е-33	Непрерывно	На установку получения сероводорода из сульфидосодержащих отходов технологических процессов	20 т/год	
<b>СТОЧНЫЕ ВОДЫ</b>						
<b>№ п/п</b>	<b>Наименование стока</b>	<b>Количество образующихся сточных вод, м<sup>3</sup>/час</b>	<b>Условия (метод) ликвидации, обезвреживания, утилизации</b>	<b>Периодичность сбросов</b>	<b>Место сброса</b>	<b>Установленная норма содержания загрязнений в стоках, мг/л</b>
1.	Стоки блока ЭЛОУ	25,0	Очистка на очистных сооружениях	Постоянно	Нефтеловушки №№ 3,4	3000,0
2.	Стоки дренажей ёмкостей и колонн	20,0	Очистка на очистных сооружениях	Постоянно	Нефтеловушки №№ 3,4	3000,0
3.	Вода после охлаждения сальников технологических насосов	5,0	Очистка на очистных сооружениях	Постоянно	Нефтеловушки №№ 3,4	3000,0
<b>ВЫБРОСЫ В АТМОСФЕРУ</b>						
<b>№ п/п</b>	<b>Наименование выброса</b>	<b>Количество образования выбросов по видам, т/ год</b>	<b>Условие(метод) ликвидации, обезвреживания, утилизации</b>	<b>Периодичность выбросов</b>	<b>Установленная норма содержания загрязнения в выбросах, мг/м<sup>3</sup></b>	<b>Примечание</b>
1	2	3	4	5	6	7
1.	Выбросы	Серы диоксид	Не требуется	Постоянно	Серы диоксид	

Продолжение таблицы А.2

	технологических печей П-1,2,3	73,4			20,389	
		Углерода оксид 1,849	Не требуется	Постоянно	Углерода оксид 0,513	
		Азота оксид 9,569	Не требуется	Постоянно	Азота оксид 2,658	
		Азота диоксид 0,504	Не требуется	Постоянно	Азота диоксид 0,14	
		Пыль неорганическая 7,031	Не требуется	Постоянно	Пыль неорганическая 1,953	
		Ванадия пятоокись 0,022	Не требуется	Постоянно	Ванадия пятоокись 0,006	
2.	Выбросы вытяжной вентиляции	Углеводороды 0,486	Не требуется	Постоянно	Углеводороды 0,135	
		Аммиак 0,033	Не требуется	Постоянно	Аммиак 0,0093	
		Сероводород 0,005	Не требуется	Постоянно	Сероводород 0,0014	
3.	Выбросы от неплотностей технологического оборудования	Углеводороды 118,440	Не требуется	Постоянно	Углеводороды 32,900	
		Сероводород 0,001	Не требуется	Постоянно	Сероводород 0,0003	

Таблица А.3 - Характеристики входных потоков вакуумного блока

№ п/п	Номер входного потока	Наименование входного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение
1	2	3	4	5	6	7
1	1	Гудрон из Т-12	СТП 2007	-	-	-
2	2	Перегретый пар	-	Температура, не более: Количество, не более:	450°С 3,3т/ч	-
3	3	Мазут из К-2	СТП 2032	Температура, не более:	390°С	-

Таблица А.4 - Характеристики выходных потоков вакуумного блока

№ п/п	Номер выходного потока	Наименование выходного потока	Номер государственного или отраслевого стандарта, технических условий, стандарта предприятия	Показатели качества, подлежащие проверке	Норма по нормативному документу	Назначение
1	2	3	4	5	6	7
1	1	Гудрон на Т-8		Температура, не более	370°С	
2	2	Легкий вакуумный газойль		См. Таблицу А.2 пункт 1		
3	3	Вакуумный газойль		См. таблицу А.2 пункт 2		
4	4	Легкий вакуумный газойль на Т-5		См. Таблицу А.2 пункт 1		
5	5	Вакуумный газойль на Т-2		Температура, не более	283°С	
6	6	3 Ц.О К-5 на Т-11-1 и Т-11/2 Т-7		Расход, не более: Температура, не более:	91т/ч 160°С	
7	7	Гудрон		См. Таблицу 2 пункт 5,9		

## Продолжение таблицы А.4

8	8	Фракция дизельного топлива	См. Таблицу А.2 пункт 6			
9	9	Фракция Дизельного топлива утяжелённого фракционного состава	См. Таблицу А.2 пункт 7			
10	10	Фр. 180 на блок защелачивания		Температура, не более	180°С	

Таблица А.5 - Перечень технологических операторов блока АВТ установки АВТ-4

№ п/п	№ ТО	Наименование технологического оператора	Назначение	Наименование технологического оборудования (элемента)	Кол-во входных ТП	Кол-во выходных ТП	Перечень входных ТП	Перечень выходных ТП
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАТОРЫ</b>								
1	1	Механическое разделение	Разделение потока обессоленной нефти на 2 потока для подачи в теплообменники	Тройник трубопроводов	1	2	Поток обессоленной нефти	2 потока обессоленной нефти
2	2	Механическое разделение	Разделение потока обессоленной нефти на 2 потока для подачи в теплообменники	Тройник трубопроводов	1	2	Поток обессоленной нефти	2 потока обессоленной нефти
3	12	Смешение	Смешение 2 потоков обессоленной нефти для подачи в колонну К-1	Тройник трубопроводов	2	1	2 потока обессоленной нефти	Поток обессоленной нефти
4	13	Смешение	Смешение 2 потоков обессоленной нефти для подачи в колонну К-1	Тройник трубопроводов	2	1	2 потока обессоленной нефти	Поток обессоленной нефти
5	14	Смешение	Подача "Горячей струи" в колонну К-1	Колонна К-1	2	1	"Горячая струя", фракции К-1	фракции К-1

Таблица А.6 - Обозначение блоков установки АВТ-4

<b>№ п/п</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Наименование</b>
1	А	Атмосферный блок
2	В	Вакуумный блок

Таблица А.7 - Обозначение основных технологических потоков

<b>№ п/п</b>	<b>Номер основного потока</b>	<b>Наименование</b>
1	1	Сырая нефть из ТСБ
2	2	Эмульсия сырой нефти и воды
3	3	Обессоленная нефть
4	4	Отбензиненная нефть
5	5	Головной погон, газообразный
6	6	Головной погон, жидкий
7	7	Газ
8	8	Пар
9	9	Фр. 130-180 газообразная
10	10	Фр.130-180 жидкая
11	11	Циркулирующая флегма I орошения колонны К-2, газообразная
12	12	Циркулирующая флегма I орошения колонны К-2, жидкая
13	13	Фр.180-240 жидкая
14	14	Отпаренные фракции колонны К-3
15	15	Фр. 240-350 жидкая
16	16	Отпаренные фракции колонны К-4
17	17	Циркулирующая флегма II орошения колонны К-2 жидкая
18	18	Рефлюкс
19	19	Вода
20	20	Фракции ДТ
21	21	Жидкое топливо
22	22	Дымовые газы
23	23	Мазут
24	24	Отпаренные фракции колонны К-5
25	25	Конденсат водяного пара и нефтяных паров
26	26	Газы разложения
27	27	Фракция 320-350
28	28	ЛВГ
29	29	ВГ
30	30	Гудрон

Таблица А.8 – Перечень параметров технологического потока

№ п/п	Номер параметра	Наименование параметра ТП	Единицы измерения
1	1	Температура	°С
2	2	Расход	м <sup>3</sup> /час
3	3	Давление	кПа
4	4	Массовая доля	%
5	5	Массовая концентрация	мг/дм <sup>3</sup>
6	6	Плотность	кг/м <sup>3</sup>
7	7	Фракционный состав	°С, %
8	8	Содержание	% масс., мг/дм <sup>3</sup>
9	9	Объемная доля	%
10	10	Теплота сгорания	кКал/м <sup>3</sup>
11	11	Октановое число	ед.
12	12	Детонационная стойкость	ед.
13	13	Кинематическая вязкость	мм <sup>2</sup> /с
14	14	Температура вспышки	°С
15	15	Температура начала кристаллизации	°С
16	16	Температура застывания	°С
17	17	Температура начала кипения	°С
18	18	Температура помутнения	°С
19	19	Предельная температура фильтруемости	°С
20	20	Температура текучести	°С
21	21	Объем выкипания	%
22	22	Йодное число	г. йода на 100 г. топлива
23	23	Цвет на колориметре ЦНТ	Ед. ЦНТ
24	24	Условная вязкость	сек.
25	25	Жесткость	мкг-экв/дм <sup>3</sup>
26	26	Прозрачность по шрифту	см.
27	27	рН	ед.
28	28	Солесодержание (в пересчете на NaCl)	мг/дм <sup>3</sup>
29	29	Щелочность	мг-экв/дм <sup>3</sup>

Таблица А.9 – Перечень технологических потоков вакуумного блока установки АВТ-4

<b>№ п/п</b>	<b>Шифр потока</b>	<b>Наименование технологического потока</b>
1	В_23_АВТ_К-2_1	мазут из колонны К-2 в на насос Н-11а, Н-11б, Н-11
2	В_23_1_3	мазут из колонны К-2 в на вход насоса Н-11
3	В_23_1_2	Мазут из К-2 на вход насосов Н-11а, Н-11б
4	В_23_2_4	мазут из К-2 на вход насоса Н-11а
5	В_23_2_5	мазут из К-2 на вход насоса Н-11б
6	В_23_3_6	мазут с выхода насоса Н-11 в печь П-3
7	В_23_4_6	мазут с выхода насоса Н-11а в печь П-3

Таблица А.10 – Перечень САР вакуумного блока установки АВТ-4

<b>№ п/п</b>	<b>Шифр САР</b>	<b>Наименование</b>
1	В_4_1	САР температуры мазута на выходе из печи П-3
2	В_1_2	САР расхода жидкого топлива в печь П-3
3	В_1_3	САР расхода перегретого пара в печь П-3
4	В_4_4	САР уровня в атмосферной колонне К-2
5	В_4_5	САР температуры низа вакуумной колонны К-5
6	В_2_6	САР расхода I циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5
7	В_1_7	САР расхода II циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5
8	В_1_8	САР расхода III циркуляционного орошения в вакуумной колонне К-5
9	В_4_9	САР расхода гудрона из вакуумной колонны К-5
10	В_2_10	САР расхода дизельной фракции на выходе из вакуумной колонны К-5

Таблица А.11 – Общая характеристика САР

№	Шифр САР	Наименование ТП	Управляющее воздействие	Количество контуров управления	Функциональное назначение контуров	Вид системы	Состояние системы на момент обследования
1	В_4_1	САР температуры мазута на выходе из печи П-3	Расход топлива	2	Внешний: Регулирование температуры мазута на выходе  Внутренний: Регулирование расхода топлива к форсункам печи П-3	Стабилизации  Статическая	Рабочее

Таблица А.12 – Перечень параметров технологического оборудования

Шифр САР: В_4_1		Наименование: САР температуры мазута на выходе из П-3		
№ п/п	Наименование оборудования	Шифр параметра оборудования	Наименование параметра	Единицы измерения
1	2	3	4	5
1	Печь П-3	В_4_1_56_1	Температура	°С

Таблица А.13 – Перечень параметров технологических потоков

Шифр САР: В_4_1		Наименование: САР температуры мазута на выходе из П-3		
№ п/п	Наименование потока	Шифр параметра потока	Наименование параметра	Единицы измерения параметра
1	Мазут в печь П-3 (поток 1)	В_23_6_7_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_23_6_7_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_23_6_7_1	Температура	°С
2	Мазут в печь П-3 (поток 2)	В_23_6_7_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_23_6_7_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_23_6_7_1	Температура	°С
3	Газы разложения с выхода Б-3, на сжигание в П-3	В_23_19_в П-3_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_23_19_в П-3_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_23_19_в П-3_1	Температура	°С
4	Мазут с выхода печи П-3 на вход колонны К-5	В_23_7_8_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_23_7_8_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_23_7_8_1	Температура	°С
5	Жидкое топливо в П-3	В_21_Ж.Т_90_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_21_Ж.Т_90_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_21_Ж.Т_90_1	Температура	°С
6	Газ топливный в П-3	В_21_Г.Т_91_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_21_Г.Т_91_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_21_Г.Т_91_1	Температура	°С
7	Пар в П-3	В_8_В.П_92_2	Расход	м <sup>3</sup> /час
		В_8_В.П_92_3	Давление	кгс/см <sup>2</sup>
		В_8_В.П_92_1	Температура	°С

Таблица А.14 – Характеристика параметров САР

ШИФР САР: В_4_1			НАИМЕНОВАНИЕ: САР температуры мазута на выходе из П-3																	
№ П/П	ШИФР ПАРАМЕТРА	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	ВХОДНОЙ	ВЫХОДНОЙ	УПРАВЛЯЕМЫЙ	УПРАВЛЯЮЩИЙ	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ								СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ КОНТРОЛЯ			СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ РЕГИСТРАЦИИ		
							РУЧНОЕ	АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ	ИНФОРМАЦИОННО-СОВЕТУЮЩИЙ РЕЖИМ	СУПЕРВИЗОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ	НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ЦИФРОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ	АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ	АВТОМАТИЧЕСКОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ	ДРУГИЕ СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ (УКАЗАТЬ)	ПРИБОР ПО МЕСТУ	ПРИБОР НА ЦИТЕ	КОМПЬЮТЕР (МИКРОПРОЦЕССОР)	ВРУЧНУЮ	С ПОМОЩЬЮ САМОПИСЦЕВ	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>КОНТУР 1</b>																				
1	В_21_Ж.Т_90_2	Расход	+			+		+									+			+
<b>КОНТУР 2</b>																				
2	В_23_6_7_1	Температура		+	+			+									+			+

Таблица А.15 – Характеристика качества управления САР

ШИФР САР: В_4_1					НАИМЕНОВАНИЕ: САР температуры мазута на выходе из П-3															
№ П/П	ШИФР ПАРАМЕТРА	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	ПРИОРИТЕТ ПАРАМЕТРА	ПРИОРИТЕТ ПОТОКА	ТРЕБОВАНИЯ К САР В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ									ТРЕБОВАНИЯ К САР В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ						ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ САР
					МАКСИМАЛЬНОЕ ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕ			ВРЕМЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ			СТЕПЕНЬ ЗАТУХАНИЯ			УСТАНОВИВШЕЕСЯ ЗНАЧЕНИЕ			МАКСИМАЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ОШИБКА			
					ЗАДАННОЕ	ФАКТИЧЕСКОЕ	СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)	ЗАДАННОЕ	ФАКТИЧЕСКОЕ	СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)	ЗАДАННАЯ	ФАКТИЧЕСКАЯ	СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)	ЗАДАННОЕ	ФАКТИЧЕСКОЕ	СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)	ЗАДАННАЯ	ФАКТИЧЕСКАЯ	СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	В_21_ЖТ_90_2	Расход	2	2	20%	12%	0	150	163	0	0,06	0,02	0	150	142	0	5	4,7	0	0
2	В_23_6_7_1	Температура	1	1	15%	5%	0	140	170	0	0,04	0,02	0	355	347	0	5	4,5	0	0

Таблица А.16 - Требования к измерению параметров технологических потоков установки АВТ-4

№ П/П	ШИФР ПОТОКА	НАИМЕНОВАНИЕ ПОТОКА	ПРИОРИТЕТ ПОТОКА	НОМЕР ПАРАМЕТРА	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	ПРИОРИТЕТ ПАРАМЕТРА	ГОСУДАРСТВЕННОГО ИЛИ ОТРАСЛЕВОГО СТАНДАРТА, ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, СТАНДАРТА	НОРМА ПО НОРМАТИВНОМУ ДОКУМЕНТУ	ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРА				СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ			ТИП АРХИВИРОВАНИЯ		ДОПУСТИМАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ, 1/ЧАС.
									ДОПУСТИМАЯ ПОГРЕШНОСТЬ		ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	ШКАЛА	ДИСПЛЕЙ	МНЕМΟΣХЕМА	НА БУМАГЕ	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ	
									АБСОЛЮТНАЯ	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	В_12_4_8	Гудрон после аппаратов воздухоохлаждения Т-9/1,2	1	1	Температура	1	Стандарт предприятия	80°С	±1°С	±5%	1мс	постоянно	-	+	+	-	+	2·10 <sup>-6</sup>
				2	Расход	2	Стандарт предприятия	5 м <sup>3</sup> /ч	±0,01 м <sup>3</sup> /ч	±3%	1мс	постоянно	-	+	+	-	+	4·10 <sup>-5</sup>
				7	Условная вязкость	1	ТУ 38.301-13-020-98 с изм.1	при 80°С ч/з отверстие диаметром 5мм. не менее 20 сек.	±2сек	±4%	20сек	3 раза в сутки	-	-	-	-	-	1·10 <sup>-8</sup>
				15	Температура вспышки	1	ТУ 38.301-13-020-98 с изм.1	210°С	±3°С	±5%	1сек	3 раза в сутки	-	+	-	-	+	2·10 <sup>-5</sup>

Таблица А.17 - Оценка существующих приборов для измерения параметров технологических потоков установки АВТ-4

№ П/П	ШИФР ПОТОКА	НОМЕР ПАРАМЕТРА	ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ																СООТВЕТСТВИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПАРАМЕТРА (0 ИЛИ 1)	ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ДЛЯ ПОТОКА (0 ИЛИ 1)	
			НАИМЕНОВАНИЕ ПРИБОРА	МАРКА ПРИБОРА	ЗАВОДСКОЙ НОМЕР	ПОЗИЦИЯ НА СХЕМЕ КИШИ	ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА В МОМЕНТ АУДИТА	КЛАСС ТОЧНОСТИ	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПОВЕРКИ	ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПОВЕРКИ	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ			ТИП АРХИВИРОВАНИЯ					ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ, 1/ЧАС
													ШКАЛА	ДИСПЛЕЙ	МНЕМΟΣХЕМА	НА БУМАГЕ	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ	ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ, 1/ЧАС			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	В_12_4_8	1	Термометр	ТХК	03245	0616	79°С	1	1 раз в полгода	12.09.2010	1 мс	постоянно	-	+	+	-	+	1,5·10 <sup>-6</sup>	1	0	
		2	Ультразвуковой расходомер	Prosonic Flow 90/93 W	12978	0032	4,8м <sup>3</sup> /ч	0,5	1 раз в полгода	08.08.2010	1 мс	постоянно	-	+	-	-	+	2·10 <sup>-5</sup>	0		
		7	Вискозиметр	ВЗ-246	457893	лаборатория	22сек.	-	1 раз в год	08.08.2010	22с	3 раза в сутки	-	-	-	-	-	-	5·10 <sup>-7</sup>		0
		15	Закрывающий тигель	ТВЗ	1728	лаборатория	210°С	1	1 раз в полгода	06.08.2010	1мин	3 раза в сутки	-	+	-	-	+	+	1·10 <sup>-5</sup>		1
		16	Влагомер	ВАД-40	32178	лаборатория	0,21%	2,5	1 раз в полгода	07.10.2010	5 с	1 раз в сутки	-	+	-	+	-	-	9·10 <sup>-8</sup>		1

Таблица А.18 - Требования к измерению параметров оборудования установки АВТ-4

№ П/П	ОБОЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ	НАИМЕНОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ	ШИФР ПАРАМЕТРА ОБОРУДОВАНИЯ	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА ОБОРУДОВАНИЯ	НОМЕР ГОСУДАРСТВЕННОГО ИЛИ ОТРАСЛЕВОГО СТАНДАРТА, ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, СТАНДАРТА ПРЕДПРИЯТИЯ	НОРМА ПО НОРМАТИВНОМУ ДОКУМЕНТУ	ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРА				ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПОВЕРКИ ПРИБОРА	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ КОНТРОЛЯ			СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ			ДОПУСТИМАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ПРИБОРА, 1/ЧАС.
							ДОПУСТИМАЯ ПОГРЕШНОСТЬ		ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ		ПО МЕСТУ	НА ЦИТЕ	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	ВРУЧНУЮ	С ПОМОЩЬЮ САМОПИСЦА	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ	
							АБСОЛЮТНАЯ	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	Б	Барометрический ящик	В_1_7_Б_2	Уровень	Стандарт предприятия	50%	±0,5%	±2%	10 с	Постоян- но	Раз в полгода	+	-	-	-	+	-	0,2·10 <sup>-6</sup>
2	К-13	Отпарная колонна К-13	В_1_19_К- 13_6	Уровень	Стандарт предприятия	50%	±0,3%	±1,5%	20 с	Постоян- но	Раз в полгода	+	-	-	-	+	-	0,15·10 <sup>-6</sup>
3	К-10	Вакуумная колонна К-10	В_1_22_К- 10_8	Уровень	Стандарт предприятия	45%	±0,7%	±0,8%	15 с	Постоян- но	Раз в 3 месяца	-	+	-	-	-	+	0,5·10 <sup>-6</sup>

Таблица А.19 - Оценка существующих приборов для измерения параметров оборудования установки АВТ-4

№ П/П	ОБОЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ	ШИФР ПАРАМЕТРА ОБОРУДОВАНИЯ	ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ																		
			НАИМЕНОВАНИЕ ПРИБОРА	МАРКА ПРИБОРА	ЗАВОДСКОЙ НОМЕР	ПОЗИЦИЯ НА СХЕМЕ КИПША	ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА В МОМЕНТ АУДИТА	КЛАСС ТОЧНОСТИ	ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПОВЕРКИ	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ КОНТРОЛЯ				СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ				ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ПРИБОРА	
												ПО МЕСТУ	НА ЦИТЕ	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ (0 ИЛИ 1)	ВРУЧНУЮ	С ПОМОЩЬЮ САМОПИСЦА	КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ	ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ (0 ИЛИ 1)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	Б	В_1_7 _Б_2	Гидро- статический уровнемер	Endres Hauser Deltapi lot S DB51	1154 9	1023	49 %	0.5	12.1 0.20 10	7 с	Пост оянно	+	-	-	1	-	+	-	1	0,17·10 <sup>-6</sup>	1
2	К-13	В_1_1 9_К- 13_6	Гидро- статический уровнемер	Endres Hauser Deltapi lot S DB52 A	5632 8	4-13	52 %	0.5	11.1 2.20 10	15 с	Пост оянно	+	-	-	1	-	+	-	1	0,15·10 <sup>-6</sup>	1
3	К-10	В_1_2 2_К- 10_8	Гидро- статический уровнемер	Endres Hauser Deltapi lot S DB53 A	4796 3	1026	44 %	0.5	5.01 201 1	10 с	Пост оянно	-	+	-	1	-	-	+	1	0,5·10 <sup>-6</sup>	1

Таблица А.20 - Оценка подсистем АСБ и ПАЗ на соответствие предъявляемым требованиям работоспособности

№ П/П	НАИМЕНОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ	ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ	НАЛИЧИЕ АНКЕТЫ О ПРОВЕРКЕ	СООТВЕТСТВИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРКИ ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ ТРЕБОВАНИЯМ (0 ИЛИ 1)
Насосы				
1	Н 1-1	12.11.2010	+	1
2	Н 1-2	15.09.2010	+	1
3	Н 1-3	07.01.2011	+	1
4	Н 3-1	08.11.2010	+	1
5	Н 3-2	08.11.2010	+	1
Теплообменники				
6	Т 38/1	23.12.2010	+	1
7	Т 46/1	24.12.2010	+	1
8	Т 9/2.1	27.11.2010	+	1
9	Т 9/2.2	19.12.2010	+	1
10	Т 15/1.1	16.12.2010	+	1
Вентили				
11	1АВ-1	19.11.2010	+	1
12	1В-1	1.10.2010	+	1
13	2В-1	16.11.2010	+	1
14	1П-1	15.12.2010	+	1
15	1П-2	16.12.2010	+	1
Задвижки				
16	NS1	11.11.2010	+	1
17	NS2	12.11.2010	+	1
18	N4	12.11.2010	+	1
19	N5	3.12.2010	+	1
20	N6	4.12.2010	+	1
Отсекатели				
21	GA2550	16.12.2010	+	1
22	GA2551	15.12.2010	+	1
23	GA2552	15.12.2010	+	1
24	GA2553	14.12.2010	+	1
25	GA2554	13.12.2010	+	1

Таблица А.21 - Характеристика нефтяных продуктов, принятых в переработку

№ П/П	НАИМЕНОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ ПРОДУКТОВ	КОЛИЧЕСТВО, тн	
		ПО ПЛАНУ	ФАКТИЧЕСКИ
1	Нефть обессоленная	3 437 808	3 454 435
2	Бензин-отгон	9 700	9 704
	<b>ИТОГО:</b>	<b>3 447 508</b>	<b>3 464 139</b>

Таблица А.22 - Характеристика нефтяных продуктов, полученных из переработки

№ П/П	НАИМЕНОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ ПРОДУКТОВ	КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТА			
		ПО ПЛАНУ		ФАКТИЧЕСКИ	
		тн	%	тн	%
<i>Светлые фракции</i>					
1	Широкая бензиновая фракция	638 745	18,53	641 936,011	18,62
2	в т.ч. С1-С4	86 764	2,52	87 222,011	2,53
3	в т.ч. НК-180°С	551 981	16,01	554 714	16,09
4	Фракция дизельного топлива	1 024 989	29,73	1 029 918	29,87
5	в т.ч. летнее	963 017	27,93	967 611	28,07
6	зимнее	61 972	1,80	62 307	1,81
Итого по светлым:		1 576 970	45,74	45,74	45,74
<i>Масляные дистилляты</i>					
7	Тяжелый вакуумный газойль	360 732	10,46	362 534	10,52
8	Легкий вакуумный газойль	316 729	9,19	318 230	9,23
Итого по масляным дистиллятам:		677 461	19,65	680 764	19,66
<i>Гудрон</i>					
9	Гудрон	1 100 808	31,93	1 105 999,269	32,08
<i>Побочные продукты и потери</i>					
10	Потери	5 505	0,16	5 521,720	0,16
Итого по потерям и побочным продуктам:		5 505	0,16	5 521,720	0,16
<b>ИТОГО:</b>		<b>3 447 508</b>	<b>100,00</b>	<b>3 464 139</b>	<b>100,00</b>

Таблица А.23 - Определение количества потребляемого установкой тепла в расчете на тонну сырья

№ П/П	НАИМЕНОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ ПРОДУКТОВ	ФРАКЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ				РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ		РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ		РАЗНОСТЬ ЭНТАЛЬПИИ ФРАКЦИЙ МЕЖДУ ЖИДКОЙ И ПАРОВОЙ ФАЗОЙ $\Delta H$ , КДЖ	КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ИСПАРЕНИЯ ФРАКЦИИ, КДЖ		
		ПРЕДЕЛЫ ВЫКИПАНИЯ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ				СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ФРАКЦИИ $D_{\text{фр}}$ , КГ/М <sup>3</sup>	РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА НА ВХОДЕ УСТАНОВКИ $T_{\text{раб}}^{\text{фр}}$ , °С	ЭНТАЛЬПИЯ ФРАКЦИИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ $H_{\text{ж}}^{\text{фр}}$ , КДЖ	ТЕМПЕРАТУРА ПЕРЕВОДА ФРАКЦИИ В ПАРОВУЮ ФАЗУ, °С		ЭНТАЛЬПИЯ ФРАКЦИИ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ $H_{\text{п}}^{\text{фр}}$ , КДЖ	ПО ПЛАНУ $Q_n^{\text{фр}}$	ФАКТИЧЕСКИ $Q_{\text{ф}}^{\text{фр}}$
		НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА $T_n^{\text{фр}}$ , °С	КОНЕЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, $T_k^{\text{фр}}$ , °С	СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ВЫКИПАНИЯ $T_{\text{ср}}^{\text{фр}}$ , °С									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<i>Светлые фракции</i>													
1	Широкая бензиновая фракция	35	205	120	0,7432	52	107,114	210	770,459	663,345	122,9028	123,5168	
2	в т.ч. С1-С4	50	180	115	0,7382	60	125,0127	180	705,1977	580,1849	14,6016	14,6787	
3	в т.ч. НК-180°С	80	180	130	0,7528	92	195,4197	180	700,6346	505,215	80,89	81,2905	
4	Фракция дизельного топлива	240	350	295	0,8575	240	542,8871	350	1076,6109	533,7238	158,683	159,4461	
5	в т.ч. летнее	240	340	290	0,8552	240	543,604	340	1050,6407	507,0367	141,6342	142,3098	
6	зимнее	240	360	300	0,8598	240	542,1804	360	1103,0078	560,8274	10,08137	10,1359	

Продолжение таблицы А.23

№ П/П	НАИМЕНОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ ПРОДУКТОВ	ФРАКЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ				РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ		РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ		РАЗНОСТЬ ЭНТАЛЬПИЙ ФРАКЦИЙ МЕЖДУ ЖИДКОЙ И ПАРОВОЙ ФАЗОЙ $\Delta H_n$ , кДж	КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ИСПАРЕНИЯ ФРАКЦИИ, кДж	
		ПРЕДЕЛЫ ВЫКИПАНИЯ ПРОДУКТОВЫХ ФРАКЦИЙ			СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ФРАКЦИИ $D_{фр}$ , кг/м <sup>3</sup>	РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА НА ВХОДЕ УСТАНОВКИ $T_{р.об}^{фр}$ , °С	ЭНТАЛЬПИЯ ФРАКЦИИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ $H_{ж}^{фр}$ , кДж	ТЕМПЕРАТУРА ПЕРЕВОДА ФРАКЦИИ В ПАРОВУЮ ФАЗУ, °С	ЭНТАЛЬПИЯ ФРАКЦИИ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ $H_{п}^{фр}$ , кДж		ПО ПЛАНУ $Q_n^{фр}$	ФАКТИЧЕСКИ $Q_{ф}^{фр}$
		НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА $T_{н}^{фр}$ , °С	КОНЕЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА $T_{к}^{фр}$ , °С	СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ВЫКИПАНИЯ $T_{ср}^{фр}$ , °С								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Итого по светлым:											528,793	531,3778
<i>Масляные дистилляты</i>												
7	Тяжелый вакуумный газойль	320	520	420	0,9071	250	569,5693	520	1592,1103	1022,541	106,9942	107,5287
8	Легкий вакуумный газойль	205	480	342,5	0,8781	152	315,5842	480	1449,303	1133,7187	104,1569	114,650
Итого по масляным дистиллятам:											211,151	222,179
<i>Гудрон</i>												
9	Гудрон	80	370	225	0,8217	80	161,0066	370	1148,4311	987,4245	315,2899	316,7769
<i>Побочные продукты и потери</i>												
10	Потери				0,55	10	22,75	320	1212,5	1189,75	1,8998	1,9056
Итого по побочным продуктам и потерям:											1,8998	1,9056
<b>ИТОГО:</b>											<b>1057,1338</b>	<b>1072,2393</b>

Справка № 03-06/281А от 02.07.2015 г. об использовании результатов диссертации в процессе промышленной эксплуатации АСУ ТП установки АВТ-4 в АО «КНПЗ»



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КУЙБЫШЕВСКИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД»**  
(ОАО «КНПЗ»)

Почтовый юридический адрес: ул. Грозненская, д. 25, г. Самара, 443004  
Телефон: (846) 307-32-18/33-77, факс: (846) 307-47-77, 263-86-86, e-mail: sekret@knpz.rosneft.ru  
ОКПО 05766505, ОГРН 1026300894179, ИНН/КПП 6314006396/997150001

От 02.07.2015 г. № 03-06/281А

По месту требования

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

*Об использовании результатов  
кандидатской диссертации*

Справка

Основные выводы и рекомендации диссертации Сетина Сергея Петровича «Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использовались в процессе промышленной эксплуатации АСУ ТП установки АВТ-4 на предприятии АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод».

Использование методик системного анализа уровня автоматизации и качества управления АСУ ТП на установке АВТ-4 позволило выявить локальные контуры управления, требующие оптимизации структуры и параметров настройки регуляторов.

По сравнению с типовыми вариантами определения параметров настройки контуров управления, предлагаемые автором методы и алгоритмы обеспечили оперативную и точную настройку контуров, что позволило повысить качество продуктов первичной переработки нефти на установке АВТ-4.

Главный технолог



Ю.А. Макаренко

Справка № 35-9944 от 30.06.2015 г. об использовании результатов диссертации в АО «НК НПЗ»



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НОВОКУЙБЫШЕВСКИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД»**  
(АО «НК НПЗ»)

Почтовый/юридический адрес: ул. Осипенко, 12 строение 1, г. Новокуйбышевск, Самарская область, 446207  
Тел: (84635) 3-44-12, факс: (846) 307-42-52; (84635) 6-12-38, e-mail: sekret@nknz.rosneft.ru  
ОКПО 05766600, ОГРН 1026303118126, ИНН/КПП 6330000553/997150001

от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**30.06.2015 г. № 35-9944**

**По месту требования**

**Справка  
об использовании результатов,  
полученных в кандидатской диссертации Сетина С.П.  
«Системный анализ и управление процессами первичной  
переработки нефти»**

Основные выводы и рекомендации, полученные в диссертации Сетина Сергея Петровича «Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использовались на установках первичной переработки нефти на предприятии АО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод», что позволило оптимизировать процесс настройки локальных контуров регулирования в многоконтурных системах управления установками АВТ-9 и АВТ-11 и повысить качество продуктов нефтепереработки.

Заместитель Генерального директора  
по развитию



А.А. Гаврилов

Исп. Овсиенко А.Н.

Акт от 16.11.2015 г. о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке магистров и бакалавров по направлениям «Системный анализ и управление», «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Управление в технических системах»

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор  
по учебной работе  
Самарского государственного  
технического университета  
Д.А. Деморецкий, профессор



Д.А. Деморецкий  
«16» 11 2015 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
С.П. Сетина, представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук, в учебном процессе  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Комиссия в составе начальника управления высшего образования университета к.т.н., доцента А.Н. Лукьяновой, заведующего кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», д.т.н., доцента М.Ю. Лившица и председателя методического совета ТЭФ Е.А. Володина составила настоящий акт о том, что в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» использованы следующие результаты кандидатской диссертации С.П. Сетина «Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти»:

1. Методика проведения системного анализа уровня автоматизации и качества управления процессом первичной переработки нефти на установках атмосферно-вакуумной трубчатки использовалась при подготовке бакалавров по направлениям 27.03.03 «Системный анализ и управление» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».
2. Методики решения задач оптимизации по частотным критериям качества типовых регуляторов в многоконтурной каскадной системе автоматического управления использовались в курсовом и дипломном проектировании бакалаврами по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 15.04.01 «Автоматизация техпроцессов», магистрами по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах».

Начальник УВО СамГТУ  
к.т.н., доцент



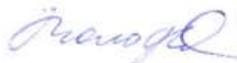
А.Н. Лукьянова

Зав. кафедрой УСАТСК  
д.т.н., доцент



М.Ю. Лившиц

Председатель методического  
совета ТЭФ



Е.А. Володин