

Работа выполнена в ГБОУ ВПО «Альметьевский государственный нефтяной институт» на кафедре «Автоматизации и информационных технологий»

На правах рукописи

ГОРШКОВА КРИСТИНА ЛЕОНИДОВНА

**Системный анализ и автоматическое управление процессом
транспортировки вязкой нефти**

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

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Т.В. Табачникова

Альметьевск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения, принятые по тексту диссертации	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ НЕФТИ	10
1.1 Системный анализ особенностей сложных производственных объектов и процессов нефтегазодобывающего предприятия	10
1.2 Системная формализация видов неопределенности с помощью теории нечетких множеств.....	12
1.3 Анализ первичной подготовки и транспортировки потоков нефти	14
1.4 Структурный анализ технологического процесса предварительной подготовки потоков нефти	19
1.5 Анализ и сравнение известных методов управления	24
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ	30
ГЛАВА 2 ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОСЕРНИСТОЙ И СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ	31
2.1 Разработка основных критериев качества управления температурным режимом технологического процесса первичной подготовки и транспортировки потоков нефти.....	34
2.2 Определение факторов, влияющих на критерии качества технологического процесса тепловой обработки потоков нефти и ее транспортировки	37
2.3 Систематизация математических моделей компонентов объекта управления	42
2.3.1 Математическая модель нефтепровода	43
2.3.2 Математическая модель емкости для сырой высокосернистой нефти	45
2.3.3 Математическая модель замерной емкости для сверхвязкой нефти	47
2.3.4 Математическая модель емкости для смешивания высокосернистой и сверхвязкой нефти.....	50
2.3.5 Математическая модель электропривода задвижки.....	51
2.3.6 Математическая модель насосного агрегата.....	56
2.3.7 Систематизация функционально-ориентированной модели объекта управления при тепловой обработке транспортируемых потоков высокосернистой и сверхвязкой нефти.....	57
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	60
ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ С ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ.....	61
3.1 Анализ результатов верификации в производственных условиях компонентов функционально-ориентированной модели как базового блока идентификатора ..	67
3.1.1 Анализ результатов верификации температуры высокосернистой нефти	69
3.1.2 Анализ результатов верификации температуры сверхвязкой нефти	70
3.1.3 Анализ результатов верификации температуры смешанной нефти	72
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	73

ГЛАВА 4	РАЗРАБОТКА	СТРУКТУРЫ	ФУНКЦИОНАЛЬНО
ОРИЕНТИРОВАННОЙ	НА	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	В КАЧЕСТВЕ
ИДЕНТИФИКАТОРА СОСТОЯНИЯ	МАТЕМАТИЧЕСКОЙ	МОДЕЛИ С	
СИНТЕЗОМ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ И	МЕТОДИКА ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ		74
4.1 Восстановление вектора состояния по его оценке наблюдателем	(идентификатором)		75
4.2 Разработка алгоритма управления и методики идентификации функционально-	ориентированной модели температуры потока смешанной нефти		77
4.3 Синтез нечетких алгоритмов управления на основе метода векторных функций	Ляпунова		81
4.4. Анализ построения оценок областей устойчивого функционирования систем	управления		86
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ			91
ГЛАВА 5	РАЗРАБОТКА	СТРУКТУРНОЙ	СХЕМЫ АДАПТИВНОЙ
ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	ТЕМПЕРАТУРОЙ	ПОТОКА НЕФТИ	92
5.1 Разработка структурной схемы адаптивной системы автоматического	управления по регулированию температурой потока смешанной нефти с	идентификатором состояния	92
5.2 Разработка нечеткой системы управления температурой потоков нефти			95
5.2.1 Определение состава и характеристики входных и выходных переменных	нечеткого регулятора		96
5.2.2 Нечеткий логический вывод и дефаззификация выходного показателя			96
5.2.3 Математическая модель нечеткой базы знаний и организация данных в базе	знаний		97
5.3 Адаптивная система управления с детерминированным звеном и нечетким	регулятором в приложении Simulink пакета MatLab		103
5.4 Результаты математического моделирования			107
ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ			110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ			111
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ			112
Приложение 1			130
Приложение 2			131
Приложение 3			133
Приложение 4			161
Приложение 5			164

Сокращения, принятые по тексту диссертации

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
БДФ – блок дефазификации;
БФЗ – блок фазификации;
БЗ – база знаний;
БР – блок решений;
ВФЛ – метод векторных функций Ляпунова;
ВСН – высокосернистая нефть;
ЛП – лингвистические переменные;
НГДП – нефтегазодобывающее предприятие;
НГДУ – нефтегазодобывающее управление;
НР – нечеткий регулятор;
НП – нечеткие правила;
ОУ – объект управления;
ПИД – пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор;
ПИ – пропорциональный интегральный регулятор;
САУ – система автоматического управления;
СС – система сравнения;
СУ – систем управления;
СВН – сверхвязкая нефть;
УПВСН– установка предварительной подготовки высокосернистой нефти;
УПСВН – установка предварительной подготовки сверхвязкой нефти;
УПН – установка подготовки нефти;
ФП – функции принадлежности;
ФОМ – функционально-ориентированная модель;
OPC – OLE for Process Control – связывание и встраивание объектов для управления процессом;
CPU (central processing unit) – модуль процессора;
PCI – Protocol Control Information – управляющая информация протокола.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В нефтегазовой промышленности, как в России, так и ряда других нефтедобывающих стран мира, основные углеводородные запасы составляют тяжелые, сверхвязкие и высокосернистые нефти, характеризующиеся многофазностью и дисперсностью. Зависимость дисперсных свойств нефти от температуры в климатических условиях России определяющим образом влияет на эффективность её транспортировки. Это обстоятельство определяет важную проблему при оптимизации режимных параметров транспортировки нефти, влияющих на экономическую эффективность и себестоимость не только добычи и переработки нефти, но и на себестоимость производства в большинстве хозяйственных отраслей.

Сложность и системный характер проблемы усугубляется не только влиянием энергозатрат связанных с транспортировкой высокосернистой (ВСН) и сверхвязкой (СВН) нефти на себестоимость производства продукции потребителей, но и сложным характером зависимости вязкости потока от температуры, которая определяется физико-химическим составом нефти. Вязкость нефти также зависит от внешних климатических условий, объемных соотношений ВСН и СВН, расстояния транспортировки потока смешанной (вязкой) нефти, изоляции емкостей и трубопроводов и др. Все эти факторы в совокупности формируют неопределённость при математическом моделировании технологического процесса транспортировки. В известных исследованиях эти факторы рассматривались без учета их взаимовлияния.

Выраженный системный характер проблемы требует её структуризации путем декомпозиции и выявления наиболее значимых факторов, влияющих на процесс транспортировки вязкой нефти в трубопроводе, с целью эффективного управления ими. При этом, в силу сложного характера взаимовлияния этих факторов, в том числе температуры и вязкости нефти, в ходе разработки соответствующей системы управления необходимо учитывать наличие непрогнозируемой неопределенности при математическом описании процесса как объекта управления.

Вышеизложенное позволяет утверждать актуальность решаемой в диссертации проблемы разработки системы автоматического управления температурой потока нефти на основе системного функционально-ориентированного математического моделирования для повышения эффективности ее транспортировки.

Цель работы: повышение эффективности транспортировки вязкой нефти в трубопроводе путем адаптивного управления температурным режимом потока нефти с моделью – идентификатором состояния в контуре системы управления на основе системного математического моделирования процесса первичной подготовки нефти.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие **задачи**:

1. На основе системного анализа иерархической структуры технологического комплекса первичной подготовки нефти формализовать процесс подготовки и транспортировки потоков нефти как объекта управления.
2. Разработать критерии качества управления температурным режимом и адекватную им структуру системы управления температурой потока нефти.
3. Разработать функционально-ориентированную на применение в системах управления в качестве идентификатора состояния математическую модель процесса температурной обработки потоков нефти.
4. Разработать методику идентификации математических моделей процессов температурной обработки потоков ВСН, СВН и смешанной (вязкой) нефти и провести их верификацию.
5. Разработать алгоритм и адаптивную систему автоматического управления производственным процессом температурной обработки и транспортировки потока вязкой нефти с идентификатором состояния в контуре управления

Методы исследования. Методы системного анализа сложных объектов и процессов, теория нечетких множеств и нечеткая логика, теория теплообмена, теория идентификации, теория автоматического управления, теория математической статистики и теория вероятностей.

Научная новизна.

1. На основе системного анализа иерархических структур первичной подготовки и транспортировки вязкой нефти разработана математическая модель этого процесса, функционально ориентированная на применение в системах управления в составе идентификатора состояния, содержащая в своей структуре новые расчётные блоки, учитывающие неопределенность при математическом моделировании из-за взаимного влияния температуры потока и вязкости нефти.
2. Разработана методика идентификации температурного режима потока смешанной нефти, позволяющая по непрерывным наблюдениям косвенных параметров с высокой достоверностью определять температуру потока в характерной заданной точке.
3. Разработан алгоритм управления температурой потоков нефти с использованием нечеткого регулятора, учитывающий неопределенный характер объекта управления и влияние на него глубоких внешних и внутренних возмущений.
4. Разработана автоматическая система управления процессом температурной обработки потока вязкой нефти, содержащая подсистему адаптивного автоматического управления температурой нефти с моделью-идентификатором состояния в контуре и нечетким регулятором, отличающаяся обеспечением стабильного качества стабилизации температуры потока нефти в условиях неопределенности.

Практическая значимость работы заключается:

1. В обоснованной системной структуризации критериев качества первичной подготовки нефти и адекватной этим критериям структуре математических моделей процессов температурной обработки и транспортировки потоков нефти, обеспечивающих достаточную точность и экономное использование вычислительных ресурсов как при автономном применении моделей в расчётной практике, так и при использовании их в составе идентификатора состояния в контуре адаптивных подсистем управления температурой потока вязкой нефти в заданной точке.

2. В математических моделях процессов температурной обработки потоков нефти и методике их идентификации по измерениям качественных параметров, обеспечивающих эффективный расчёт текущих и прогнозируемых показателей качества температуры потока нефти и других текущих технико-экономических показателей.

3. В разработанной автоматической подсистеме адаптивного управления температурой потока с идентификатором состояния в контуре, обеспечивающей повышение эффективности транспортировки потока вязкой нефти при первичной подготовке.

Практическая полезность подтверждается: актом внедрения в проекты новых объектов НГДУ «Нурлатнефть» ОАО «Татнефть» №11198/ВнСл(120) от 28.05.2015; актом внедрения в учебный процесс ГБОУ ВПО «Альметьевский государственный нефтяной институт».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Функциональная схема системы управления температурой потока нефти с нечеткими регуляторами, содержащая новые элементы и их связи, учитывающая влияние на температуру потока нефти внешних и внутренних факторов, зависящих от выявленных неопределенностей.

2. Функционально ориентированная на применение в системах управления в качестве идентификатора состояния математическая модель процесса температурной обработки потока вязкой нефти.

3. Алгоритм управления температурой потока транспортируемой вязкой нефти с использованием нечеткого регулятора и методика идентификации математической модели процесса её температурной обработки по прямым измерениям температур, учитывающая влияние температуры окружающей среды на вязкость.

4. Подсистема адаптивного автоматического управления температурой потока нефти с моделью-идентификатором состояния в контуре и нечетким регулятором.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях: кафедры «Автоматизация

технологических процессов и производств» Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа), кафедры «Автоматика и управление» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (г. Казань), кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета (г. Самара), на расширенном заседании кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного нефтяного института 2009-2015 гг., а также получили положительную оценку на конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Молодая наука России: вопросы теории и практики» Волгоград 2010г.; XI Молодежная научно-практическая конференция молодых работников ОАО «Татнефть» посвященной 55-летию НГДУ «Азнакаевскнефть», Азнакаево 16 сентября 2011г.; III Международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий» г.Новосибирск, 2011г.; Межрегиональная научно-техническая конференция, Ухтинский государственный технический университет, г.Ухта 2011; XV Международной научно-практической конференции «Наука и современность – 2012» г. Новосибирск; IX Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения» посвященной 100-летию Аширова К.Б., 2012г.; Молодежная научно-практическая конференция молодых работников ОАО «Татнефть» посвященной 50-летию НГДУ «Елховнефть», Альметьевск 21 сентября 2012; XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014), Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН 16-19 июня 2014 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованного ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, включающего 183 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 129 страницах, содержит 72 рисунка и 10 таблиц.

ГЛАВА 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ НЕФТИ

1.1 Системный анализ особенностей сложных производственных объектов и процессов нефтегазодобывающего предприятия

В топливно-энергетическом комплексе России нефтегазовая промышленность занимает ключевое место. Она характеризуется рядом специфических особенностей [116], которые отличают ее от других отраслей производства. Одной из особенностей нефтегазовой промышленности и объектов нефтегазового производства является их сложность, проявляющаяся в большом числе и многообразии параметров, определяющих течение процессов, во внутренних связях между ними, в их взаимном влиянии и в неформализуемых действиях человека, который участвует в контуре управления.

Все производственные объекты и процессы нефтегазовой промышленности характеризуются многокритериальностью и являются многоцелевыми.

На основе вышеизложенного в диссертационной работе разработана общая иерархическая структурная схема производственных объектов и процессов нефтегазодобывающего предприятия (НГДП) (рис.1.1).

В данной структурной схеме особое внимание уделяется технологическим критериям – это обеспечение оптимальных значений технологических параметров настоящего исследования; минимизация простоев и отклонений от норм.

Некоторые из этих критериев являются противоречивыми, нечетко описанными с наличием непрогнозируемых неопределенностей, что усложняет формализацию процесса и решение ряда производственных задач, например оптимизация энергозатрат на первичную подготовку и транспортировку вязкой нефти.

Эти непрогнозируемые неопределенности создают проблему при построении математических моделей производственных объектов. Так как исходная информация, которую реально удастся собрать для моделирования и оптимизации исследуемого объекта, может оказаться в значительной степени неполной и нечеткой. Сложные объекты количественно трудно описываемые, а специальных

средств сбора и обработки необходимых статистических данных в промышленных условиях либо нет, либо их недостаточно и они не обладают необходимыми свойствами.



Рисунок 1.1 – Общая иерархическая структурная схема производственных объектов и процессов нефтегазодобывающего предприятия

В настоящее время либо примиряются с недостатком информации и продолжают исследования в сложившихся условиях, либо стараются уменьшить дефицит информации.

Практические попытки распространить традиционные методы моделирования на объекты количественно трудно описываемые, в частности технологические установки первичной подготовки и транспортировки нефти, пока не дали хороших результатов, несмотря на существенное развитие математических методов и средств вычислительной техники. Как показывает практика, человек (оператор, технолог) достаточно хорошо управляет такими объектами и процессами, он в таких случаях довольно успешно справляется со сложностью процесса управления при существующих неопределенностях этих

объектов и процессов [54, 99, 100, 123]. Человек, в отличие от машины, довольно успешно ориентируется в сложной обстановке и использует нечеткие качественные понятия. Возникает задача: как передать способности человека машине для моделирования и управления сложными производственными процессами, например такими, как тепловая обработка потока нефти, когда появляются некоторые дополнительные неопределенности, формализация которых существенно затрудняет решение общей задачи по управлению данным процессом. Для решения такой задачи требуются обработка размытой качественной информации и специальные методы формализации нечеткости [55, 92, 93, 131, 139, 142].

1.2 Системная формализация видов неопределенности с помощью теории нечетких множеств

Создание математического аппарата для описания и исследования нечетко определенных объектов является одним из направлений в решении проблем учета некоторой неопределенности. Кроме этого, в формальные модели различными способами вводятся представления и понятия человека, его нечеткость суждений. Среди способов формализации нечеткости развиваются два направления: 1) обобщение понятия принадлежности элемента множеству, которое приводит к размыванию границ множества; 2) описание нечеткости с помощью иерархически упорядоченных четких множеств [63, 68, 71].

Проблемы дефицита информации, неопределенности и нечеткости исходной информации возникают при построении модели производственных объектов. Для решения проблем неопределенности, вызванной случайным характером параметров моделируемого объекта, применяются вероятностные методы [50, 102], где с параметрами математических моделей связываются функции плотности распределения объективной вероятности. Эти методы применимы только в определенных условиях: многократная воспроизводимость результатов эксперимента в одинаковых условиях и статистическая устойчивость объекта. Теория вероятности [107] не дает возможности описать уверенность эксперта в

том или ином суждении и его предпочтения, тем самым описать лингвистическую неопределенность.

Формализацию этого вида неопределенности легко можно представить с помощью теории нечетких множеств [1, 10, 11, 86, 87, 92, 110, 128, 130, 136, 165...181], которая основана на понятии «нечеткого множества» и является математической формализацией нечеткой информации. Практика прикладных исследований показала, что протекающие процессы в реальных системах неадекватно описываются с помощью классической теории множеств. Это приводит к неоправданной идеализации математического описания таких объектов, а также оказывается недостаточно гибким для формализации неопределенностей, присущих реальным объектам. Для преодоления указанных сложностей и повышения эффективности методов математического моделирования [89] и управления обоснованное использование и формализация априорной качественной информации, представляющей собой знания и суждения экспертов является наиболее перспективным направлением.

Таким образом, для качественного анализа реальных объектов и систем нужны системные подходы [62, 64, 105, 112, 113], которые сочетают комплексный анализ объекта, системное моделирование и системное управление.

Большое число научных публикаций и книг посвящено системному подходу [14, 20, 46, 78, 105, 113, 116]. Проблемами теории систем занимались А.А. Богданов, В.Н. Беклемишев, И.И. Шмальгаузен, К.Боулдинг, Н.Винер, У.Росс Эшби, К.Шеннон, М.Месаревич, А.Уаймор, М.Арбиба и др.

Для анализа реальных объектов и систем нужны подходы, для которых высокая точность и строгость математического формализма не является необходимым, а также используется такая методологическая схема, которая допускает нечеткости и частичные истины. При таком подходе решения должны быть приемлемы для всех систем, которые заинтересованы в проблеме дефицита и нечеткости исходной информации, благодаря тому, что общесистемное решение учитывает все особенности объектов.

В настоящее время существуют подходы и методы моделирования объектов, основанные на методах теории нечетких множеств, которые удовлетворяют требованиям дефицита и нечеткости исходной информации [10, 16, 19, 144, 145, 147...161].

В диссертационной работе вышесказанное приложено к конкретной практической плоскости – к технологии теплового воздействия при первичной подготовке и транспортировке вязкой нефти.

1.3 Анализ первичной подготовки и транспортировки потоков нефти

Для качественного системного анализа реальных объектов по технологии теплового воздействия при первичной подготовке и транспортировке потоков нефти необходимо изучить важнейшие составляющие сырьевой базы нефтяной промышленности не только России, но и ряда других нефтедобывающих стран мира и их накопленный опыт в данной технологии.

В мире возрос интерес к трудноизвлекаемым нефтям в связи с истощением запасов легких нефтей. Одним из основных факторов отнесения к классу трудноизвлекаемых нефтей является её высокая вязкость. Физико-химический состав нефти и ее физико-механические свойства непосредственно и тесно связаны друг с другом и являются определяющим фактором при изучении вопросов добычи нефти и ее последующей переработки.

В результате анализа мирового опыта в технологии теплового воздействия на технологические процессы добычи [12, 15, 65, 79, 90, 95, 104, 137], подготовки [57, 95, 103, 120], и транспортировки [76, 95, 133] вязкой и сверхвязкой нефти можно выделить ряд причин, вызывающих существенные дополнительные энергетические и финансовые затраты на эти процессы. Из основных причин, выделяется та, которая присутствует во всех остальных причинах, вызывающих существенные дополнительные затраты на технологический процесс добычи, подготовки и транспортировки вязкой и сверхвязкой нефти. Данный анализ представлен в виде структурной схемы на рисунке 1.2. Выявлено, что основная причина, повышающая затраты на технологические процессы, обусловлена

физико-химическим составом и физико-механическими свойствами нефти, т.е. аномально высокой вязкостью сверхвязкой нефти, превосходящей вязкость девонской нефти почти в тысячу раз. Разработана структурная схема технологических операций (рис. 1.3), позволяющая определить существенное увеличение затрат.



Рисунок 1.2 – Структурная схема основных причин, вызывающих существенные дополнительные затраты на технологические процессы

Результаты анализа структурных схем (рис.1.1...1.3) являются базовыми составляющими при разработке иерархических структурных схем производственного процесса подготовки нефти (рис. 1.4), технологического комплекса добычи нефти (рис. 1.5), технологического комплекса подготовки нефти, газа и воды (рис. 1.6) и качества товарной продукции (рис. 1.7). Систематизация технологического комплекса добычи нефти, технологического комплекса подготовки нефти и комплексной подготовки нефти с контролем

качества нефти позволила определить основные элементы и их связи в технологическом процессе подготовки и транспортировки нефти.

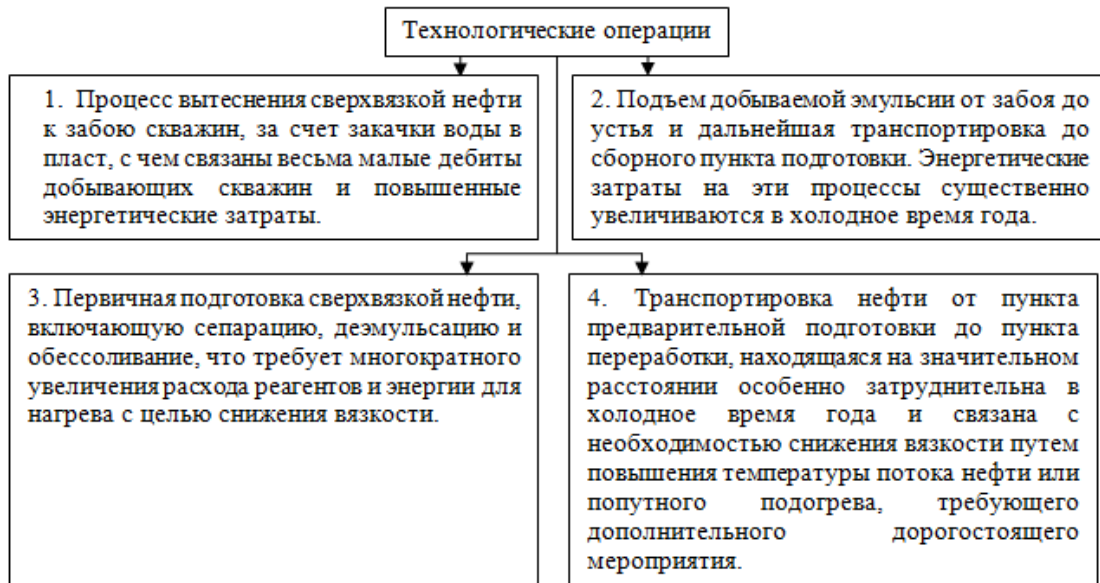


Рисунок 1.3 – Структурная схема технологических операций

Анализ иерархической структуры (рис. 1.4) показывает, что на всех стадиях производственного процесса добычи и подготовки нефти происходит подогрев её потоков: при механизированной добыче нефти – третья ступень первой стадии; при транспортировке нефти – первая ступень второй стадии; при предварительной подготовке нефти – вторая ступень третьей стадии; при подготовке товарной нефти – вторая ступень четвертой стадии. Таким образом, подогрев потока нефти происходит непрерывно.

На температуру потока влияют различные факторы, такие как компонентный состав нефти, её многофазность, дисперсность, внешние климатические условия, расстояние транспортировки потока нефти, изоляция емкостей и трубопроводов. Эти факторы являются источниками неопределенностей, которые при математическом моделировании отражаются взаимным влиянием температуры и вязкости этого потока на всех стадиях.

Анализ структурной схемы зависимости качества товарной нефти (рис. 1.7) позволяет выявить последовательность влияния теплового поля на физико-химический состав и физико-механические свойства нефти, которые существенно влияют на транспортировку и качество товарной нефти.

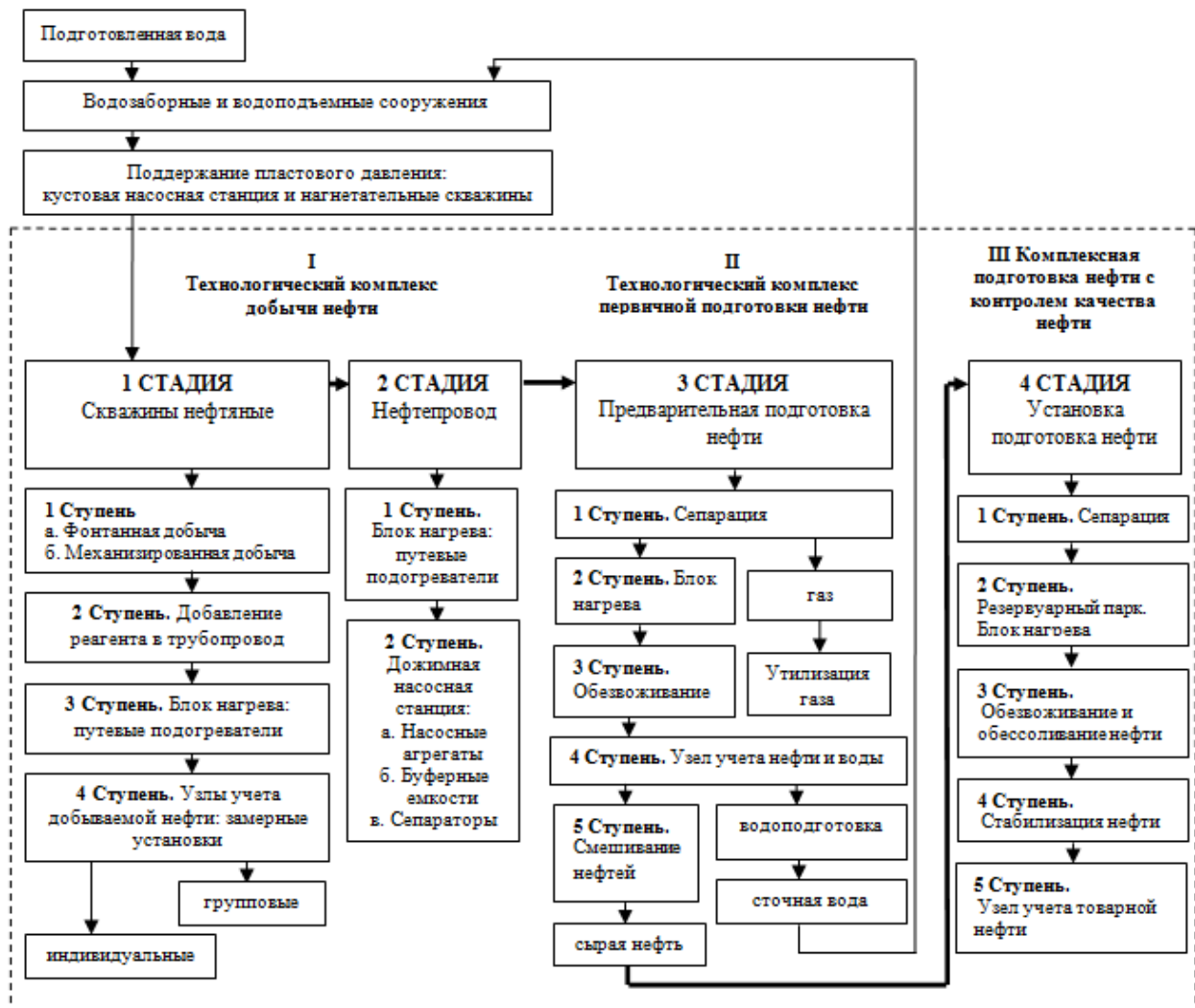


Рисунок 1.4 – Иерархическая структура производственного процесса подготовки нефти

Результаты анализа структурных схем (рис. 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) позволили определить иерархическое влияние факторов неопределенности на каждой стадии первичной подготовки и транспортировки потоков нефти. Эти результаты обосновывают необходимость системно-структурированного математического моделирования для непрерывного контроля и адаптивного управления качественными показателями этих технологических процессов в условиях некоторых неопределенностей, которыми являются динамическая и кинематическая вязкости нефти, существенно зависящие от температуры потока нефти.

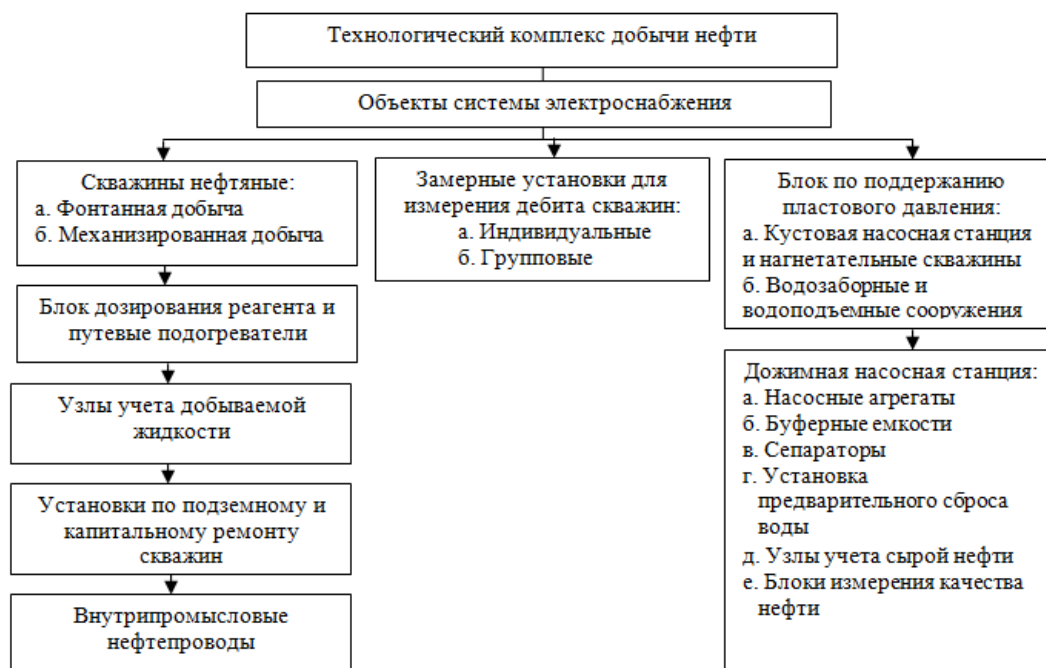


Рисунок 1.5 – Структурная схема технологического комплекса добычи нефти

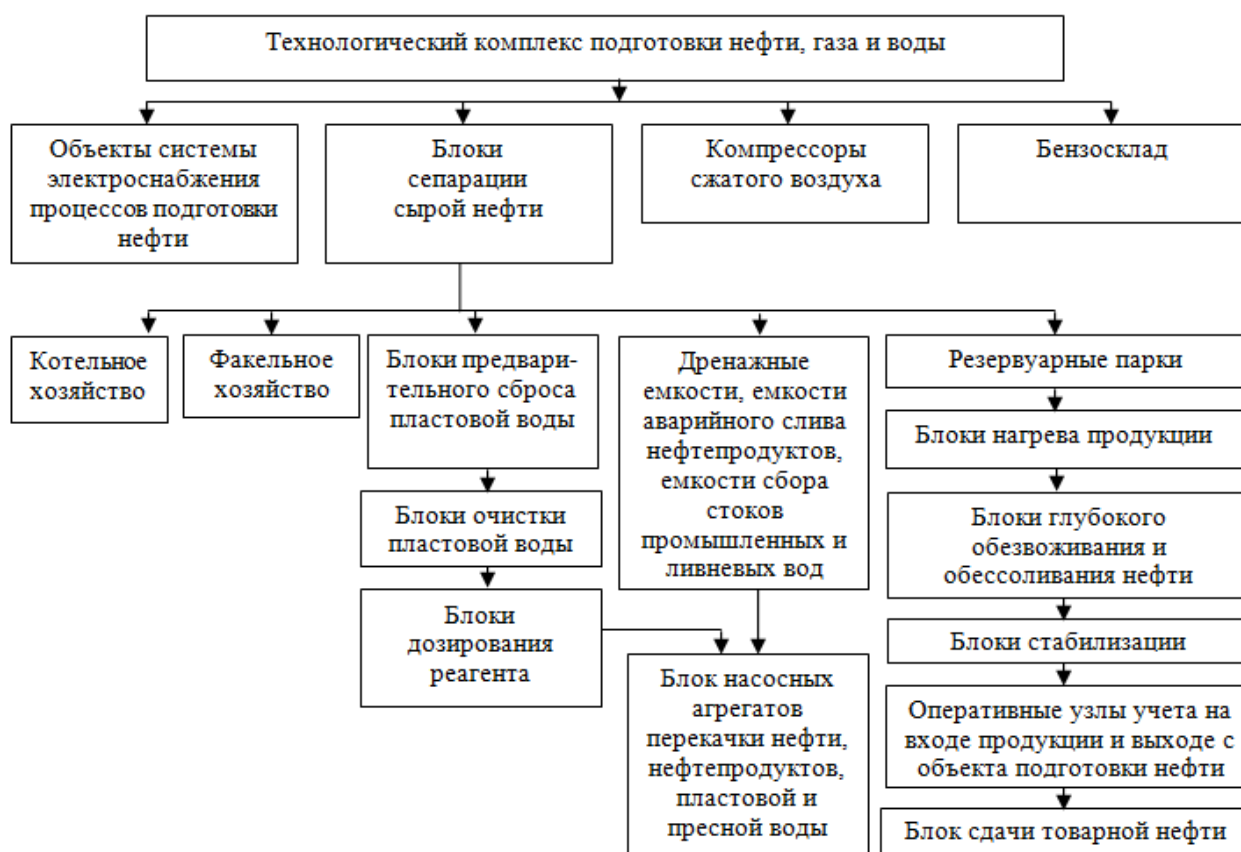


Рисунок 1.6 – Структурная схема технологического комплекса подготовки нефти

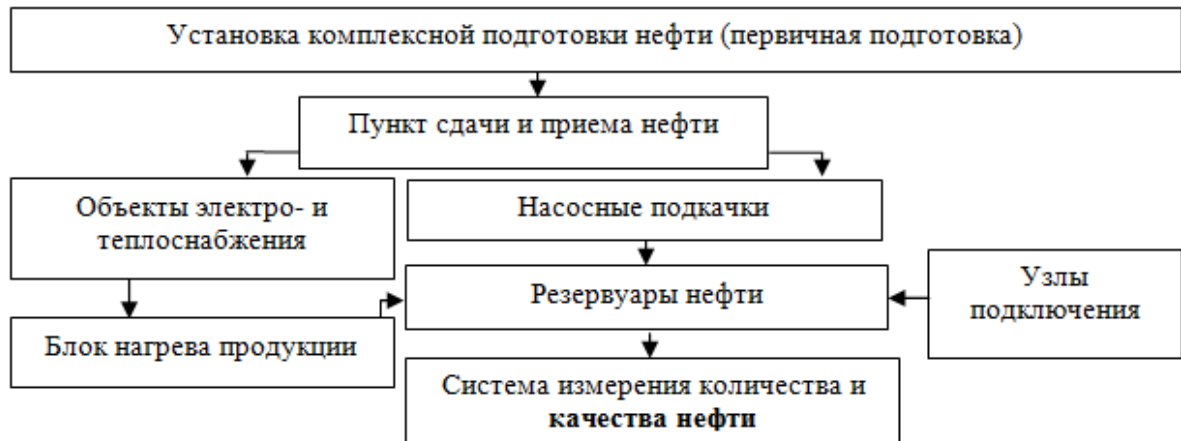


Рисунок 1.7 – Структурная схема комплексной подготовки нефти

Из общей технологии предварительной подготовки нефти выделены конкретные технологии подготовки высокосернистой и сверхвязкой нефти, которые объединяются в общую технологическую цепочку подготовки высокосернистой и сверхвязкой нефти и дальнейшей совместной транспортировки единым потоком.

1.4 Структурный анализ технологического процесса предварительной подготовки потоков нефти

В работе подробно исследован блок, определяющий третью стадию подготовки нефти: технологический комплекс первичной подготовки сверхвязкой нефти. Именно на этой стадии присутствует больше всего факторов, влияющих на возникновение неопределенностей при моделировании и управлении температурой потока транспортируемой нефти.

Предварительная подготовка высокосернистой (ВСН) и сверхвязкой нефти (СВН) осуществляется на установках предварительной подготовки высокосернистой нефти (УПВСН) и сверхвязкой нефти (УПСВН), где проводится предварительное обезвоживание, обессоливание, дегазация и перекачка нефти [43(a), 57, 121, 122].

На рисунке 1.8 представлена иерархическая структура технологического комплекса первичной подготовки высокосернистой и сверхвязкой нефти и транспортировки потока смешанной нефти.

В качестве базовой рассматривается технология первичной подготовки СВН, которая предусматривает её разубоживание ВСН и дальнейшую транспортировку смешанной (вязкой) нефти (15 км) до установки подготовки нефти (УПН).

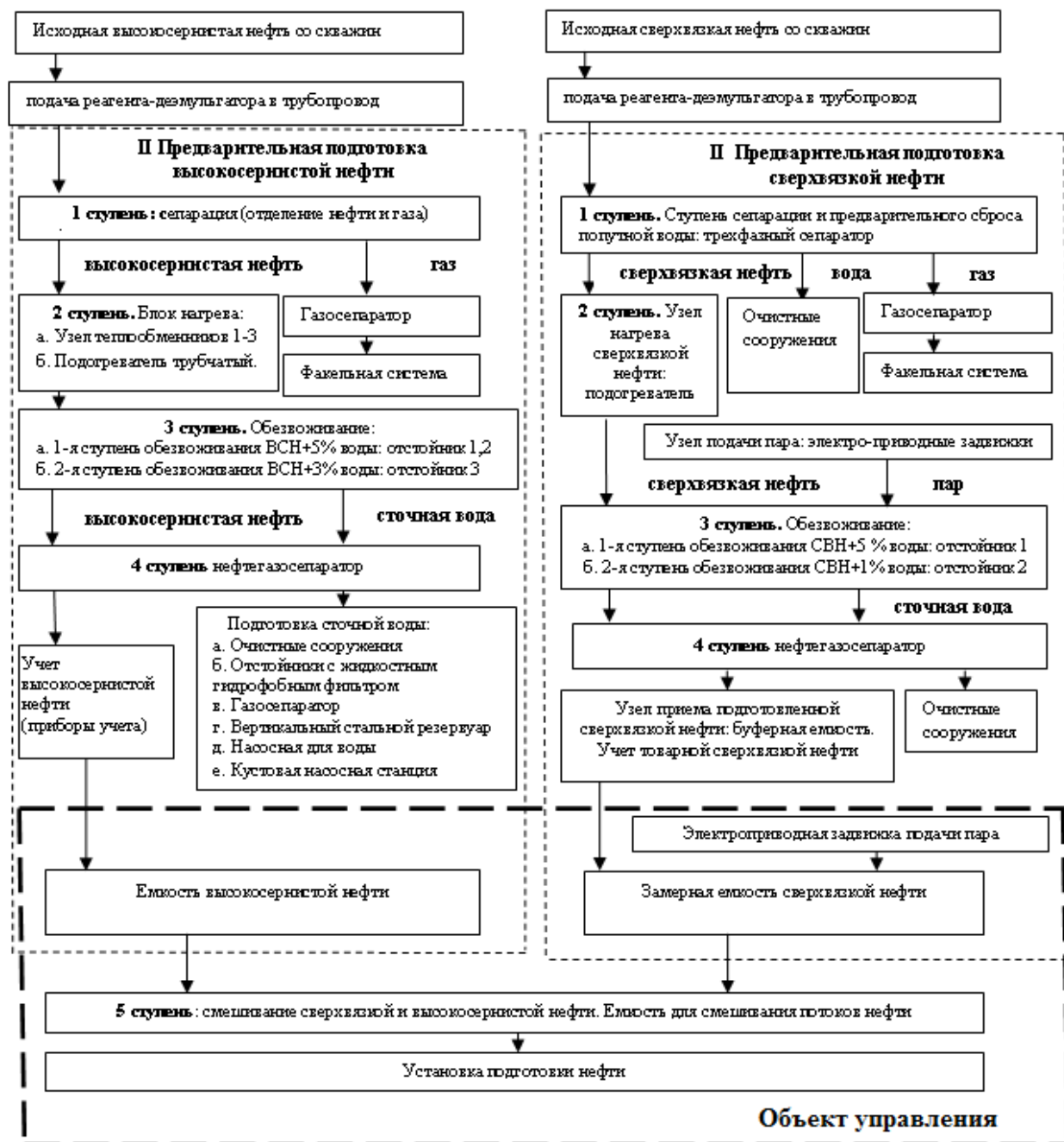


Рисунок 1.8 – Иерархическая структура технологического комплекса первичной подготовки сверхвязкой нефти

ВСН и СВН через ступени сепарации поступают на блоки и узлы нагрева соответственно. С узла учета ВСН поступает в аккумулирующую емкость сырой нефти, а СВН в буферную емкость. Затем ВСН и СВН поступают в емкость для

смешивания. Транспортировка из этой емкости осуществляется по трубопроводам от скважин до установки подготовки нефти с помощью центробежных насосов.

Технология добычи, транспортировки и предварительной подготовки СВН сопровождается на всех этапах дополнительным нагревом с целью снижения вязкости. От добывающих скважин сверхвязкая нефть с температурой $50...80^{\circ}\text{C}$ поступает на вход установки, где обрабатывается деэмульгатором с помощью блока подачи реагента. Для предотвращения снижения температуры СВН до критического значения, когда наступает фазовый переход, трубопроводы оснащены пароспутниками. Процесс подачи пара для обогрева отстойников 1 и 2, а также емкостей $E-1$, $E-2$, $E-3$ (рис. 1.9) осуществляется с помощью электрозадвижек, через которые теплоноситель попадает в змеевики, находящиеся в емкостях.

Основной источник неопределенности – это компонентный состав ВСН и СВН (физико-химический состав), который влияет на теплоемкость этих жидкостей, значит, определяет теплоперенос их потоков при транспортировке. Также следует учитывать влияние климатических условий, расстояние транспортировки потока нефти, изоляцию емкостей и трубопроводов. Эти факторы в совокупности увеличивают степень неопределенности, которая при математическом моделировании отражается взаимным влиянием температуры и вязкости потоков на всех стадиях. При этом сложно прогнозировать (рассчитать) изменение начальной температуры СВН и ВСН в емкостях E_1 и E_2 и температуру потока при их смешивании в емкости E_3 при одном и том же расходе пара, так как изменяется компонентный состав потоков.

На основе системного подхода и анализа иерархических структур (рис. 1.4...1.8) выявлен и формализован процесс подготовки и транспортировки потоков нефти как объект управления. Системный анализ рассматриваемого производственного процесса показывает, что для количественной оценки влияния различных факторов на температуру потоков нефти необходимо системно-структурированное математическое моделирование процесса температурной обработки нефти.

Влияние состава нефти на температуру и вязкость смешанного потока вносит дополнительную сложность в проблему раскрытия неопределённости при математическом моделировании для каждого из потоков (ВСН и СВН), так как зависимость вязкости от температуры не подчиняется линейным закономерностям и требует для своего определения системного анализа производственного процесса первичной подготовки СВН.

На рисунке 1.9 представлена структурно-функциональная схема фрагмента установки предварительной подготовки высокосернистой и сверхвязкой нефти, где E_1 – емкость сырой ВСН; E_2 – замерная емкость СВН; E_3 – емкость для смешивания потоков нефти; HA_1 , HA_2 , HA_3 – центробежные насосы; УПН – установка подготовки нефти; TE_1 , TE_2 , TE_3 – датчики температуры.

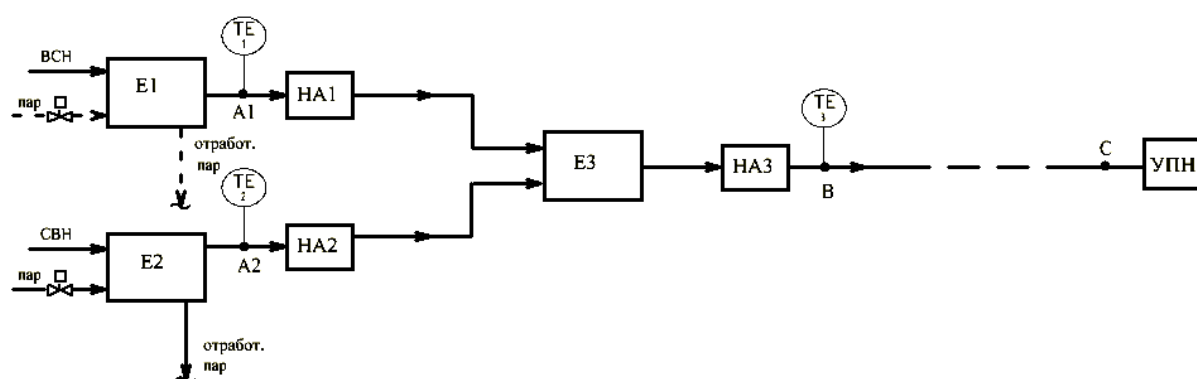


Рисунок 1.9 – Структурно-функциональная схема фрагмента установки предварительной подготовки высокосернистой и сверхвязкой нефти

Емкости E_1 и E_2 , в которых аккумулируются ВСН и СВН соответственно, оборудованы змеевиками, в которые через электрозадвижки ЭЗ1 и ЭЗ2 подается пар для подогрева нефти. Согласно технологическому процессу смешивание ВСН и СВН происходит в емкости E_3 , при одинаковом давлении на входе и выходе емкости E_3 ($p_1 = p_2 = p_3$), и далее смешанная нефть транспортируется по трубопроводу до УПН.

Непрерывная подача заданных объемов нефти обеспечивается насосами HA_1 , HA_2 , HA_3 . Участки трубопроводов, соединяющие насосные агрегаты и емкости E_1 , E_2 и E_3 имеют равномерно распределенную по всей поверхности емкостей

теплоизоляцию из стекловаты (рис.1.10) толщиной $\delta = 100 \text{ мм}$, а трубопровод (диаметром $D_L = 200 \text{ мм}$ уложен в грунт на глубину $h = 2 \text{ м}$) для транспортировки смешанной нефти от насоса HA_3 до УПН ($L = 15,6 \text{ км}$) покрыт поливинилхлоридной пленкой без утеплителя, из-за чего происходят потери температуры на участке BC .



Рисунок 1.10 – Теплоизоляция емкости E_2

Согласно условиям технологического процесса температура смешанной нефти на входе в УПН (точка C) не должна снижаться ниже 10°C , а в зимний период, без регулирования температуры потоков нефти, по данным службам эксплуатации температура в точке C снижается до 5°C . Это существенно повышает динамическую и кинематическую вязкость транспортируемой нефти, что в свою очередь увеличивает сопротивление участка трубопровода.

Участки трубопроводов в технологическом процессе транспортировки нефти являются дополнительной постоянной составляющей общего сопротивления, поэтому изменение температуры $\theta_{жз}$ в точке B (на выходе из емкости E_3), воспринимается датчиком температуры на входе в УПН (в точке C) с некоторым запаздыванием, так как длина трубопровода измеряется десятками километров и характеризуется определенной потерей температуры потока нефти. Необходимо ожидать некоторое время, когда подогретая нефть достигнет конца участка трубопровода. Таким образом, по окончании времени запаздывания [7, 124] температура в точке C начинает повышаться с той же самой динамикой как температура в E_3 .

Основным параметром при проектировании системы управления подачи пара в емкость E_1 (рис.1.11) является температура смешанной нефти, которая зависит

от времени запаздывания, определяемого параметрами технологического процесса и объектов структурной схемы:

$$\tau = \sum_{i=1}^4 \frac{L_i \cdot S_i}{G_i} = \sum_{i=1}^4 \frac{L_i \cdot \pi \cdot R_i^2}{G_i},$$

где G_i , S_i , L_i , R_i – расход смешанной нефти, площадь поперечного сечения, длина и радиус ёмкостей и участков трубопровода.

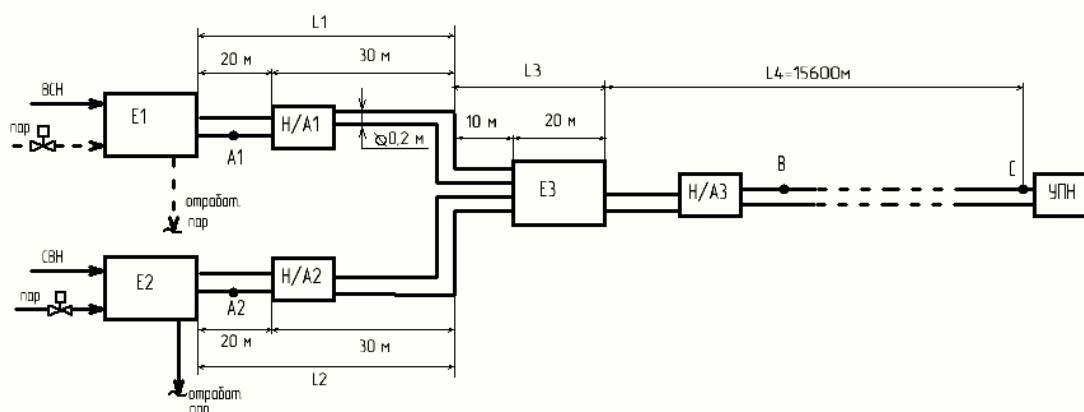


Рисунок 1.11 – Структурная схема для определения сопротивления участков трубопровода и величины времени запаздывания

Транспортное запаздывание зависит от нагрузки объекта: чем больше нагрузка, тем меньше запаздывание, поскольку при большой нагрузке скорость движения среды выше. Требования, предъявляемые к основным параметрам потоков ВСН, СВН и вязкой нефти, предписывают поддержание температуры потока нефти в любой заданной точке при транспортировке до конечного пункта в определенных пределах.

1.5 Анализ и сравнение известных методов управления

Решение сложных задач по управлению технологическими объектами нефтегазодобывающего предприятия, например, при процессе теплового воздействия на поток нефти, когда отсутствует достаточно точное знание об объекте управления, использование традиционных методов управления [2...4, 53, 75, 85, 114, 117, 118, 135] неэффективно или даже неприемлемо. Поэтому в этом случае приходят к выводу о построении нечетких систем управления различных

классов, позволяющих решать задачи управления в таких ситуациях, когда появляются неопределенности связанные с особенностью объекта. Наиболее приемлемо в этом случае использование нечеткого управления (Fuzzy Control, Fuzzy-управление) [44, 47, 74], которое заключается в использовании аппарата нечетких систем: нечетких множеств [138], нечеткой логики [115], нечеткого моделирования [52, 73, 94].

Автор [66] считает, что можно систематизировать в иерархическом порядке эффективное применение классических [18, 72, 96, 97, 106, 125, 126, 134, 136], нейросетевых [22, 23, 51, 62, 69, 111, 119, 128] и нечетких систем управления [17, 101, 127]. Из рисунка 1.12 видно, что классические методы управления зарекомендовали себя при относительно невысокой сложности объекта управления и наличии достаточно полной информации о нем.



Рисунок 1.12 – Систематизация выбора метода управления по критериям объекта

Нейросетевые системы управления целесообразно применять при отсутствии информации или высокой сложности объекта управления. Промежуточное положение между данными технологиями занимают нечеткие системы. Границы между различными подходами являются весьма условными (нечеткими) [108].

Большое число научных публикаций и книг посвящены методам нечеткого управления [8, 9, 13, 47, 57, 74, 80, 82]. Теоретическим и практическим вопросам нечетких систем посвящены работы зарубежных и отечественных ученых: Л.А.

Заде [56, 182, 183], Е.А. Мамдани [162...164], Томески М.Л. [178], В.В. Круглова [49, 69], А.В. Леоненкова [73], Н.П. Деменкова [47], В.И. Васильева [21], В.И. Гостева [108] и др. Мировой опыт показывает целесообразность применения нечетких методов для повышения эффективности управления сложными технологическими процессами, что находит подтверждение в работах Ларсена, Такаги (Tomohiro Takagi) и Сугено (Michio Sugeno) [146, 177] и др.

В результате анализа научных работ выявлено, что нечеткое управление [77] используется в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоемкая, а также в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта [61]. Среди причин появления нечеткого управления можно выделить следующие [61]:

1. В связи со сложностью или невозможностью измерения ряда параметров и показателей многие технологические и производственные процессы являются количественно трудноописуемыми, что затрудняет применение методов детерминированной математики для моделирования и оптимизации их режимов работы.

2. В настоящее время большинство промышленных производств (энергетическое, нефтеперерабатывающее и др.) относятся к классу сложных систем, оптимальное управление которыми проходит в условиях неопределенностей, связанных с отсутствием достаточной статистики о поведении управляемых объектов.

3. Традиционные методы построения моделей не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание проблемы, подлежащей решению, заведомо является неточным и неполным.

4. Нечеткое регулирование позволяет повысить адекватность процессов управления и учесть большое число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений.

5. Нечеткий регулятор обеспечивает большую устойчивость, чем традиционный регулятор и лучше управляет нелинейным процессом.

Из вышеописанного следует, что для реализации управления на базе теории нечетких множеств и нечеткой логики необходимо устройство, формирующее управляющие воздействия на объект управления – нечеткий регулятор [44, 66, 70]. Развитие нечеткой логики показало, что наиболее удачной разработкой является модель Такаги-Сугено (Takagi-Sugeno) [94, 177], которая имеет дополнительное преимущество в том, что нелинейные участки можно аппроксимировать с помощью множества плоских линейных сегментов. Каждый такой сегмент можно задать одним правилом модели Такаги-Сугено. Методика идентификации локально линейных моделей изложена в работах [13, 94, 140, 141, 143]. В настоящее время модели Такаги-Сугено являются достаточно подходящими для описания регуляторов. Имеются хорошо развитые методики проектирования линейных регуляторов, предложенные в работе [67], и в случае сложных нелинейных объектов можно разработать оптимальные линейные регуляторы для наиболее важных их характеристик, а затем объединить их путем создания одного нечеткого регулятора Такаги-Сугено, что изложено в работах 94 и 177.

Наиболее приспособлен для получения аналитических методов алгоритмов логического вывода Такаги-Сугено, предложенный в работе [177], этим и объясняется наибольшее количество работ, в которых рассматривается аналитическое исследование систем, использующих указанный алгоритм. В работе предложен критерий устойчивости нечетких систем управления с моделью Такаги-Сугено, в котором анализ устойчивости системы сводится к анализу устойчивости отдельных подсистем. Однако, данный метод дает возможность определить лишь небольшую часть истинной области устойчивости. Значительно лучший результат дает применение второго метода Ляпунова [45], который является наиболее распространенным среди других подходов [83, 88]. Автором рассмотрены наиболее распространенные схемы построения нечетких адаптивных систем управления [59, 60, 91, 129]. Для любого из традиционных статических регуляторов можно привести его нечеткий вариант, например [94]: структурная схема адаптивного управления с нечетким регулятором и структурная схема настройки нечеткого регулятора с эталонной моделью.

В качестве базового варианта принята система управления с цифровым нечетким регулятором [94], которая необходима для определения основных шагов по реализации нечеткого регулирования в замкнутых системах автоматического управления температурой потока нефти и расходом теплоносителя (рис. 1.13).

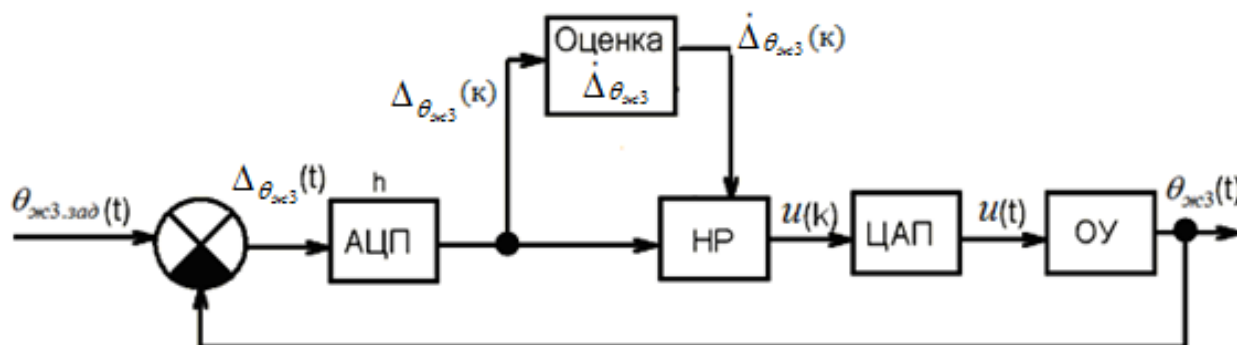


Рисунок 1.13 – Система управления с нечетким регулятором

На рисунке 1.13 представлены следующие обозначения: АЦП – аналого-цифровой преобразователь, НР – нечеткий регулятор, ЦАП – цифроаналоговый преобразователь, $\theta_{ж3}(t)$ – температура смешанной нефти; $\theta_{ж3.зад}(t)$ – заданная температура для ВСН; $\Delta\theta_{ж3}(t)$ – непрерывная ошибка, с интервалом дискретизации аналогового сигнала (шаг квантования) h , $\Delta\theta_{ж3}(\kappa)$ – квантованная ошибка на выходе АЦП; $\dot{\Delta\theta}_{ж3}(\kappa)$ – первая производная от ошибки: $\dot{\Delta\theta}_{ж3}(\kappa) = [\Delta\theta_{ж3}(\kappa) - \Delta\theta_{ж3}(\kappa - 1)]/h$; $u(\kappa)$ – квантованное управляющее воздействие на объект управления (ОУ), $u(t)$ – непрерывное управляющее воздействие на ОУ.

На сегодняшний день нечеткие множества и нечеткая логика используются почти во всех традиционных математических областях, предназначенных для применения этих методов, например, в системах управления технологическим процессом тепловой обработки потоков нефти. С этой точки зрения применение нечеткого множества и нечеткой логики в разработке алгоритма управления данным технологическим процессом, путем регулирования электропривода на степень открытия задвижки для подачи пара в емкости (рис.1.9), позволяет учесть основные параметры в режиме реального времени.

Основные этапы для реализации нечеткого регулятора в замкнутых системах автоматического управления электроприводом задвижек для подачи пара в

емкостях ВСН и СВН (рис.1.9), которые влияют на температуру потока смешанной нефти и расходом теплоносителя следующие:

1. Ввод входных переменных НР: ошибка $\Delta_{\theta_{ж3}}$ и первая производная $\dot{\Delta}_{\theta_{ж3}}$ ошибки, выходная переменная u – это управляющее воздействие на объект управления.

2. Происходит выбор вида функций принадлежности (ФП) нечетких термов, которые оценивают входные и выходные переменные НР на универсальном множестве $[0...1]$. Число термов, с помощью которых оцениваются лингвистические переменные, выбираем равным трем, причем ФП – это пересекающиеся при значении абсциссы 0,5. Формируются лингвистические правила управления и осуществляется их формализация системой логических уравнений.

3. Ввод начальных значений оптимизируемых параметров НР: диапазонов изменения входных и выходных переменных НР и параметров ФП. Задается временной интервал наблюдения в системе с шагом квантования h . Выбирается критерий качества и метод параметрической оптимизации.

4. Выбранный временной интервал наблюдения рассчитывается с шагом моделирования h_0 ($h_0 \leq h$).

5. Этапы повторяются с различными значениями диапазонов изменения входных и выходных переменных и параметров ФП. Процедура проводится до тех пор, пока не будет получено либо минимальное значение критерия качества, либо удовлетворяющее разработчика качество системы управления с НР и, соответственно, значения параметров НР выбираются в качестве оптимальных.

Поскольку в классической модели невозможно учесть все факторы, влияющие на процесс, то необходимо разработать функционально-ориентированную модель (ФОМ). При этом с помощью идентификатора состояния в системе повышается точность регулирования, так как осуществляется корректировка базы правил для нечеткого регулятора. Для этого составлен нечеткий алгоритм системного контроля температуры и на его основе

разработаны нечеткие правила в режиме реального времени. В качестве объекта управления рассматривался процесс подготовки и транспортировки потоков нефти.

На основе вышеизложенного формулируется тема диссертационного исследования «Системный анализ и автоматическое управление процессом транспортировки вязкой нефти».

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана общая иерархическая структурная схема производственных объектов и процессов нефтегазодобывающего предприятия.

2. На основе системного анализа общей структуры производства разработаны иерархическая структура производственного процесса добычи, подготовки и транспортировки нефти.

3. На основе системного подхода и анализа иерархических структур выявлен и формализован процесс подготовки и транспортировки потоков нефти как объект управления.

4. Выполнен системный анализ внешних и внутренних факторов содержащих неопределенности с целью повышения качества управления процессом подготовки и транспортировки потока нефти.

5. Определена базовая система управления с цифровым нечетким регулятором, которая необходима для определения основных этапов по реализации этого регулятора в замкнутых системах автоматического управления температурой потока нефти и расходом теплоносителя.

ГЛАВА 2 ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОСЕРНИСТОЙ И СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Результаты системного анализа технологического процесса первичной подготовки ВСН и СВН показал, что регулирование температуры потоков нефти в режиме реального времени требует формирования управляющего воздействия с учетом существующих неопределенностей данного процесса, т.е. с использованием нечеткой логики.

Произведена декомпозиция иерархической системной структуры технологического комплекса и процесса первичной подготовки ВСН и СВН и транспортировки потока смешанной нефти (рис. 1.8), из которой выделен объект управления. При этом сохранены функциональные свойства и все связи рассматриваемого технологического процесса. Разработана структурная схема системы управления температурой потока нефти с нечетким регулятором (рис. 2.1). Основным рассматриваемым технологическим процессом является тепловое воздействие при транспортировке потока нефти. Основной целью является поддержания заданной температуры в характерных точках технологической схемы (рис. 2.1): *В* и *С*.

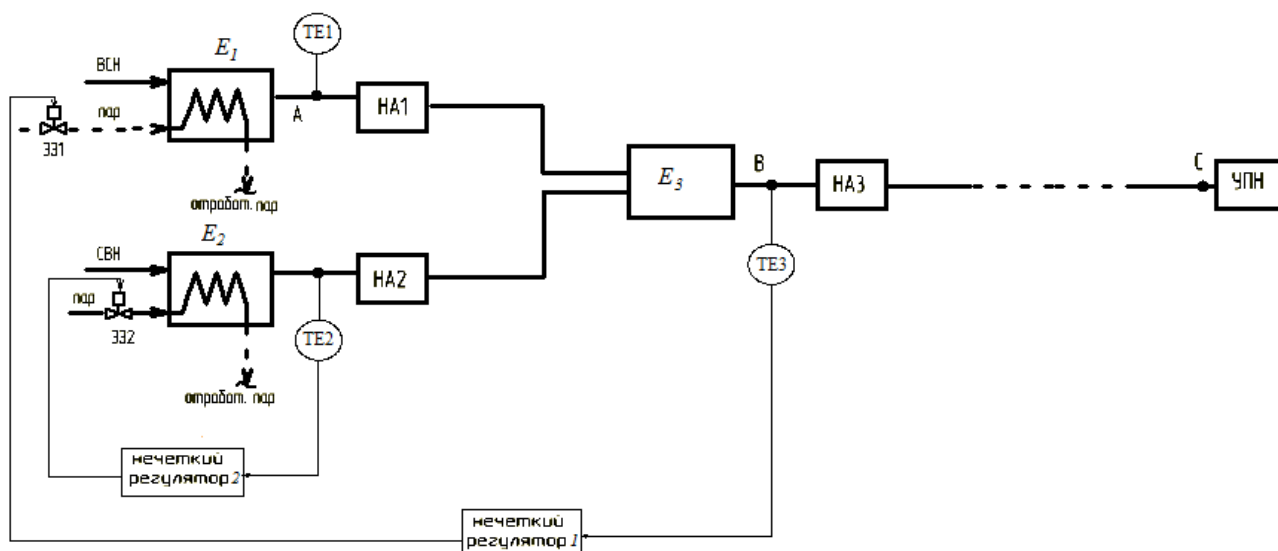


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы управления температурой потока нефти с нечеткими регуляторами

На основе структурной схемы (рис. 2.1) разработана функциональная схема системы управления температурой потока нефти с нечеткими регуляторами

(рис. 2.2). В нее введены новые элементы: дополнительный источник теплового воздействия – змеевик в емкости ВСН с управляемым электроприводом задвижки подачи пара, нечеткие регуляторы и вычислительный блок.

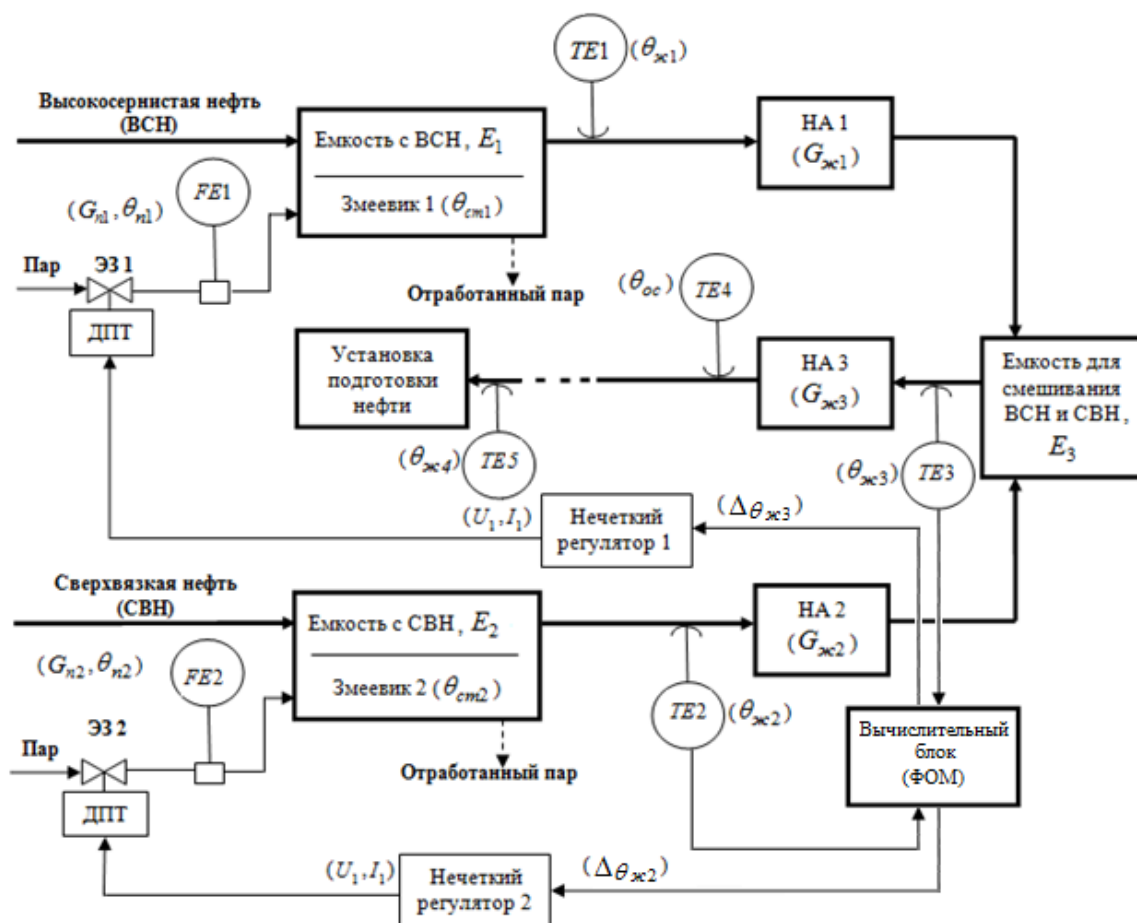


Рисунок 2.2 – Функциональная схема системы управления температурой потока нефти с нечеткими регуляторами

На рисунке 2.1 обозначены: $HA1$, $HA2$, $HA3$ – насосные агрегаты для перекачки ВСН, СВН и смешанной нефти до УПН; $TE1$, $TE2$, $TE3$ – датчики температур; E_3 – емкость для смешивания потоков нефти. В схеме предлагается два контура системы управления температурой нефти с нечеткими регуляторами. Контур управления температурным режимом ВСН является основным (внешним), так как в объемном соотношении доля ВСН всегда больше доли СВН, и к тому же ВСН технологически допускает больший диапазон регулирования температурой. Исполнительными органами в системе являются электроприводы задвижек ЭЗ1 и ЭЗ2 для подачи пара в змеевики емкостей E_1 и E_2 для повышения температуры потока смешанной нефти (т.В).

На рисунке 2.2 обозначены: $\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}, \theta_{ж4}$ – температуры ВСН, СВН, смешанной нефти и в т.С на входе в УПН, $град$; $\theta_{ж1.зад}, \theta_{ж3.зад}$ – заданные температуры для ВСН и СВН, $град$; $\theta_{см1}, \theta_{см2}$ – температуры стенок змеевиков в емкостях ВСН и СВН нефти, $град$; θ_{n1}, θ_{n2} – температуры пара в змеевиках в емкостях ВСН и СВН, $град$; $TE4, TE5$ – датчики температур; I_1, I_2 – токи в цепи якоря электроприводов задвижек для подачи пара в змеевики, A ; U_1, U_2 – напряжение в цепи якоря электроприводов задвижек для подачи пара в змеевики, B ; G_{n1}, G_{n2} – расход пара в змеевиках, $м^3/с$; $FE1, FE2$ – датчики расхода пара; $G_{ж1}, G_{ж2}, G_{ж3}$ – расход ВСН, СВН и вязкой нефти, $м^3/с$; θ_{oc} – температура окружающей среды, $град$. В таблице 2.1 представлены основные параметры для структурной схемы объекта управления.

Таблица 2.1 – Параметры для структурной схемы объекта управления

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Емкость сырой ВСН (E_1)	Замерная емкость СВН (E_2)	Емкость для смешивания ВСН и СВН (E_3)
1	Объем емкости	V_1, V_2, V_3	$м^3$	200	200	200
2	Температура входного пара в змеевике	θ_n	$^{\circ}C$	-	179	-
3	Температура выходного пара из змеевика	θ_{n11}	$^{\circ}C$	-	100	-
4	Температура нефти, регистрируемая датчиками температуры TE_1, TE_2, TE_3	$\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}$	$^{\circ}C$	40	81	60
5	Тип насосного агрегата	HA_1, HA_2, HA_3		ЦНС : 105/90	ЦНС : 38/66	ЦНС : 60/330
6	Тип электродвигателя насосного агрегата			2B250S2Y2,5	BA180S2Y2	BA02450S2Y2
7	Мощность электродвигателя	$N_{дв1}, N_{дв2}, N_{дв3}$	$кВт$	75	22	200
8	Подача насоса	$G_{ж1}, G_{ж2}, G_{ж3}$	$м^3/ч$	30	12	42

В результате анализа структурной схемы системы управления температурой потока нефти с нечеткими регуляторами и функциональной схемы объекта

управления (рис. 2.1 и 2.2) установлено, что количественное и качественное управление температурой потока СВН невыполнимо из-за технологических и технических ограничений: в емкости E_2 нельзя повышать температуру СВН выше 90°C .

Из вышеизложенного следует, что повышать температуру потока смешанной нефти можно за счет повышения температуры ВСН, при этом требуется автоматическое управление поддержанием заданной температуры в точке С (датчик $TE5$) (рис. 2.2). Для решения данной задачи необходимо оснастить емкость с ВСН змеевиком, имеющим в комплектной поставке регулируемый электропривод задвижки для подачи пара. Объем подачи пара определяется в функции температуры потока смешанной нефти в точке В (датчик $TE3$) (рис. 2.2). Контур регулирования температурой ВСН принят основным (внешним).

2.1 Разработка основных критериев качества управления температурным режимом технологического процесса первичной подготовки и транспортировки потоков нефти

Эффективность работы нечеткого регулятора оценивается по быстродействию и точности управления. Часто нечеткое управление сравнивают с ПИД - управлением. Далее в работе проведено сравнение нечеткого управления и ПИД - управления технологическим процессом тепловой обработки потоков нефти и ее дальнейшей транспортировки с поддержанием заданной температуры потока нефти.

По мнению многих авторов [9, 94] нечеткие ПИД - регуляторы следует применять только для управления нелинейными объектами, особенно в случаях, когда модель такого объекта с требуемой точностью получить трудно или невозможно. Согласно этому подходу, линейными объектами надо управлять с помощью обычных ПИД - регуляторов, обеспечивающих «более высокое» качество регулирования по сравнению с нелинейным регулятором, которое оценивается на основе критериев качества управления температурным режимом.

Для качественной оценки предложенной системы управления температурой потока нефти при первичной подготовке потоков нефти разработаны критерии

качества управления температурным режимом (рис. 2.3), т.к. именно они являются факторами, определяющими управляющее воздействие в условиях неопределенности.

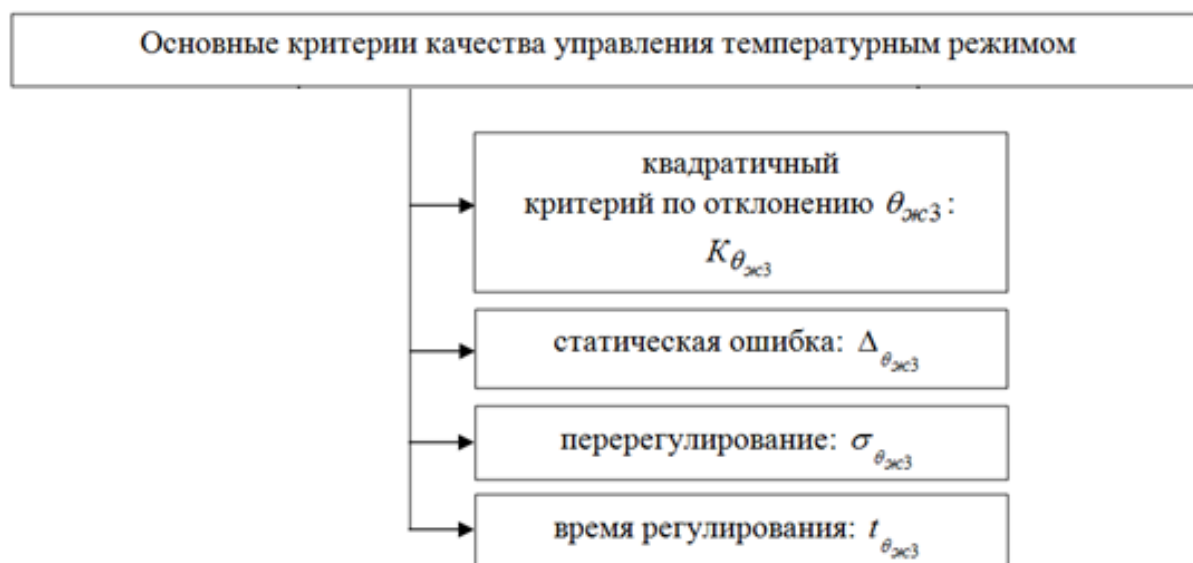


Рисунок 2.3 – Критерии качества управления температурным режимом технологического процесса первичной подготовки и транспортировки потоков нефти

В качестве критериев выбраны: квадратичный критерий отклонения, статическая ошибка, перерегулирование и время регулирования по температуре. Для динамической вязкости граничные параметры заданы ГОСТ Р 51858-2002.

Зная фактическую температуру в т. В ($\theta_{ж3}$), можно определить температуру в т. С ($\theta_{ж4}$) по дифференциальному уравнению В.Г. Шухова (2.10). На основании рассчитанной температуры в т. С $\theta_{ж4}(L) \big|_{L=C}$ формируется требуемая величина $\theta_{ж3,зад}$ в точке В.

Перерегулирование по температуре в процентах:

$$\sigma_{\theta_{ж3}} = \frac{\theta_{ж3}(t) - \theta_{ж3,зад}}{\theta_{ж3,зад}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Поддержание в установившемся режиме отклонения температуры в т. В ($\theta_{ж3}$) в пределах $\pm 5\%$ от требуемого значения $\theta_{ж3,зад}$ способствует повышению эффективности транспортировки потока нефти.

Для внешнего контура системы управления (рис. 2.2) в качестве оценки управления принят квадратичный критерий отклонения:

$$K_{\theta_{ж3}} = \int_0^t \Delta_{\theta_{ж3}}^2(t) \cdot dt, \quad (2.2)$$

где $\Delta_{\theta_{ж3}}(t) = \theta_{ж3}(t) - \theta_{ж3.зад}$ – отклонение текущей величины от заданной.

Для отражения зависимости критериев качества от температурного режима технологического процесса первичной подготовки СВН, как объекта управления, вводятся векторы: состояния потока, связанные нижеприведенными уравнениями (2.43)...(2.53) – $\bar{z}(t) = [\theta_{ж1}, \theta_{ст1}, \theta_{ж2}, \theta_{ст2}, I_1, \omega_{z1}, I_2, \omega_{z2}, \varphi_1, \varphi_2]$; качества потока – $\bar{x}(t) = [\nu_{ж1}, \mu_{ж1}, \rho_{ж1}, N_{ж1}, \nu_{ж2}, \mu_{ж2}, \rho_{ж2}, N_{ж2}, \nu_{ж3}, \mu_{ж3}, \rho_{ж3}, N_{ж3}]$; непрерывного наблюдения – $\bar{y}(t) = [\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}]$, где $\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}$ – температуры ВСН, СВН и смешанной нефти, град; $\theta_{ст1}, \theta_{ст2}$ – температуры стенок змеевиков в емкостях ВСН и СВН, град; I_1, I_2 – токи в цепи якоря электроприводов задвижек для подачи пара в змеевики, А; ω_{z1}, ω_{z2} – скорости вращения электроприводов задвижек (рад/с); φ_1, φ_2 – углы поворота заслонок в задвижках; $N_{ж1}, N_{ж2}, N_{ж3}$ – физико-химический состав ВСН, СВН и смешанной нефти, т.е. массовая доля: воды, концентрация хлористых солей, механических примесей, серы, смол, парафина, насыщенных паров, асфальтенов, фракционный состав; $\nu_{ж1}, \nu_{ж2}, \nu_{ж3}$; $\mu_{ж1}, \mu_{ж2}, \mu_{ж3}$; $\rho_{ж1}, \rho_{ж2}, \rho_{ж3}$ – кинематические (m^2/c), динамические вязкости ($Па \cdot c$) и плотности ВСН, СВН и смешанной нефти ($кг/м^3$).

Определение вектора непрерывного наблюдения и вектора состояния потока проводится на базе следующих уравнений: теплового баланса с применением статической модели процесса обезвоживания ВСН, СВН и смешанной нефти; распределения температуры транспортируемой среды при стационарном течении; постоянного тока с независимым возбуждением электроприводов задвижек и математической модели насосного агрегата, учитывающей параметры регулирования скорости вращения ротора.

2.2 Определение факторов, влияющих на критерии качества технологического процесса тепловой обработки потоков нефти и ее транспортировки

Оптимальные режимы перекачки нефтепродуктов зависят от многочисленных факторов, определяющих систему основных критериев температурной обработки потоков нефти. При тепловой обработке потоков нефти с дальнейшей транспортировкой оптимальные режимы с поддержанием заданной температуры потока рассчитывают исходя из технико-экономических соображений. Данные расчеты, помимо прочего, включают тепловой и гидравлический расчет.

Изменение вязкости существенно влияет на потребляемую мощность насоса при транспортировке вязкой нефти по трубопроводу, а как известно затраты электрической энергии в дальнейшем отражаются на общей себестоимости продукции.

Мощность насоса можно определить по следующей формуле [88(а)]:

$$P = \frac{G_{жз} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{102 \cdot \eta_0} = \frac{G_{жз} \cdot H \cdot \Delta \mu_{t,3} \cdot g}{\Delta \nu_{t,3} \cdot 102 \cdot \eta_0} = \frac{G_{жз} \cdot H \cdot \Delta \mu_{t,3} \cdot 10^{-6} \cdot g}{\Delta \nu_{t,3} \cdot 10^{-6} \cdot 102 \cdot \eta_0} \text{ кВт}, \quad (2.3)$$

$$W = P \cdot t_{тр.н}, \quad (2.4)$$

$$c = \frac{W}{G_{жз} \cdot t_{тр.н}}. \quad (2.5)$$

где H, η_0 – напор (м) и к.п.д. насоса, $\Delta \mu_{t,3}, \Delta \nu_{t,3}$ – отклонение динамической и кинематической вязкости от температуры, g – ускорение свободного падения, W – затраты электрической энергии на транспортировку потока вязкой нефти (кВт·ч), $t_{тр.н}$ – время транспортировки (ч), c – удельные нормы затрат электрической энергии на транспортировку ($\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2}$).

Полный к.п.д. насоса определяет степень совершенства насоса и составляет:

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P}, \quad (2.6)$$

где $P_{пол}$ – полная мощность насоса.

Обычно полный к.п.д. насоса определяют как произведение: $\eta = \eta_0 \cdot \eta_z \cdot \eta_m$,

где η_0 , η_z , η_m – к.п.д. насоса, соответственно объемный, гидравлический и механический.

$$\eta_z = \frac{H_D}{H_T}, \quad (2.7)$$

где H_D – действительный напор насоса; H_T – теоретический напор насоса (без учета потерь на гидравлическое сопротивление).

Механический к.п.д. оценивает потери энергии на преодоление трения в подшипниках, винта в обойме, вала в сальниках, вала и шарнира о жидкость:

$$\eta_m = \frac{P - P_{mn}}{P}, \quad (2.8)$$

где P_{mn} – мощность, расходуемая на механические потери.

Характерной особенностью современной нефтедобычи является увеличение в мировой структуре сырьевых ресурсов доли трудноизвлекаемых запасов [25, 26, 32 132, 137], к которым относятся, в основном, тяжелые и высоковязкие нефти с динамической вязкостью μ : 30 $\text{мПа} \cdot \text{с}$, 35 $\text{мм}^2 / \text{с}$ и выше – средний по России; 38,68 $\text{мПа} \cdot \text{с}$, 45,13 $\text{мм}^2 / \text{с}$ и выше – для Приволжского региона.

Агрегат электронасосный центробежный многоступенчатый секционный ЦНСАн 60-66...330 предназначен для перекачивания обводненной газонасыщенной и товарной нефти с температурой от 273 К (0°С) до 318 К (45°С) в системах внутрипромыслового сбора, подготовки и транспорта нефти.

Допускается перекачивание нефти с температурой до 333 К (60°С) при условии наличия системы принудительного охлаждения подшипников.

Перекачиваемая нефть должна соответствовать следующим физико-химическим характеристикам:

плотность, $\text{кг} / \text{м}^3$	700-1050
кинематическая вязкость, $\text{м}^2 / \text{с}$, не более	$1,5 \times 10^{-4}$
водородный показатель, pH	7-8,5
давление насыщенных паров, Па , не более,	665

содержание газа (объемное), %, не более	3
содержание парафина, %, не более	20
содержание механических примесей с размером твердых частиц до 0,2 мм и микротвердостью 1,47 ГПа, % не более	0,2
обводненность, %, не более	90

Давление на входе в насос не более 0,3 МПа (3 кгс/см³).

В условиях транспортировки потока смешанной нефти разность температур между температурой на выходе из емкости E_3 и в характерной точке B с учетом физико-механических свойств транспортируемой нефти, полученная экспериментальным путем (табл. 2.2). С учетом вышеизложенного по экспериментальным данным были получены следующие зависимости: динамической вязкости от температуры СВН; кинематической вязкости от температуры СВН; плотности от кинематической вязкости СВН (рис.2.4...2.6).

Таблица 2.2

Температура сверхвязкой нефти, °C	10	20	30	40	50	60
Динамическая вязкость, μ , кг/(м·с)	4,950	2,282	0,936	0,540	0,240	0,118
Плотность сверхвязкой нефти, кг/м ³	967	958	950	943	936	930
Кинематическая вязкость, ν , м ² /с	0,005119	0,002382	0,000986	0,000572	0,000257	0,000127

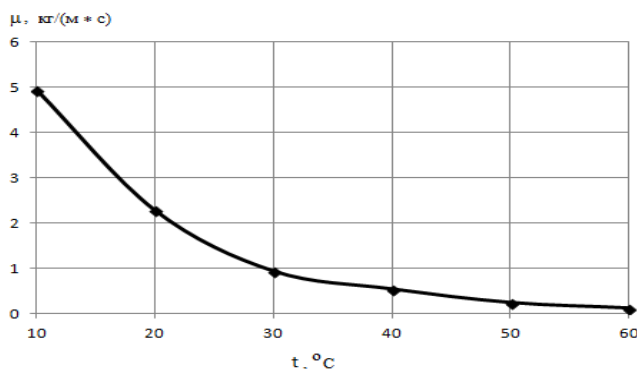


Рисунок 2.4 – График зависимости динамической вязкости от температуры СВН

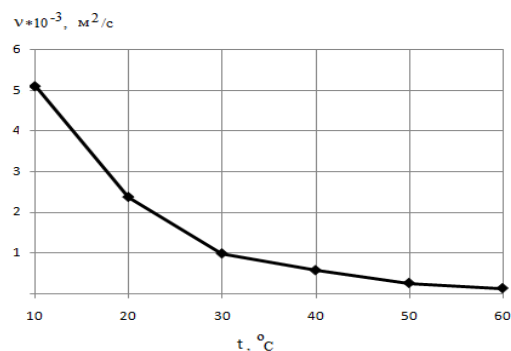


Рисунок 2.5 – График зависимости кинематической вязкости от температуры СВН

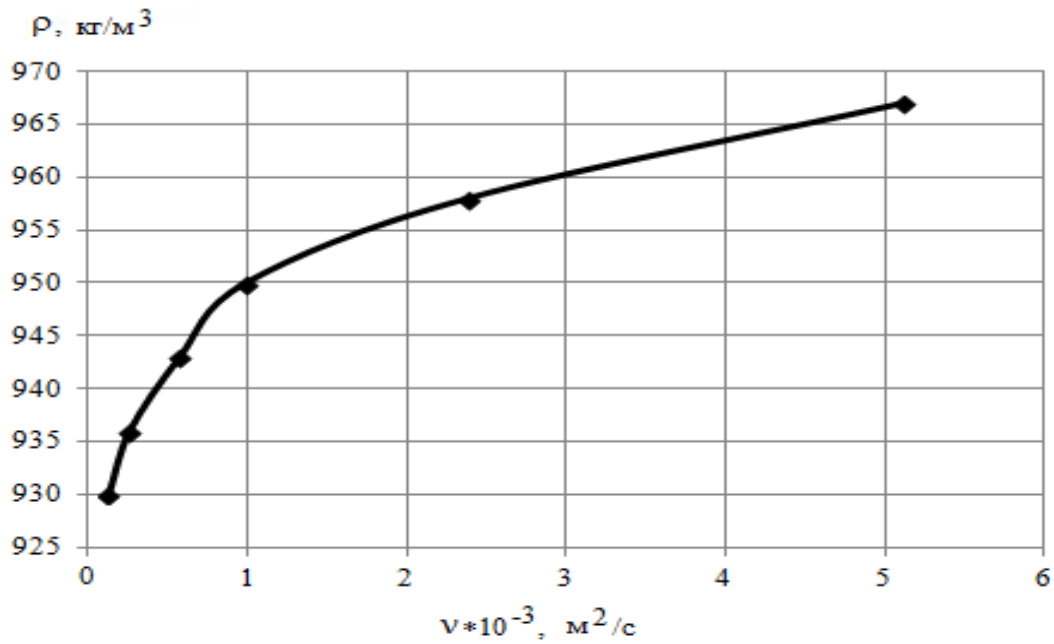


Рисунок 2.6 – График зависимости плотности от кинематической вязкости сверхвязкой нефти

Полезная мощность $P_n = \rho_{\text{жс}} \cdot g \cdot G_{\text{жс}} \cdot H$ – это мощность, затрачиваемая насосом на сообщение потоку смешанной нефти энергии (табл. 2.3, рис.2.7...2.9).

Таблица 2.3

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60
$\rho_{\text{жс}}, \text{ кг/м}^3$	967	958	950	943	936	930
$P_n, \text{ кВт}$	66,68638	67,11662	67,61856	68,1205	68,69414	69,3395

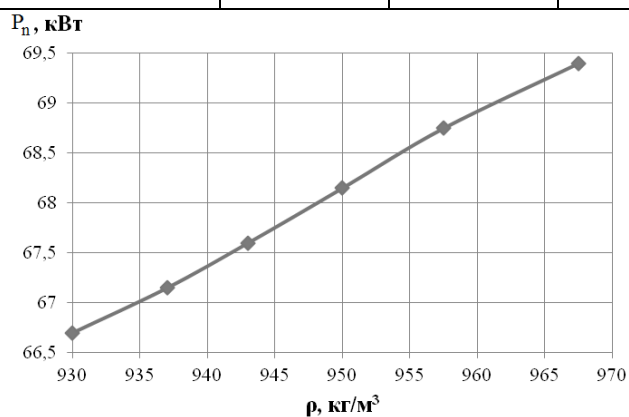


Рисунок – 2.7 График зависимости мощности насоса от плотности СВН: $P_n = f(\rho)$

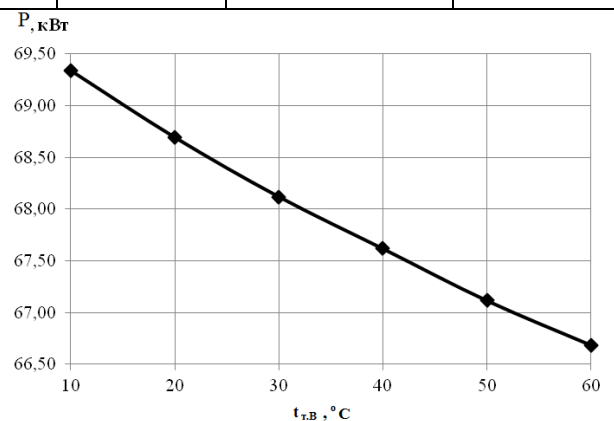


Рисунок 2.8 –График зависимости потребляемой мощности насоса от температуры перекачиваемой нефти
 $P = f(t_{\text{т.в}})$

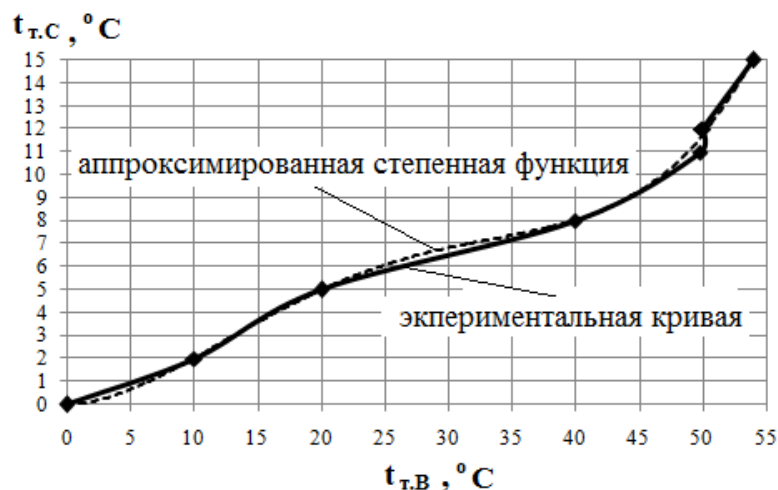


Рисунок 2.9 – График зависимости температуры в точке C от температуры в точке B

Смешивание ВСН и СВН в E_3 влечет за собой снижение температурного градиента потока нефти в трубопроводе, что затрудняет её дальнейшую транспортировку и увеличивает расход электроэнергии в связи с повышением вязкости потока.

Поддержание предложенной температуры потока нефти после E_3 обеспечит улучшение режима работы электропривода и снизит электропотребление, что в свою очередь снизит себестоимость товарной нефти. Ожидаемый годовой экономический эффект определяется на примере сравнения энергетических параметров режимов работы двух насосов, представлен в Приложение 1.

Анализ тенденций и перспектив развития технологии транспортировки потока смешанной нефти с подогревом показывает, что для снижения затрат на транспортировку необходимо оптимизировать параметры технологической схемы транспортировки, мощность и массогабаритные параметры системы подогрева потока смешанной нефти.

Для решения задачи оптимизации технологического процесса тепловой обработки потоков нефти и ее транспортировки необходимо разработать математическую модель объекта управления, с учетом вышеизложенных основных критериев качества и конкретных факторов, влияющих на эти критерии.

Математическая модель объекта управления представлена автором алгебраическими, дифференциальными уравнениями и другими

функциональными уравнениями, объединёнными в общую систему, описывающую технологический процесс теплового воздействия на потоки ВСН, СВН и смешанной нефти.

2.3 Систематизация математических моделей компонентов объекта управления

Для составления математической модели технологического процесса тепловой обработки потоков ВСН, СВН и смешанной нефти с дальнейшей транспортировкой (рис.2.2) вводятся следующие допущения:

1. В переходном процессе нагрева ВСН в E_1 и СВН в емкости E_2 при мгновенной подаче объема пара под давлением процесс передачи тепла происходит с той же скоростью что в установившемся режиме из-за большой тепловой инерционности нефти.

2. В переходном процессе осреднение температуры смешанной нефти в E_3 при мгновенной подаче объемов нефти процесс передачи тепла происходит с той же скоростью, что и в установившемся режиме из-за большой тепловой инерционности жидкости, а также из-за отсутствия перемешивающего механизма.

3. В E_3 происходит идеальное перемешивание, за счет участка трубы входящей в емкость E_3 , где два потока ВСН и СВН перемешиваются под действием турбулентности.

4. Потери тепла в окружающую среду с емкостей и участка трубы до емкости E_3 практически отсутствуют, т.к. достаточно хорошо изолированы.

5. Температура жидкости во всем объеме емкости E_3 одинакова (смеситель идеального перемешивания) и равна температуре выходящего потока.

6. Расход $G_{ж2} \leq G_{ж1}$.

7. Процесс передачи тепла ВСН и СВН происходит равномерно по всему объему емкостей E_1 и E_2 из условия стационарности и равномерного распределения источника тепла.

8. Считается, что при подаче пара под давлением температура мгновенно и

равномерно распределяется в змеевиках E_1 и E_2 (погрешность между равномерной и неравномерной подачей тепла не учитывается)

9. Значения потерь тепла в окружающую среду в установившихся температурных режимах от наружных стен емкостей при повышении температур на 10 градусов (с 70°C до 80°C) ВСН и СВН изменяются незначительно, ими можно пренебречь.

10. Изменения потерь тепла в окружающую среду трубопровода до УПН (длиной 15 км) находящегося в грунте считаются линейными.

2.3.1 Математическая модель нефтепровода

Поскольку на всей установке предварительной подготовки ВСН и СВН проложен трубопровод, то рассмотрим его математическую модель для выявления влияния основных параметров и распределения температуры транспортируемой среды при стационарном течении [76].

Изменение температуры по длине трубопровода $\frac{d\theta_{ж4}}{dL}$ определяется из следующего дифференциального уравнения [76]:

$$\frac{d\theta_{ж4}}{dL} = -\frac{4 \cdot \kappa_T}{D \cdot c_{ж3} \cdot G_{ж3}} (\theta_{ж4} - \theta_{oc}) + \frac{g \cdot i_0}{c_{ж3}}, \quad (2.9)$$

где κ_T – коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$; D – диаметр трубы, м ; $c_{ж3}$ – теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$; $G_{ж3}$ – расход смешанной нефти, $\text{кг}/\text{с}$; $\theta_{ж4}$ – температура потока нефти в т. с, град; θ_{oc} – температура окружающей среды, град; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; i_0 – гидравлический уклон, $\text{м}/\text{м}$.

Решая дифференциальное уравнение (2.9) при начальном условии $\theta_{ж4}(0) = \theta_{ж3}$ получим формулу В.Г.Шухова [76]:

$$\frac{\theta_{ж4}(L) - \theta_{oc} - T_{\otimes}}{\theta_{ж3} - \theta_{oc} - T_{\otimes}} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot D \cdot \kappa_T}{c_{ж3} \cdot G_{ж3}} \cdot L\right), \quad (2.10)$$

где $\theta_{ж4}(L)$ – зависимость распределения температуры потока смешанной нефти по длине трубопровода L ; $\theta_{ж3}$ – температура в точке B ;
 $T_{\otimes} = g \cdot i_0 \cdot G_{ж3} / \pi \cdot d \cdot \kappa_T = const$.

На рисунке 2.10 представлена зависимость распределения $\theta_{ж4}(L)$ температуры среды по длине L участка трубопровода.

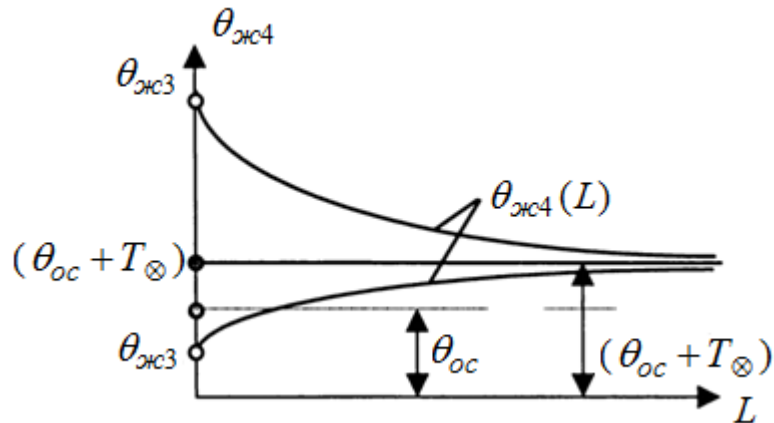


Рисунок 2.10 – Распределение температуры по длине трубопровода

Если начальная температура $\theta_{ж3}$ среды была больше величины $(\theta_{oc} + T_{\otimes})$, то при движении среда охлаждается, а если $\theta_{ж3}$ была меньше, чем $(\theta_{oc} + T_{\otimes})$, то среда постепенно нагревается. Во всех случаях с увеличением расстояния: $\theta_{ж4} \rightarrow (\theta_{oc} + T_{\otimes})$ [70].

Связь между значениями температуры транспортируемой нефти на входе ($\theta_{ж3}$) и выходе ($\theta_{ж4}$) трубопровода длиной $L = 15 \text{ км}$ определяется следующим образом [76]:

$$\frac{\theta_{ж4}(L) - \theta_{oc} - T_{\otimes}}{\theta_{ж3} - \theta_{oc} - T_{\otimes}} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot D \cdot \kappa_T}{c_{ж3} \cdot G_{ж3}} \cdot L\right), \quad (2.11)$$

$$\theta_{ж4}(L) = \exp\left(-\frac{\pi \cdot D \cdot \kappa_T}{c_{ж3} \cdot G_{ж3}} \cdot L\right) \cdot (\theta_{ж3} - \theta_{oc} - T_{\otimes}) + \theta_{oc} + T_{\otimes}. \quad (2.12)$$

Экспоненциальная зависимость в данной формуле характеризует изменения температуры $\theta_{ж3}$ потока смешанной нефти по длине трубопровода L (рис. 2.1, 2.2).

2.3.2 Математическая модель емкости для сырой высокосернистой нефти

В основе математической модели аккумулирующей емкости сырой ВСН E_1 заложен тепловой баланс с применением статической модели процесса обезвоживания ВСН [48, 58, 81]. Принято, что E_1 (рис.2.1, 2.2) является объектом с сосредоточенными параметрами и температура жидкости в межтрубном пространстве имеет одинаковую температуру по всему объему емкости. Пар поступает в змеевик аккумулирующей емкости для ВСН, а нагреваемый продукт проходит через межтрубное пространство.

Для разработки математической модели емкости E_1 вводятся следующие обозначения: Q_1, Q_2 – соответственно количество тепла, поступающего в емкость E_1 с ВСН и поступающего в змеевик с паром, $Дж/сек$; Q_3, Q_4 – соответственно количество тепла, уходящего из емкости E_1 с нагретой ВСН и отводящегося из змеевика отработанного пара, $Дж/сек$; $\theta_{ж1}$ – температура ВСН на выходе из емкости $E_1, ^\circ C$; θ_n – температура пара на выходе из змеевика, $^\circ C$; $\theta_{ст1}$ – температура стенки змеевика в емкости $E_1, ^\circ C$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от змеевика в ВСН, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; α_2 – коэффициент теплоотдачи от пара к змеевику, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; S_1 – площадь наружной поверхности змеевика, $м^2$; S_2 – площадь внутренней поверхности змеевика, $м^2$; $G_{ж1}, G_{п}$ – расход ВСН и пара, $кг/сек$; $c_{ж1}, c_n$ – удельные теплоемкости ВСН и пара, $Дж/кг \cdot ^\circ C$; A_{T1}, A_{T2} – тепловая емкость ВСН и пара соответственно, $Дж/^\circ C$.

Технологический поток ВСН $G_{ж1}$ подается по межтрубному пространству. Теплоноситель (греющий пар) $G_{п}$ подается по змеевику емкости E_1 (рис.2.11).

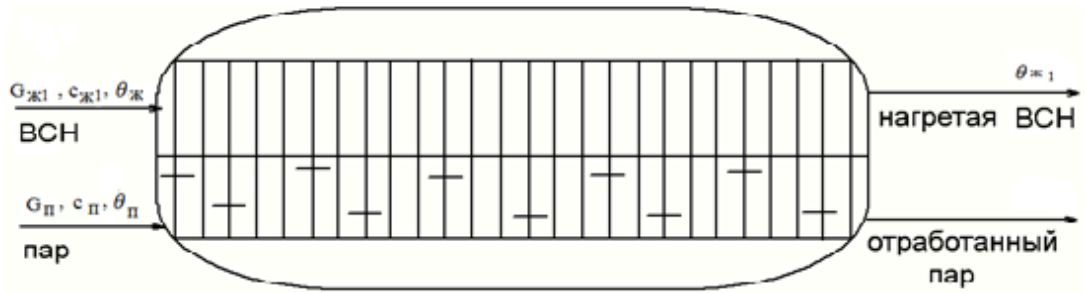


Рисунок 2.11 – Структурная схема аккумулирующей емкости E_1 для ВСН

Уравнение теплового баланса для состояния равновесия имеет вид [73]:

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4 = 0. \quad (2.13)$$

Уравнение переходного процесса для данного объекта записывается следующим образом [81]:

$$\begin{aligned} A_{T1} \cdot \frac{d\theta_{ж1}}{dt} + A_{T2} \cdot \frac{d\theta_n}{dt} &= Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4, \\ G_{ж1} \cdot c_{ж1} \cdot \frac{d\theta_{ж1}}{dt} + G_n \cdot c_n \cdot \frac{d\theta_n}{dt} &= Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4, \quad (2.14) \\ A_{T1} &= G_{ж1} \cdot c_{ж1}, \quad A_{T2} = G_n \cdot c_n. \end{aligned}$$

Тепло от пара к ВСН передается через стенки змеевика, которые являются сопротивлением, поэтому при скачкообразном изменении количества тепла, поступающего с паром, температура ВСН не будет изменяться мгновенно, что определяется временем прогрева змеевика. Количество тепла, получаемое стенками змеевика, пропорционально разности температур $\theta_n - \theta_{cm1}$ [81], т.е.

$$Q_2 - Q_4 = \alpha_2 \cdot S_2 (\theta_n - \theta_{cm1}). \quad (2.15)$$

Скорость нагрева змеевика прямо пропорциональна притоку тепла и обратно пропорциональна тепловой емкости змеевика:

$$G_n \cdot c_n \frac{d\theta_{cm1}}{dt} = \alpha_2 \cdot S_2 (\theta_n - \theta_{cm1}) \text{ или } \frac{G_n \cdot c_n}{\alpha_2 \cdot S_2} \frac{d\theta_{cm1}}{dt} + \theta_{cm1} = \theta_n. \quad (2.16)$$

Тепло, воспринимаемое ВСН от змеевика, пропорционально разности температур: $\theta_{cm1} - \theta_{ж1}$, т.е.

$$Q_{жс} = \alpha_2 \cdot S_2 (\theta_{см1} - \theta_{жс1}). \quad (2.17)$$

Скорость изменения температуры нефти прямо пропорциональна притоку тепла и обратно пропорциональна тепловой емкости нефти:

$$G_{жс1} \cdot c_{жс1} \frac{d\theta_{жс1}}{dt} = \alpha_1 \cdot S_1 (\theta_{см1} - \theta_{жс1}) \text{ или } \frac{G_{жс1} \cdot c_{жс1}}{\alpha_1 \cdot S_1} \frac{d\theta_{жс1}}{dt} + \theta_{жс1} = \theta_{см1}. \quad (2.18)$$

Уравнение (2.16) и (2.18) приводится к следующему виду:

$$\begin{aligned} \left(\frac{G_n \cdot c_n}{\alpha_2 \cdot S_2} \frac{d}{dt} + 1 \right) \cdot \theta_{см1} &= \theta_n, & \left(\frac{G_{жс1} \cdot c_{жс1}}{\alpha_1 \cdot S_1} \frac{d}{dt} + 1 \right) \cdot \theta_{жс1} &= \theta_{см1}; \\ \frac{G_n \cdot c_n}{\alpha_2 \cdot S_2} \frac{d}{dt} + 1 &= \frac{\theta_n}{\theta_{см1}}, & \frac{G_{жс1} \cdot c_{жс1}}{\alpha_1 \cdot S_1} \frac{d}{dt} + 1 &= \frac{\theta_{см1}}{\theta_{жс1}}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Если произвести замену $\frac{d}{dt} = s$, то получим:

$$\frac{G_n \cdot c_n}{\alpha_2 \cdot S_2} \cdot s + 1 = \frac{\theta_n}{\theta_{см1}}, \quad \frac{G_{жс1} \cdot c_{жс1}}{\alpha_1 \cdot S_1} \cdot s + 1 = \frac{\theta_{см1}}{\theta_{жс1}}.$$

Если система или звено имеют несколько каналов прохождения сигнала, что возможно при несколько выходных и входных величинах, то прохождение сигнала в каждом канале характеризуется своей передаточной функцией.

Передаточные функции стенки змеевика и емкости E_1 :

$$W_{см1}(s) = \frac{\frac{\theta_n}{\theta_{см1}}}{\frac{G_n \cdot c_n}{\alpha_2 \cdot S_2} \cdot s + 1}, \quad W_{E1}(s) = \frac{\frac{\theta_{см1}}{\theta_{жс1}}}{\frac{G_{жс1} \cdot c_{жс1}}{\alpha_1 \cdot S_1} \cdot s + 1}. \quad (2.20)$$

2.3.3 Математическая модель замерной емкости для сверхвязкой нефти

Технологический поток СВН $G_{жс2}$ подается по межтрубному пространству. Теплоноситель (греющий пар) G_{II} подается по змеевику замерной емкости (рис. 2.12).

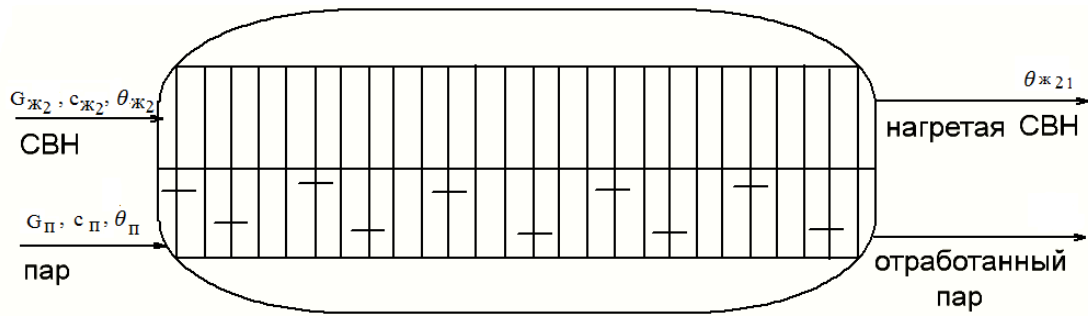


Рисунок 2.12 – Структурная схема замерной емкости E_2 для СВН

Переходный процесс для данного объекта описывается следующим уравнением [81]:

$$A_{1e} \cdot \frac{d\theta_{ж2}}{dt} + A_{2e} \cdot \frac{d\theta_n}{dt} = Q_{1e} + Q_{2e} - Q_{3e} - Q_{4e}, \quad (2.21)$$

$$G_{ж2} \cdot c_{ж2} \cdot \frac{d\theta_{ж2}}{dt} + G_n \cdot c_n \cdot \frac{d\theta_n}{dt} = Q_{1e} + Q_{2e} - Q_{3e} - Q_{4e},$$

$$A_{1e} = G_{ж2} c_{ж2},$$

$$A_{2e} = G_n c_n,$$

где Q_{1e} , Q_{2e} – соответственно количество тепла, поступающего в емкость E_2 с СВН и поступающего в змеевик с паром, $Дж/сек$; Q_{3e} , Q_{4e} – соответственно количество тепла, уходящего из емкости E_2 с нагретой СВН и отводящегося из змеевика отработанного пара, $Дж/сек$; $\theta_{ж2}$ – температура СВН на выходе из емкости E_2 , $^{\circ}C$; θ_n – температура пара на входе в змеевик, $^{\circ}C$; θ_{cm2} – температура стенки змеевика в емкости E_2 , $^{\circ}C$; α_{1e} – коэффициент теплоотдачи от змеевика в СВН, $Вт/(м^2 \cdot ^{\circ}C)$; α_{2e} – коэффициент теплоотдачи от пара к змеевику, $Вт/(м^2 \cdot ^{\circ}C)$; S_{1e} – площадь наружной поверхности змеевика, $м^2$; S_{2e} – площадь внутренней поверхности змеевика, $м^2$; $G_{ж2}$, G_n – расход СВН и пара, $кг/сек$; $c_{ж2}$, c_n – удельные теплоемкости СВН и пара, $Дж/кг \cdot ^{\circ}C$; A_{T1e} , A_{T2e} – тепловая емкость СВН и пара соответственно, $Дж/^{\circ}C$.

Уравнение теплового баланса для состояния равновесия, когда температура нефти на выходе из емкости не изменяется [81]:

$$Q_{1e} + Q_{2e} - Q_{3e} - Q_{4e} = 0. \quad (2.22)$$

Количество поступающего Q_{1e} , Q_{2e} и уходящего Q_{3e} , Q_{4e} тепла зависит от расхода нефти и пара, их теплоемкости и температуры.

Тепло от пара к СВН передается через стенки змеевика, которые являются сопротивлением, поэтому при скачкообразном изменении количества тепла, поступающего с паром, температура СВН не будет изменяться мгновенно, что определяется временем прогрева змеевика. Количество тепла, получаемое стенками змеевика, пропорционально разности температур $\theta_n - \theta_{cm2}$ [81], т.е.

$$Q_{2e} - Q_{4e} = \alpha_{2e} \cdot S_{2e} (\theta_n - \theta_{cm2}). \quad (2.23)$$

Скорость нагрева змеевика прямо пропорциональна притоку тепла и обратно пропорциональна тепловой емкости змеевика:

$$G_n c_n \frac{d\theta_{cm2}}{dt} = \alpha_{2e} \cdot S_{2e} (\theta_n - \theta_{cm2}) \text{ или } \frac{G_n c_n}{\alpha_{2e} \cdot S_{2e}} \frac{d\theta_{cm2}}{dt} + \theta_{cm2} = \theta_n. \quad (2.24)$$

Тепло, воспринимаемое СВН от змеевика, пропорционально разности температур: $\theta_{cm2} - \theta_{жс2}$, т.е.

$$Q_{жс2} = \alpha_{2e} \cdot S_{2e} (\theta_{cm2} - \theta_{жс2}). \quad (2.25)$$

Скорость изменения температуры нефти прямо пропорциональна притоку тепла и обратно пропорциональна тепловой емкости нефти:

$$G_{жс2} c_{жс2} \frac{d\theta_{жс2}}{dt} = \alpha_{1e} \cdot S_{1e} (\theta_{cm2} - \theta_{жс2}) \text{ или } \frac{G_{жс2} c_{жс2}}{\alpha_{1e} \cdot S_{1e}} \frac{d\theta_{жс2}}{dt} + \theta_{жс2} = \theta_{cm2}. \quad (2.26)$$

Уравнения (2.24) и (2.26) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} \left(\frac{G_n c_n}{\alpha_{2e} \cdot S_{2e}} \cdot \frac{d}{dt} + 1 \right) \cdot \theta_{cm2} &= \theta_n, \\ \left(\frac{G_{жс2} c_{жс2}}{\alpha_{1e} \cdot S_{1e}} \cdot \frac{d}{dt} + 1 \right) \cdot \theta_{жс2} &= \theta_{cm2}; \end{aligned}$$

$$\frac{G_n c_n}{\alpha_{2e} \cdot S_{2e}} \cdot \frac{d}{dt} + 1 = \frac{\theta_n}{\theta_{cm2}}, \quad \frac{G_{ж2} c_{ж2}}{\alpha_{1e} \cdot S_{1e}} \cdot \frac{d}{dt} + 1 = \frac{\theta_{cm2}}{\theta_{ж2}}. \quad (2.27)$$

Далее, вводится замена $\frac{d}{dt} = s$:

$$\frac{G_n c_n}{\alpha_{2e} \cdot S_{2e}} \cdot s + 1 = \frac{\theta_n}{\theta_{cm2}},$$

$$\frac{G_{ж2} c_{ж2}}{\alpha_{1e} \cdot S_{1e}} \cdot s + 1 = \frac{\theta_{cm2}}{\theta_{ж2}}.$$

Передаточные функции стенки змеевика и емкости E_2 :

$$W_{cm2}(s) = \frac{\frac{\theta_n}{\theta_{cm2}}}{\frac{G_n c_n}{\alpha_{2e} \cdot S_{2e}} \cdot s + 1}, \quad W_{E2}(s) = \frac{\frac{\theta_{cm2}}{\theta_{ж2}}}{\frac{G_{ж2} c_{ж2}}{\alpha_{1e} \cdot S_{1e}} \cdot s + 1}. \quad (2.28)$$

2.3.4 Математическая модель емкости для смешивания высокосернистой и сверхвязкой нефти

На рисунках 2.1, 2.2 емкость E_3 является смесителем непрерывного действия, в который поступают два потока нефти с разными физическими свойствами (т.е. с теплоемкостью $c_{ж1}$, $c_{ж2}$ и плотностью $\rho_{ж1}$, $\rho_{ж2}$). Первый поток нефти от E_1 имеет температуру $\theta_{ж1}$ и постоянный расход $G_{ж1}$, а второй поток нефти от E_2 – постоянную температуру ($\theta_{ж2}$) и постоянный расход $G_{ж2}$.

Уравнение теплового баланса E_3 :

$$\rho_{ж1} \cdot c_{ж1} \cdot G_{ж1} \cdot \theta_{ж1} + \rho_{ж2} \cdot c_{ж2} \cdot G_{ж2} \cdot \theta_{ж2} - \rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot \theta_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2}) = 0, \quad (2.29)$$

где $\theta_{ж3}$ – температура смешанной нефти из емкости E_3 .

$$\theta_{ж3} = \frac{\rho_{ж1} \cdot c_{ж1} \cdot G_{ж1}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})} \cdot \theta_{ж1} + \frac{\rho_{ж2} \cdot c_{ж2} \cdot G_{ж2}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})} \cdot \theta_{ж2}, \quad (2.30)$$

$$\theta_{ж3} = k_{1\tau} \cdot \theta_{ж1} + k_{2\tau} \cdot \theta_{ж2}, \quad (2.31)$$

где $k_{1\tau} = \frac{\rho_{ж1} \cdot c_{ж1} \cdot G_{ж1}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})}$, $k_{2\tau} = \frac{\rho_{ж2} \cdot c_{ж2} \cdot G_{ж2}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})}$ – эквивалентные

коэффициенты для определения температуры потоков ВСН и СВН.

Основные технологические, справочные параметры представлены в таблице 2.4. и в Приложение 2.

Таблица 2.4

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Поток сырой ВСН	Поток СВН	Поток смешанной нефти
1	Плотность нефти	$\rho_{ж1}, \rho_{ж2}, \rho_{ж3}$	$кг / м^3$	634	966	912,54
2	Теплоемкость нефти	$c_{ж1}, c_{ж2}, c_{ж3}$	$Дж / кг \cdot ^\circ C$	2100	2200	2050
3	Расход нефти	$G_{ж1}, G_{ж2}, G_{ж3}$	$м^3 / с$	0,0083	0,0033	0,012
4	Расход пара	$G_{п1}, G_{п2}$	$м^3 / с$	0,011	0,011	-
5	Теплоемкость пара	c_n	$Дж / кг \cdot ^\circ C$	4200	4200	-
6	Площадь наружной поверхности змеевика	S_1	$м^2$	11,785	11,785	-
7	Площадь внутренней поверхности змеевика	S_2	$м^2$	12,460	12,460	-
8	Коэффициент теплоотдачи от трубы к жидкости	α	$Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$	1,2	1,2	-
9	Теплоемкость стали	$c_{ст}$	$Дж / кг \cdot ^\circ C$	480	480	-

2.3.5 Математическая модель электропривода задвижки

Согласно схемам, приведенным на рисунках 2.1 и 2.2, предлагается два контура управления температурой:

первый (внешний) контур – обеспечивает управление температурой потока смешанной нефти на выходе из емкости E_3 , для поддержания заданной температуры в точке C ;

второй (внутренний) контур – обеспечивает поддержание заданного уровня температуры потока СВН на выходе емкости E_2 .

Управление температурой потоков нефти в емкостях E_1 и E_2 осуществляется с помощью задвижек Э31 и Э32 путем регулирования их электропривода – электродвигателя постоянного тока.

Математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена в виде системы уравнений [118]:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + RI + E = U_{\text{я}} \\ J \frac{d\omega_z}{dt} = M_{\text{д}} - M_c \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} U_{\text{я}} - \frac{1}{L} RI - \frac{1}{L} c_1 \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{1}{J} c_2 I - \frac{1}{J} M_c \end{cases}, (2.32)$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение, подаваемое на якорь двигателя; I – ток в цепи якоря; R, L – сопротивление и индуктивность цепи якоря; $E = c_1 \omega_z$ – противоЭДС, т.е. напряжение, возникающее в обмотке якоря в результате его вращения в магнитном поле; ω_z – скорость вращения двигателя; $M_{\text{д}} = c_2 I$ – вращающийся электромагнитный момент; $M_c = M_c(t)$ – момент сопротивления на валу двигателя; $c_i = \text{const}$, $i = \overline{1,2}$; J – приведенный момент инерции.

Угол поворота заслонок задвижек Э31, Э32 и скорость вращения их электроприводов определяются следующими зависимостями:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_{z1}, \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_{z2}. \quad (2.33)$$

Пропорционально углу поворота заслонки рассчитывается расход пара, поступающего в емкости E_1 и E_2 : $G_n = k_{\varphi} \cdot \varphi_1$, где $k_{\varphi} = \frac{G_n}{\pi/2}$ – коэффициент открытия заслонки, зависящий от конструктивного исполнения исполнительного механизма. Так как в качестве греющего агента используется пар, температура которого постоянна, то изменение количества тепла можно заменить изменением количества пара: $\Delta Q_2 = \Delta G_n \cdot k_n$ (Дж/сек), где k_n – коэффициент пропорциональности. Температура пара определяется по формуле: $\theta_n = \frac{\Delta Q_2}{G_n \cdot c_n}$ (град.).

Основные формулы и справочные параметры для расчета коэффициентов представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Параметры в относительных единицах (о.е.)	Технологические и справочные параметры
$a_{12} = \frac{c_2}{J} = 2,5 \quad h = \frac{1}{J}, \quad a_{21} = -\frac{c_1}{L} = -2,$ $a_{22} = -\frac{R}{L} = -1,1 \quad b = \frac{1}{L}.$ $I_{1*} = \frac{I_1}{I_{\bar{o}}} = 0,85; \quad U_{1*} = \frac{U_{я1}}{U_{\bar{o}}} = 1;$ $M_{1*} = \frac{M_1}{M_{\bar{o}}} = 0,85; \quad J_{1*} = \frac{J_1}{J_{\bar{o}}} = 1;$ $L_{1*} = \frac{L_1}{L_{\bar{o}}} = 1; \quad \omega_{1*} = \frac{\omega_1}{\omega_{\bar{o}}} = 1;$ $R_{1*} = \frac{R_1}{z_{\bar{o}}} = 0,84674;$ $\omega_{1*} = 2,5 - 0,85 = 1,15.$	$R_1 = 10 \text{ Ом},$ $L_1 = 20 \text{ мГн},$ $X_1 = L_1 * \omega_0 = 20 * 314 * 10^{-3} = 6,28 \text{ Ом};$ $z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{10^2 + 6,28^2} = 11,81 \text{ Ом};$ $c_{11} = c_{12} = 2;$ $c_{21} = c_{22} = 2,5;$ $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$ $I_{\bar{o}} = I_{\text{ном.}}; \quad U_{\bar{o}} = U_{\text{ном.}} \quad M_{\bar{o}} = M_{\text{ном.}}; \quad \omega_{\bar{o}} = \omega_0 = 314 \text{ с}^{-1};$ $z_{\bar{o}} = z_1 = 11,81 \text{ Ом}; \quad L_{\bar{o}} = L_1 = 20 \text{ мГн}.$ $J_{\bar{o}} = J_{\text{ном.}} = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$

Датчик температуры формирует на выходе сигнал напряжения, пропорциональный значению температуры жидкости на выходе змеевика.

Регулятор представляет собой типовой электрический ПИД - регулятор, на вход которого поступает сигнал рассогласования, сформированный элементом сравнения, как разность сигналов датчика и задатчика, а на его выходе формируется управляющий сигнал в границах $\pm 10 \text{ В}$.

Исполнительное устройство включает два согласующих устройства и исполнительный механизм:

1. Согласующее устройство СУ1 – представляет собой преобразователь давления, на вход которого поступает сигнал управления, сформированный

регулятором «U», в виде напряжения – 0...10В, на выходе формируется сигнал «P1», в виде давления равный 0,25МПа.

2. Согласующее устройство СУ2 – представляет собой преобразователь перемещения, на вход которого поступает сигнал, сформированный исполнительным механизмом (ИМ) в виде давления «P2», равного 2,5МПа, на выходе формируется сигнал « X_{um} », в виде перемещения штока равного 16мм.

3. Гидравлический исполнительный механизм ИМ – преобразует сигнал на входе «P1», в виде давления сформированного на выходе СУ1 и равного 0,25МПа, в сигнал на выходе «P2», в виде давления, изменяющегося в пределах 2,5...20МПа.

Математическая модель датчика температуры: $(T \rightarrow T_{ВЫХ})$, где T – температура жидкости на выходе, °C; $T_{ВЫХ}$ – сигнал датчика, В.

На объекте использован датчик температуры, передаточная функция звена которого имеет вид:

$$W_D(s) = k_D, \quad (2.34)$$

где $k_D = 1 [^{\circ}\text{C} / \text{В}]$.

Математическая модель элемента сравнения $((T_{ВЫХ} - T_{ЗАД}) \rightarrow \Delta)$, где $T_{ЗАД}$ – сигнал задатчика, В; Δ – сигнал рассогласования, В.

Передаточная функция звена будет иметь вид:

$$W_{\Sigma C}(s) = T_{ВЫХ}(s) - T_{ЗАД}(s). \quad (2.35)$$

Математическая модель регулятора: $(\Delta \rightarrow u)$, где u – сигнал управления, В.

В модели используется ПИД - регулятор математическая модель которого имеет вид:

$$W_{PID}(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot s. \quad (2.36)$$

Математическая модель исполнительного устройства: $(u \rightarrow X_{um1})$.

Математическая модель согласующего устройства: $(u \rightarrow f)$, где u – сигнал управления, В; f – частота тока питающей сети, Гц.

Передаточная функция звена имеет вид: $W_{СУ}(s) = k_{СУ}$, (2.37)

где $k_{СУ} = f / u = 50 / 10 = 5 [Гц / \text{В}]$.

Математическая модель электродвигателя: $(f \rightarrow \psi_1)$, где n – частота вращения ротора двигателя, об/с.

В качестве электродвигателя используется асинхронный четырехполюсный двигатель, для которого синхронная частота вращения ротора n при частоте тока питающей сети 50 Гц равна 25 об/с, а зависимость частоты вращения ротора от частоты тока питающей сети линейная.

Двигатель для схемы $(f \rightarrow n)$ представляет собой звено первого порядка, передаточная функция которого имеет вид: $W_{ДВ}(s) = \frac{k_{ДВ}}{T_{ДВ}s + 1}$. (2.38)

Коэффициент передачи для двигателя в этом случае равен $k_{ДВ} = n / f = 25 / 50 = 0,5$.

Постоянную времени для электродвигателей можно определить по моментам инерции, либо маховым моментам ротора, приводимым в каталогах. Для асинхронных трехфазных двигателей единой серии мощностью 0,6...1,5 кВт постоянную времени $T_{ДВ}$ можно принимать в пределах от 0,6 до 1,8 с.

Однако, для дальнейшего использования необходимо получить преобразование несколько другого вида: $(f \rightarrow \psi_{я1})$, где $\psi_{я1}$ – угол поворота якоря двигателя, об.

В этом случае передаточная функция примет вид:

$$W_{ДВ}(s) = \frac{k_{ДВ}}{T_{ДВ}s + 1} \cdot \frac{1}{s}. \quad (2.39)$$

Ограничим перемещение штока вентиля до $0,5D_y$, для чего используем интегратор «с насыщением». Математическая модель редуктора $(\psi_{я1} \rightarrow \psi_{я2})$, где $\psi_{я2}$ – угол поворота выходного вала редуктора, об.

Передаточная функция имеет вид: $W_{ред}(s) = k_{ред}$ или $i_{ред}$.

Полагаем, что редуктор привода настраиваемый, поэтому модель привода должна содержать настройку. Математическая модель механизма привода штока

вентиля ($\psi_{я2} \rightarrow X_{um1}$), где X_{um1} – перемещение штока вентиля, м
 $W_{n.um}(s) = k_{n.um}$.

Будем считать, что перемещение штока вентиля производится механизмом «винт-гайка». Шаг гайки h примем равным 0,004м. Тогда $k_{n.um} = 0,004 \text{ м/об}$. Математическая модель исполнительного устройства в целом ($u \rightarrow X_{um1}$), где u – сигнал управления, В.

Модель исполнительного устройства в целом имеет вид:

$$W_z(s) = k_{C.Y.} \cdot \frac{k_{DB}}{T_{DB}s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot k_{\varphi}.$$

2.3.6 Математическая модель насосного агрегата

За основу математической модели насосных агрегатов принимается математическая модель, учитывающая параметры регулирования скорости вращения ротора [76]. Вращение ротора описывается обыкновенным дифференциальным уравнением: $J_{ин.} \frac{d\omega}{dt} = M_{вр.} - M$, (2.40)

где $J_{ин.}$ – момент инерции ротора насосного агрегата; ω – угловая скорость; $M_{вр.}$ – момент сил на валу ротора (вращательный момент, развиваемый приводом); M_n – момент нагрузки, т.е. момент сил сопротивления вращения вала ротора.

Если насос работает в стационарном режиме с постоянной частотой ω_0 вращения вала ротора, то выполняется равенство $M_{вр.} = M$. Поскольку мощность $N_{мех}$ насоса, с одной стороны представляется как $M_{вр.} \cdot \omega_0$, а с другой стороны

она равна $\rho g \Delta H \cdot G / \eta$, то имеют место равенства [76] $M_{вр.} = M = \frac{S_0 \Delta p_{\omega_0} \cdot \nu}{\eta} \cdot \frac{1}{\omega_0}$,

где Δp_{ω_0} – дифференциальное давление, развиваемое насосом при частоте вращения его ротора, равной ω_0 ; $\nu = \frac{G}{S_0}$ – скорость транспортирования жидкости.

Если предположить далее, что в нестационарном режиме работы частота ω вращения ротора насоса изменяется, но полученная для момента сил нагрузки $M_{\text{н}}$ формула сохраняется в общем виде, то дифференциальное уравнение вращения ротора можно представить в виде [76]:

$$J_{\text{ин.}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{сп.}} - \frac{S_0 \Delta p_{\omega_0} \cdot \nu}{\eta} \cdot \frac{1}{\omega_0}, \quad (2.41)$$

где Δp_{ω} - дифференциальное давление, развиваемое насосом при частоте вращения его ротора, равной ω .

Законы подобия утверждают, что величина Δp_{ω} дифференциального давления, развиваемого насосом при частоте вращения ω , связана с величиной Δp_{ω_0} аналогичного давления при частоте вращения ω_0 зависимостью $\Delta p_{\omega} = (\omega / \omega_0)^2 \cdot \Delta p_{\omega_0} (\omega_0 / \omega \cdot G)$ [76], поэтому систему уравнений, моделирующую работу центробежного насоса с переменной скоростью вращения ротора, можно представить в виде системы одного алгебраического и одного обыкновенного дифференциального уравнения (в терминах напора и расхода) [70]:

$$\begin{cases} \Delta p_{\omega} = (\omega / \omega_0)^2 \cdot F(\nu \cdot \omega_0 / \omega) \\ J_{\text{ин.}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{сп.}} - \frac{S_0 (\omega / \omega_0)^2 \Delta p_{\omega} \cdot \nu}{\eta} \cdot \frac{1}{\omega} \end{cases}, \text{ или в терминах напора и расхода:}$$

$$\begin{cases} \Delta H = (\omega / \omega_0)^2 \cdot F(\omega_0 / \omega \cdot G) \\ J_{\text{ин.}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{сп.}} - \frac{\rho g \cdot G \cdot (\omega / \omega_0)^2 F(\omega_0 / \omega \cdot G)}{\eta} \cdot \frac{1}{\omega} \end{cases}, \quad (2.42)$$

где $F(G, \omega_0)$ - $(G, \Delta H)$ - характеристика насоса при номинальной частоте оборотов рабочего колеса ω_0 .

2.3.7 Систематизация функционально-ориентированной модели объекта управления при тепловой обработке транспортируемых потоков высокосернистой и сверхвязкой нефти

Произведена систематизация аналитических зависимостей формирующих

ФОМ. Определение вектора состояния потока и вектора непрерывного наблюдения проводится на базе уравнений: теплового баланса с применением статической модели процесса подогрева ВСН, СВН и определения температуры общего потока нефти; распределения температуры в потоке транспортируемой нефти при стационарном течении; постоянного тока с независимым возбуждением электроприводов задвижек.

ФОМ тепловой обработки потоков ВСН, СВН и вязкой нефти и их транспортировки состоит из дифференциальных и алгебраических уравнений [38, 41, 76]:

$$\frac{d\theta_{ж1}}{dt} = k_{1ж} \cdot \theta_{cm1} - \theta_{ж1} \cdot k_{12ж}, \quad (2.43) \quad \frac{d\theta_{ж2}}{dt} = k_{2ж} \cdot \theta_{cm2} - \theta_{ж2} \cdot k_{22ж}, \quad (2.47)$$

$$\frac{d\theta_{cm1}}{dt} = k_{cm12} \cdot \theta_n - k_{cm1} \cdot \theta_{cm1}, \quad (2.44) \quad \frac{d\theta_{cm2}}{dt} = k_{cm22} \cdot \theta_n - k_{cm2} \cdot \theta_{cm2}, \quad (2.49)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{L_1} U_1 - \frac{1}{L_1} R_1 I_1 - \frac{1}{L_1} c_1 \omega_{z1}, \quad (2.45) \quad \frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{L_2} U_2 - \frac{1}{L_2} R_2 I_2 - \frac{1}{L_2} c_1 \omega_{z2}, \quad (2.50)$$

$$\frac{d\omega_{z1}}{dt} = \frac{1}{J_1} c_2 I_1 - \frac{1}{J_1} M_c, \quad (2.46) \quad \frac{d\omega_{z2}}{dt} = \frac{1}{J_2} c_2 I_2 - \frac{1}{J_2} M_c, \quad (2.51)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_{z1}, \quad (2.47) \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_{z2}, \quad (2.52)$$

$$\theta_{ж3} = k_{1\tau} \cdot \theta_{ж1} + k_{2\tau} \cdot \theta_{ж2}, \quad (2.53)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\mu_{t,1} &\approx \frac{d\theta_{ж1}}{dt} \cdot \theta_{ж1} + \frac{d\theta_{oc}}{dt} \cdot \theta_{oc} + \frac{dG_{ж1}}{dt} \cdot G_{ж1} + \frac{dN_{ж1}}{dt} \cdot N_{ж1}, \\ \Delta\mu_{t,2} &\approx \frac{d\theta_{ж2}}{dt} \cdot \theta_{ж2} + \frac{d\theta_{oc}}{dt} \cdot \theta_{oc} + \frac{dG_{ж2}}{dt} \cdot G_{ж2} + \frac{dN_{ж2}}{dt} \cdot N_{ж2}, \\ \Delta\mu_{t,3} &\approx \frac{d\theta_{ж3}}{dt} \cdot \theta_{ж3} + \frac{d\theta_{oc}}{dt} \cdot \theta_{oc} + \frac{dG_{ж3}}{dt} \cdot G_{ж3} + \frac{dN_{ж3}}{dt} \cdot N_{ж3}. \end{aligned} \right\} \quad (2.54 \text{ a})$$

$$\theta_{ж4}(L) = \exp\left(-\frac{\pi \cdot D \cdot \kappa_T}{c_{ж3} \cdot G_{ж3}} \cdot L\right) \cdot (\theta_{ж3} - \theta_{oc} - T_{\otimes}) + \theta_{oc} + T_{\otimes}, \quad (2.546)$$

где $k_{1ж} = (\alpha_1 \cdot S_1) / G_{ж1} \cdot c_{ж1}$, $k_{12ж} = -(\alpha_1 \cdot S_1) / G_{ж1} \cdot c_{ж1}$, $k_{2ж} = (\alpha_{1e} \cdot S_{1e}) / G_{ж2} \cdot c_{ж2}$, $k_{22ж} = -(\alpha_{1e} \cdot S_{1e}) / G_{ж2} \cdot c_{ж2}$ – эквивалентные коэффициенты для определения температуры ВСН и СВН в емкостях E_1 и E_2 ; α_1 , α_{1e} – коэффициенты

теплоотдачи от змеевиков к ВСН и СВН; S_1, S_{1e} – площадь наружной поверхности змеевиков в емкостях; $G_{ж1}, G_{ж2}, G_{II}, c_{ж1}, c_{ж2}, c_n$ – расходы и удельные теплоемкости ВСН, СВН и пара соответственно; $k_{cm12} = (\alpha_2 \cdot S_2) / G_n \cdot c_n$, $k_{cm1} = -(\alpha_2 \cdot S_2) / G_n \cdot c_n$, $k_{cm22} = (\alpha_{2e} \cdot S_{2e}) / G_{ne} \cdot c_{ne}$, $k_{cm2} = -(\alpha_{2e} \cdot S_{2e}) / G_{ne} \cdot c_{ne}$ – эквивалентные коэффициенты для определения температуры стенок змеевиков в емкостях; α_2, α_{2e} – коэффициенты теплоотдачи от пара к змеевикам в емкостях; S_2, S_{2e} – площади внутренних поверхностей змеевиков в емкостях;

$$k_{1\tau} = \frac{\rho_{ж1} \cdot c_{ж1} \cdot G_{ж1}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})}, \quad k_{2\tau} = \frac{\rho_{ж2} \cdot c_{ж2} \cdot G_{ж2}}{\rho_{ж3} \cdot c_{ж3} \cdot (G_{ж1} + G_{ж2})} \quad - \quad \text{эквивалентные}$$

коэффициенты для определения температуры потоков ВСН и СВН.

Расход пара, поступающего в емкости E_1 и E_2 : $G_{n1} = k_{\varphi 1} \cdot \varphi_1$ и $G_{n2} = k_{\varphi 2} \cdot \varphi_2$ - пропорционален углам поворота заслонки φ_1 и φ_2 , при этом $k_{\varphi 1} = \frac{G_{n1}}{\pi/2}$, $k_{\varphi 2} = \frac{G_{n2}}{\pi/2}$ – коэффициенты открытия заслонки, зависящие от конструктивного исполнения исполнительного механизма. Температура пара $\theta_n = \frac{\Delta Q_2}{G_n \cdot c_n}$, как теплоносителя принята постоянной, поэтому изменение тепла пропорционально изменению количества пара: $\Delta Q_2 = \Delta G_n \cdot k_n$, где k_n – коэффициент пропорциональности. Программа для расчета коэффициентов емкостей E_1, E_2, E_3 представлена в приложение 3.

Приведенные в детерминированной модели аналитические зависимости вязкости (2.54 а) не позволяют напрямую вычислить её изменение из-за существующих в этих параметрах неопределенностей, поэтому данная модель дополняется нечетким регулятором.

Повышение вязкости существенно влияет на мощность потребляемую насосом при транспортировке вязкой нефти.

Решение основной задачи можно осуществить путем применения моделей-идентификаторов состояния потоков в контуре системы управления установкой

подогрева нефти при первичной подготовке СВН для её адаптации в условиях некоторой неопределенности на основе системно-структурированного математического моделирования процесса.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Проведен системный анализ основных параметров иерархической системной структуры технологических комплексов первичной подготовки ВСН и СВН и транспортировки потока вязкой нефти.

2. Разработана структурная схема системы управления температурой потока нефти с нечетким регулятором и на основе данной схемы составлена функциональная схема системы управления.

3. На основе системного анализа основных показателей структурной схемы объекта управления, разработаны основные критерии качества управления температурным режимом.

4. Проведена систематизация функционально-ориентированной модели объекта управления при тепловой обработке потоков ВСН, СВН и смешанной нефти с её дальнейшей транспортировкой.

ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ С ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ

Произведены натурные измерения в летний период при следующих условиях окружающей среды. Средняя температура окружающей среды принималась $\theta_{oc} = 19,5^\circ C$, а температура вокруг трубопровода с глубиной залегания 1,65 м: $\theta_{в.тр.} = 15^\circ C$. Данные параметры принимались по статистическим данным региона Республики Татарстан, т.е. самый теплый месяц считается июль со средними температурами окружающей среды $\theta_{oc} = 18...20^\circ C$, а самый холодный месяц январь со средними температурами окружающей среды $\theta_{oc} = -13...-14^\circ C$.

При этом были получены следующие параметры (таблица 2.2): температура в точке C (экспериментальная) $\theta_{ж4.Э}$, $^\circ C$; расход вязкой (смешанной) нефти $G_{ж3.Э}$, $м^3 / ч$ плотность смешанной нефти $\rho_{ж3}$, кинематическая и динамическая вязкость смешанной нефти $\nu_{ж3}$, $\mu_{ж3}$; расход СВН $G_{ж2}$, $м^3 / ч$; расход ВСН нефти $G_{ж1}$, $м^3 / ч$. Измерения проводились при следующих начальных условиях: температура ВСН поддерживается $69^\circ C$, а СВН – $74^\circ C$ при подаче пара $0,011 м^3 / ч$ и температуре пара $179^\circ C$.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные с объекта управления

№ п/п	Температура в точке C (эксперимент): $\theta_{ж4.Э}$, $^\circ C$	Расход вязкой нефти: $G_{ж3.Э}$, $м^3 / ч$	Плотность смешанной нефти: $\rho_{ж3}$, $кг / м^3$	Кинематическая вязкость смешанной нефти: $\nu_{ж3}$, $мм^2 / с$	Динамическая вязкость смешанной нефти: $\mu_{ж3}$, $кг / (м \cdot с)$	Расход СВН нефти: $G_{ж2}$, $м^3 / ч$	Расход ВСН нефти: $G_{ж1}$, $м^3 / ч$
1	18	25	913,00	260	0,23738	12	13
2	19	27,67	914,00	259,43	0,23764	12	15,67
3	20	32	910,00	260	0,23660	12	20
4	21	34	912,25	258,94	0,237185	12	22
5	22	34	911,00	259,72	0,236860	12	22
6	23	35	915,00	260	0,237900	12	23
7	23	42	912,25	258,94	0,237185	12	30

Для определения сходимости результатов ФОМ с физической моделью по определению температуры в заданной точке было произведено моделирование с

использованием результатов натуральных измерений, т.е. расход СВН: $G_{ж2}$, $м^3/ч$, расход ВСН: $G_{ж1}$, $м^3/ч$ и при тех же начальных условиях.

В результате моделирования были получены температуры в четыре точки: $\theta_{ж1.расч.}$, $\theta_{ж2.расч.}$, $\theta_{ж3.расч.}$, $\theta_{ж4.расч.}$. Относительная погрешность определяется по следующей формуле: $\Delta = \left| \frac{\theta_{ж4.э} - \theta_{ж4.расч.}}{\theta_{ж4.э}} \right| \cdot 100\%$.

Полученные результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Моделирование процесса теплового воздействия на потоки нефти с помощью ФОМ в летний период $\theta_{ос} = 19,5^\circ C$

№ п/п	Температура в точке С (эксперимент): $\theta_{ж4.э}$, $^\circ C$	Расход вязкой нефти: $G_{ж3.э}$, $м^3/ч$	Температура (расчетная): $\theta_{ж4.расч.}$, $^\circ C$	Температура (расчетная): $\theta_{ж3.расч.}$, $^\circ C$	Температура (расчетная): $\theta_{ж2.расч.}$, $^\circ C$	Температура (расчетная): $\theta_{ж1.расч.}$, $^\circ C$	Расход пара: G_{n1} , %	Расход пара: G_{n2} , %	Погрешность, %
1	18	25	19,03	66,2	74	69	1	1	5,72
2	19	27,67	19,88	64,6	74	69	1	1	4,63
3	20	32	21,28	62,5	74	69	1	1	6,40
4	21	34	21,91	61,7	74	69	1	1	4,33
5	22	34	21,91	61,7	74	69	1	1	0,41
6	23	35	22,23	61,4	74	69	1	1	3,35
7	23	42	24,32	59,3	74	69	1	1	5,74

Анализ результата расчета показал, что минимальное отклонение от экспериментальных данных составляет 0,41%, а максимальное - 6,40%, что подтверждает достаточную сходимость результатов моделирования.

ФОМ не позволяет получить зависимость вязкости от температуры смешанной нефти из-за возникающих неопределенностей, которые возникают из-за неопределенного компонентного состава нефти, разности объемов подачи потоков нефти и влияния температуры окружающей среды, но позволяет определить температуру в заданной точке, как базовый регулируемый параметр. На основе вышеизложенного производим моделирование режима объекта исследования в зимний период при совместной работы ФОМ и нечеткого регулятора (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Моделирование процесса теплового воздействия на потоки нефти с помощью ФОМ в зимний период $\theta_{oc} = -13,5^\circ C$

№ п/п	Расход вязкой нефти: $G_{ж3.Э}, м^3 / ч$	Температура расчетная): $\theta_{ж4.расч.}, ^\circ C$	Температура расчетная): $\theta_{ж3.расч.}, ^\circ C$	Температура расчетная): $\theta_{ж2.расч.}, ^\circ C$	Температура расчетная): $\theta_{ж1.расч.}, ^\circ C$	Расход пара: $G_{n1}, \%$	Расход пара: $G_{n2}, \%$
1	25	8,14	82,6	90	90	↑ 32	↑ 24
2	27,67	9,55	80,9	90	90	↑ 32	↑ 24
3	32	10,02	64	74	73	↑ 4	1
4	34	10,00	57,1	74	59	↓ 10	1
5	34	10,00	57,1	74	59	↓ 10	1
6	35	10,01	54,2	74	54	↓ 15	1
7	42	10,00	40,4	74	32	↓ 30	1

Измерения проводились при изменении подачи ВСН и СВН при этом установлен диапазон по технологическим ограничениям: минимальный расход ВСН – $22 м^3 / ч$, а максимальный ВСН – $30 м^3 / ч$.

При этом в экстремальных ситуациях:

1) при изменении температуры окружающей среды $\theta_{oc} = -30^\circ C$, $\theta_{в.тр.} = -4,5^\circ C$: $\theta_{ж4.расч.} = 10,02^\circ C$, $\theta_{ж3.расч.} = 65,8^\circ C$, $\theta_{ж2.расч.} = 74^\circ C$, $\theta_{ж1.расч.} = 82^\circ C$, при подаче пара в ВСН 17%.

2) при изменении температуры окружающей среды $\theta_{oc} = -40^\circ C$, $\theta_{в.тр.} = -6^\circ C$: $\theta_{ж4.расч.} = 10,00^\circ C$, $\theta_{ж3.расч.} = 71,5^\circ C$, $\theta_{ж2.расч.} = 80^\circ C$, $\theta_{ж1.расч.} = 89^\circ C$, при подаче пара в ВСН 30% и в СВН 8%.

3) при изменении температуры окружающей среды $\theta_{oc} = -45^\circ C$, $\theta_{в.тр.} = -6,75^\circ C$: $\theta_{ж4.расч.} = 10,00^\circ C$, $\theta_{ж3.расч.} = 74,4^\circ C$, $\theta_{ж2.расч.} = 89^\circ C$, $\theta_{ж1.расч.} = 90^\circ C$, при подаче пара в ВСН 31% и в СВН 21%.

Основные результаты представлены в виде графиков на рисунках 3.1...3.4.

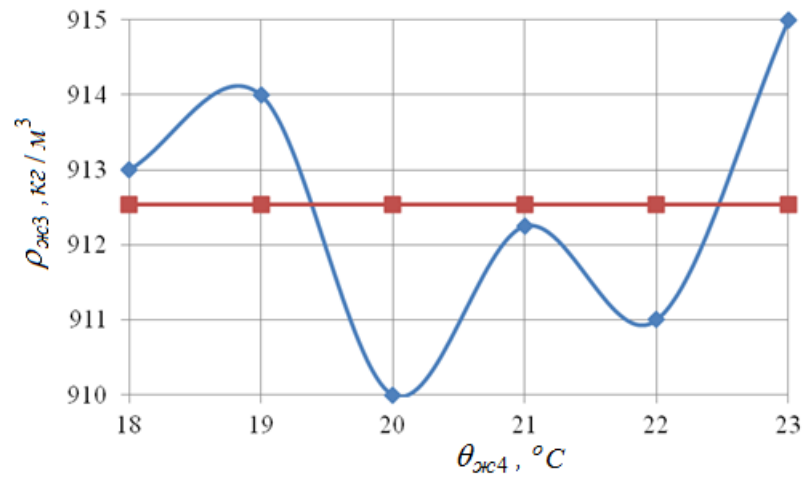


Рисунок 3.1 – График зависимости плотности смешанной нефти от температуры в точке С

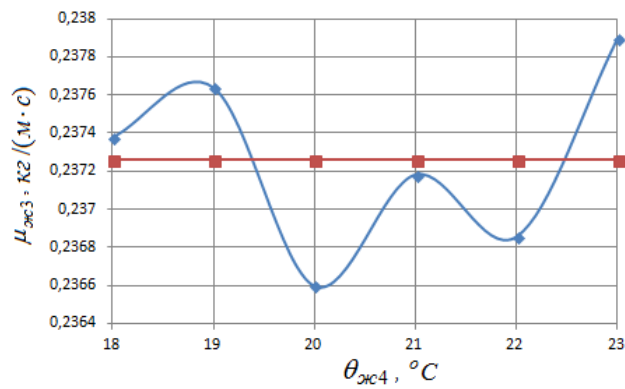


Рисунок 3.2 – График зависимости динамической вязкости смешанной нефти от температуры в точке С

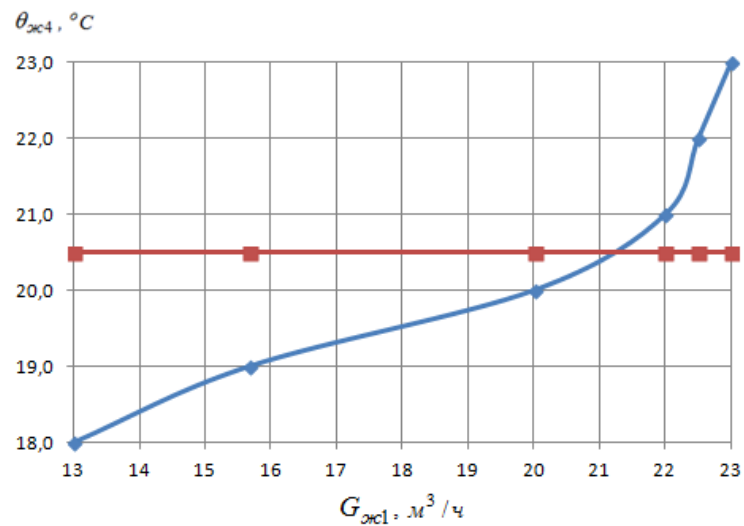


Рисунок 3.3 – График зависимости температуры в точке С от расхода ВСН

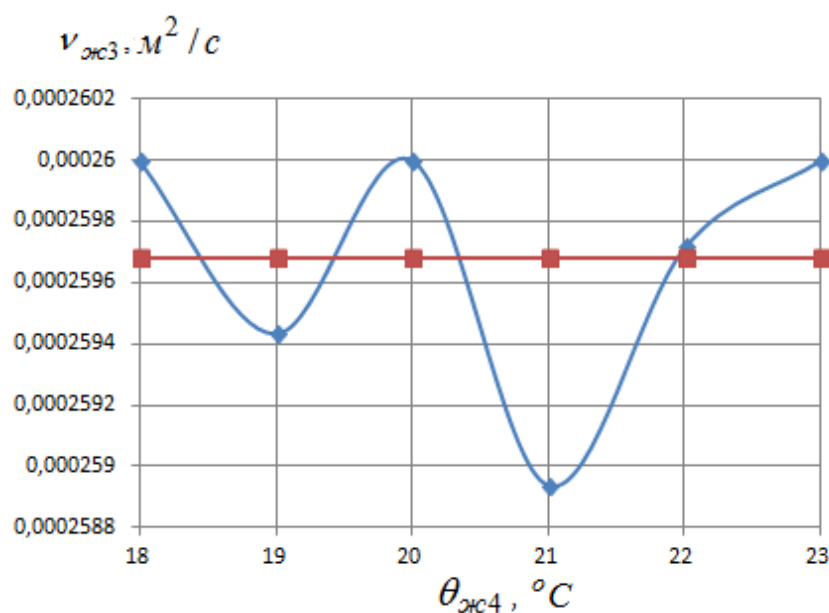


Рисунок 3.4 – График зависимости кинематической вязкости смешанной нефти от температуры в точке С

Критерии качества потока СВН при снижении температуры потока в зависимости от окружающей температуры наглядно иллюстрируются экспериментальными данными на рисунке 3.5. С понижением температуры увеличивается вязкость нефти и гидравлическое сопротивление при её транспортировке по трубопроводу.

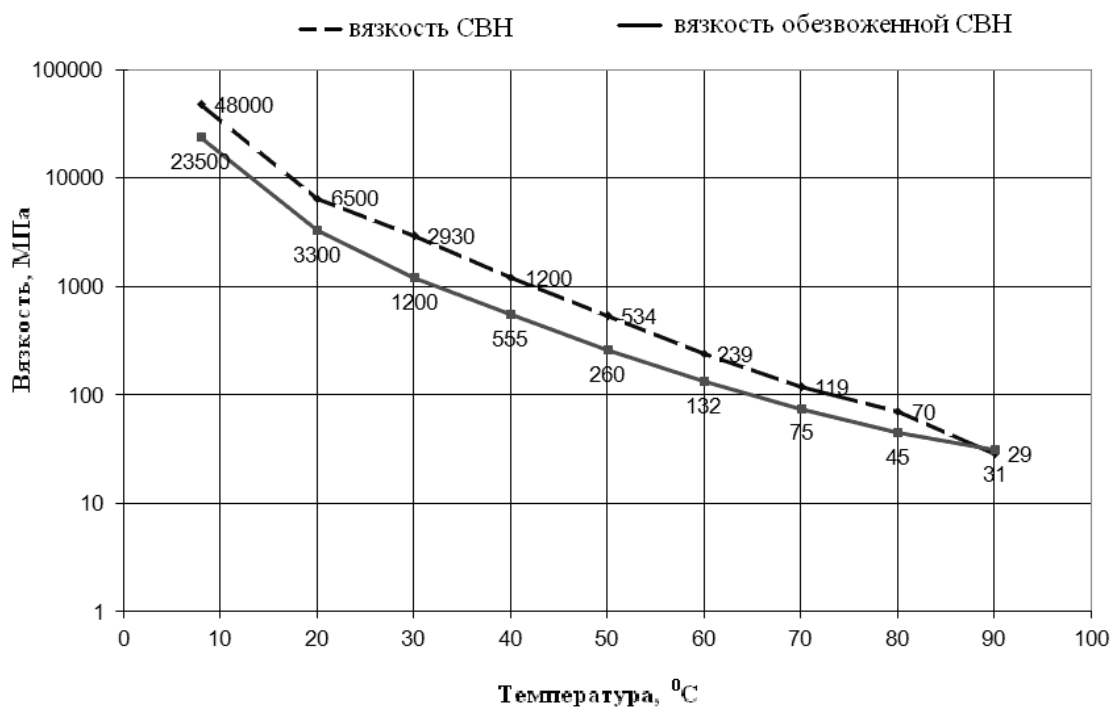


Рисунок 3.5 – Графики зависимости вязкости СВН от температуры (экспериментальные данные)

Зависимость коэффициента динамической или кинематической вязкости от температуры выражается формулой Рейнольдса-Филонова [76]:

$$\mu_{t,4} = \mu_0 \cdot e^{-k_t \cdot (\theta_{ж4} - \theta_0)} \text{ или } \nu_{t,4} = \nu_0 \cdot e^{-k_t \cdot (\theta_{ж4} - \theta_0)}, \quad (3.1)$$

где $\mu_{t,4}$, $\nu_{t,4}$ – коэффициенты динамической и кинематической вязкости при заданной температуре; μ_0 , ν_0 – коэффициенты динамической и кинематической вязкости при известной температуре; $\theta_{ж4}$ – заданная температура в точке С; θ_0 – температура, при которой измерено значение μ_0 и ν_0 (20 °С для вязкой нефти);

$k_t = \frac{\ln(\nu_0/\nu_1)}{(\theta_1 - \theta_0)}$ – опытный коэффициент для вязкой нефти равный 0,02-0,03; ν_1 –

кинематическая вязкость, измеренная при одной температуре θ_1 ; e – основание натурального логарифма равное 2,718282.

Основные результаты представлены в виде графиков зависимости динамической вязкости от температуры в точке С, зависимости динамической вязкости от температуры смешанной нефти и зависимости динамической вязкости от температуры СВН (рис.3.6...3.8), где выделенные области – диапазоны изменения температуры с целью поддержания заданного значения вязкости потока нефти.

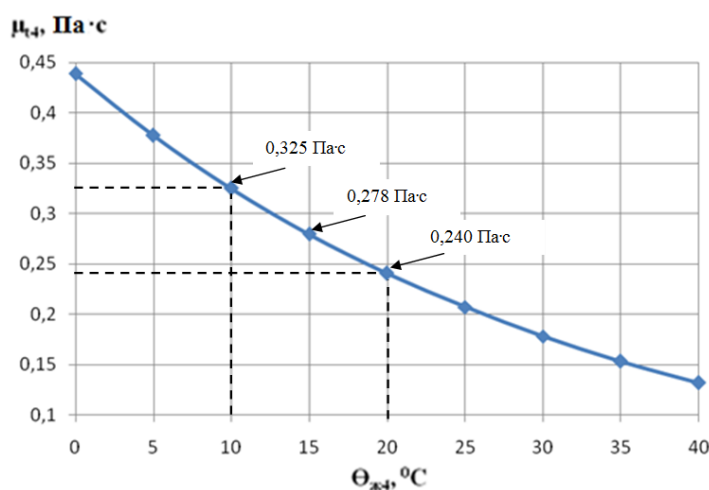


Рисунок 3.6 – График зависимости динамической вязкости от температуры в точке С

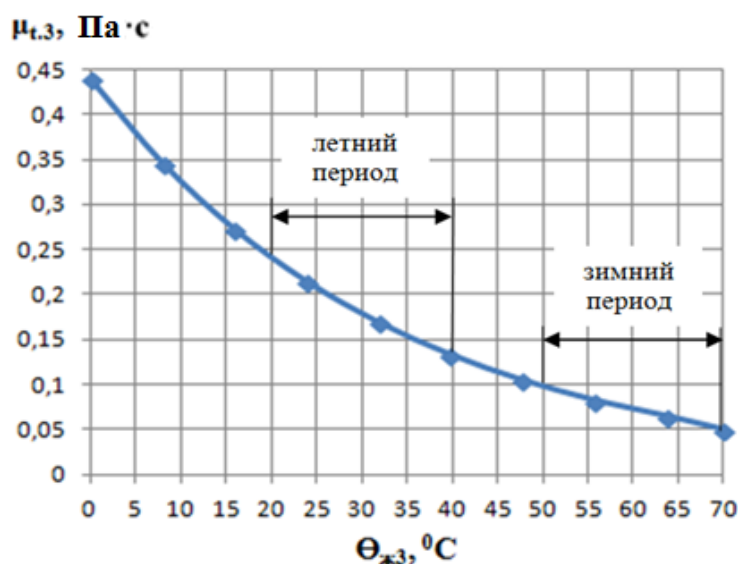


Рисунок 3.7– График зависимости динамической вязкости от температуры смешанной нефти

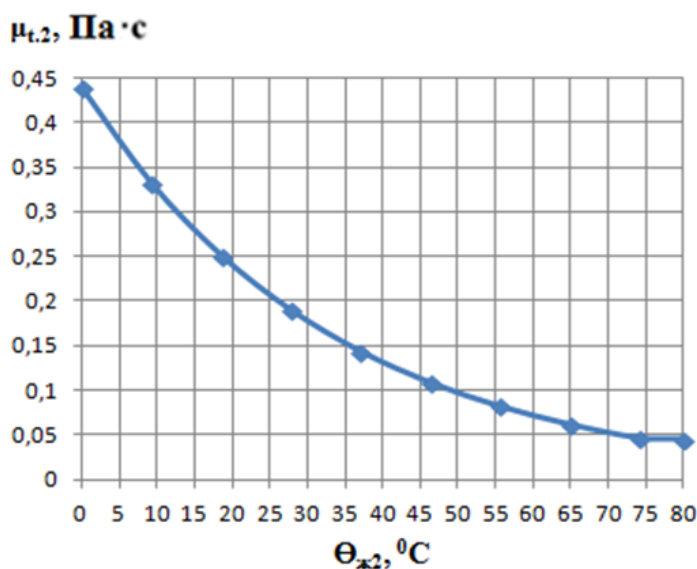


Рисунок 3.8 – График зависимости динамической вязкости от температуры СВН

3.1 Анализ результатов верификации в производственных условиях компонентов функционально-ориентированной модели как базового блока идентификатора

Для проведения верификации и анализа её результатов необходимо получить экспериментальные данные по температуре потоков нефти в точках A_1 , A_2 и B структурно-функциональной схемы фрагмента установки предварительной подготовки ВСН и СВН (рис. 1.9 глава 1). Измерение температуры осуществляется непрерывно с помощью датчиков температуры TE_1 , TE_2 , TE_3 ,

класс точности 0,015.

На основе полученных данных приводятся результаты верификации ФОМ в производственных условиях относительно определяющих компонентов $\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}$ как базового блока идентификатора.

Определены невязки $\varepsilon_{\theta_{ж1}} = \theta_{ж1} - \theta_{ж1}^*$, $\varepsilon_{\theta_{ж2}} = \theta_{ж2} - \theta_{ж2}^*$, $\varepsilon_{\theta_{ж3}} = \theta_{ж3} - \theta_{ж3}^*$ между измеренной $\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}$ и расчетной $\theta_{ж1}^*, \theta_{ж2}^*, \theta_{ж3}^*$ температурами потоков ВСН, СВН и смешанной нефти.

Для использования статического критерия Стьюдента о допустимости гипотезы применения методик идентификации модели $\theta_{ж1}, \theta_{ж2}, \theta_{ж3}$ использованы минимальные $(\sigma_{\theta_{ж1}})_{\min} = \sigma((\varepsilon_{\theta_{ж1}})_{\min})$, $(\sigma_{\theta_{ж2}})_{\min} = \sigma((\varepsilon_{\theta_{ж2}})_{\min})$, $(\sigma_{\theta_{ж3}})_{\min} = \sigma((\varepsilon_{\theta_{ж3}})_{\min})$ и максимальные $(\sigma_{\theta_{ж1}})_{\max} = \sigma((\varepsilon_{\theta_{ж1}})_{\max})$ отклонения расчетных от измеренных температур потоков ВСН, СВН и смешанной нефти, вычисленные по формулам [84]:

$$\begin{aligned}\sigma(\varepsilon_{\theta_{ж1}}) &= \frac{\varepsilon_{\theta_{ж1}}}{\sqrt{D(\varepsilon_{\theta_{ж1}})} \sqrt{\frac{\nu-1}{\nu}}}, \\ \sigma(\varepsilon_{\theta_{ж2}}) &= \frac{\varepsilon_{\theta_{ж2}}}{\sqrt{D(\varepsilon_{\theta_{ж2}})} \sqrt{\frac{\nu-1}{\nu}}}, \\ \sigma(\varepsilon_{\theta_{ж3}}) &= \frac{\varepsilon_{\theta_{ж3}}}{\sqrt{D(\varepsilon_{\theta_{ж3}})} \sqrt{\frac{\nu-1}{\nu}}},\end{aligned}\tag{3.1}$$

где $D(\varepsilon_{\theta_{ж1}}), D(\varepsilon_{\theta_{ж2}}), D(\varepsilon_{\theta_{ж3}})$ – дисперсия отклонений температур потоков ВСН, СВН и смешанной нефти, ν – число опытов,

$$\begin{aligned}(\varepsilon_{\theta_{ж1}})_{\min(\max)} &= \left| \theta_{ж1} - \theta_{ж1}^* \right|_{\min(\max)}, \\ (\varepsilon_{\theta_{ж2}})_{\min(\max)} &= \left| \theta_{ж2} - \theta_{ж2}^* \right|_{\min(\max)}, \\ (\varepsilon_{\theta_{ж3}})_{\min(\max)} &= \left| \theta_{ж3} - \theta_{ж3}^* \right|_{\min(\max)}.\end{aligned}$$

По полученным выражениям, был произведён анализ результатов верификации температур потоков ВСН, СВН и смешанной нефти. Для чего были получены суточные графики зависимостей температур этих потоков по сезонам года. Для сравнительного анализа рассматривались наиболее характерные периоды: летние и зимние года.

3.1.1 Анализ результатов верификации температуры высокосернистой нефти

На рисунке 3.9 представлен суточный график зависимости температуры ВСН в функции времени в контрольной точке А1 в летний период. Средняя температура $35,92^{\circ}\text{C}$, заданная температура 35°C . Относительная погрешность по температуре составила 2,64 %, относительная погрешность по максимальной амплитуде температуры составила 11,43 %, относительная погрешность по минимальной амплитуде температуры составила 8,57 %.

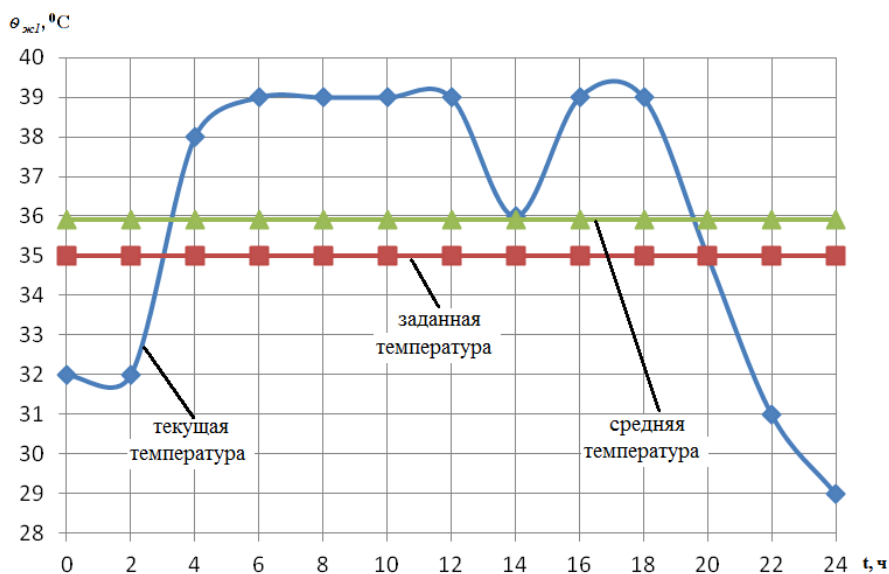


Рисунок 3.9 – Суточный график зависимости температуры ВСН в функции времени в летний период

На рисунке 3.10 представлен суточный график зависимости температуры ВСН в функции времени в зимний период. Средняя температура $32,54^{\circ}\text{C}$, заданная температура 31°C . Относительная погрешность по температуре составила 4,96 %, относительная погрешность по максимальной амплитуде температуры составила 22,58 %, относительная погрешность по минимальной амплитуде температуры составила 6,45 %.

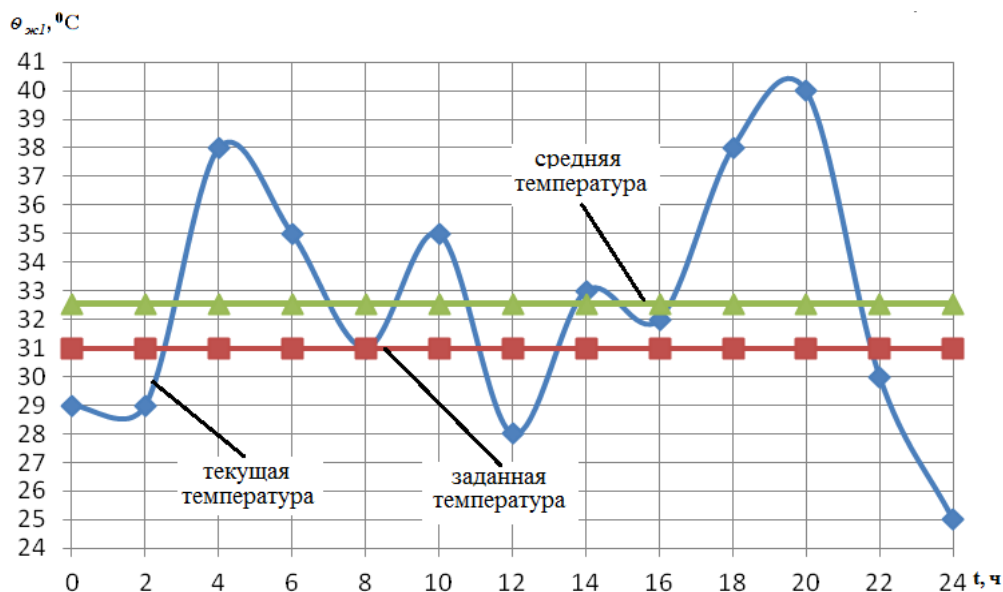


Рисунок 3.10 – Суточный график зависимости температуры ВСН в функции времени в зимний период

На рисунке 3.11 приведена выборка из 12 опытов. Статические критерии о допустимости гипотезы из таблицы t-распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (5%). Для выборки $t = 1,55$, $|(R_{\theta_{ж3}})_{\max}| = 6,2$, $|(R_{\theta_{ж3}})_{\min}| = 0,28$.

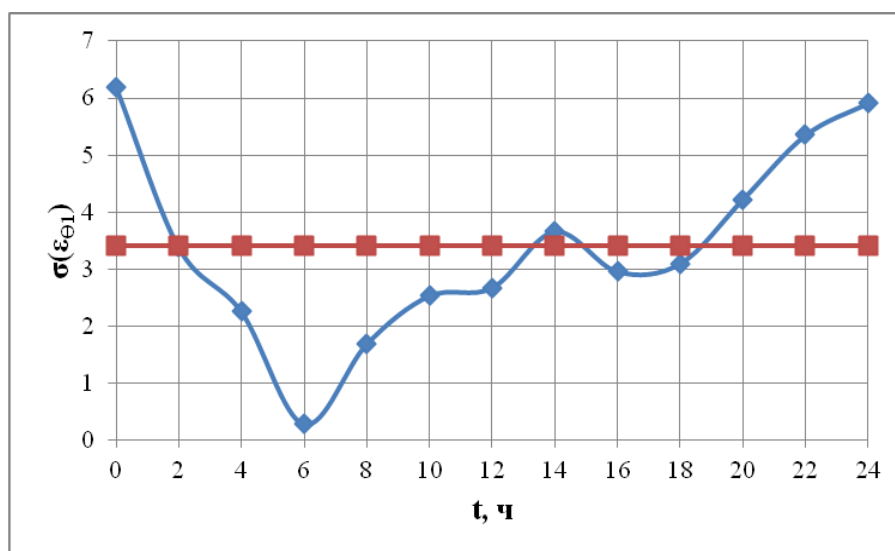


Рисунок 3.11 – График зависимости отклонения измеренной температуры ВСН от расчетных данных в функции времени (выборка из 12 опытов)

3.1.2 Анализ результатов верификации температуры сверхвязкой нефти

На рисунке 3.12 представлен суточный график зависимости температуры СВН в функции времени в летний период. Средняя температура $62,88^{\circ}\text{C}$, заданная температура 60°C . Относительная погрешность по температуре

составила 4,81 %, относительная погрешность по максимальной амплитуде температуры составила 6,67 % относительная погрешность по минимальной амплитуде температуры составила 1,67 %.

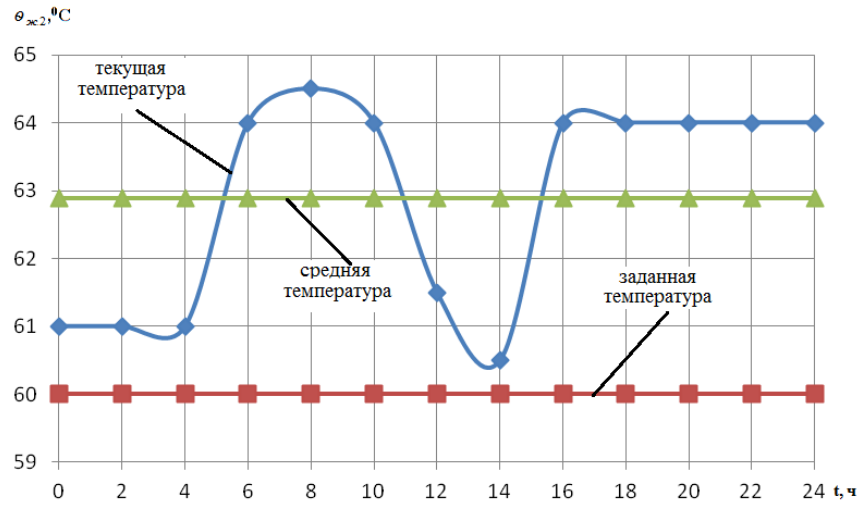


Рисунок 3.12 – Суточный график изменения температуры СВН за сутки в летний период

На рисунке 3.13 представлен суточный график зависимости температуры СВН в функции времени в зимний период: средняя температура 79,38 °C; заданная температура 76 °C; относительная погрешность по температуре составила 4,45 %; относительная погрешность по максимальной амплитуде температуры составила 2,63 %; относительная погрешность по минимальной амплитуде температуры составила 5,26 %.

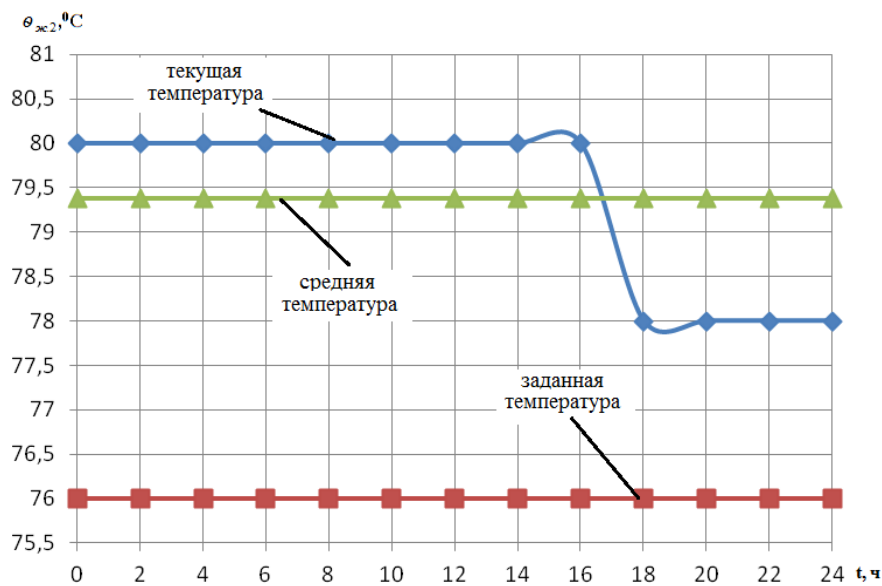


Рисунок 3.13 – Суточный график изменения температуры СВН за сутки в зимний период

На рисунке 3.14 приведена выборка из 12 опытов. Статические критерии о

допустимости гипотезы из таблицы t-распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (5%). Для выборки $t = 1,55$, $\left| (R_{\theta_{ж3}})_{\max} \right| = 76,09$, $\left| (R_{\theta_{ж3}})_{\min} \right| = 30$.

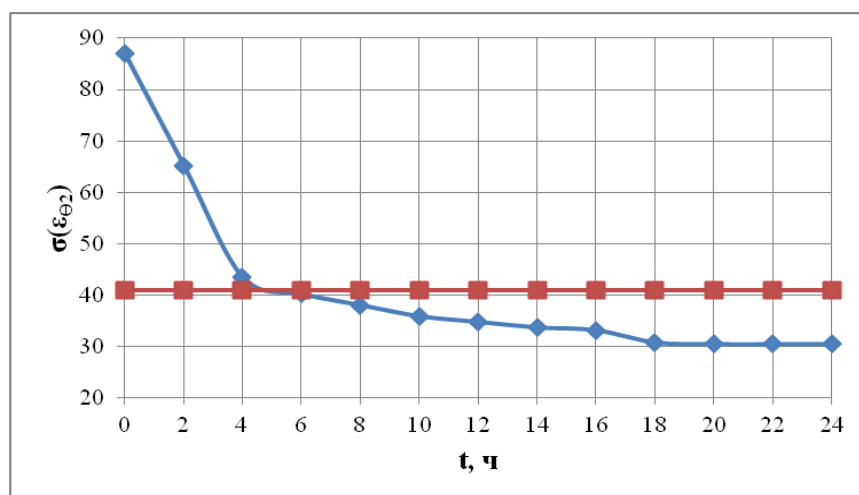


Рисунок 3.14 – График зависимости отклонения измеренной температуры ВСН от расчетных данных в функции времени (выборка из 12 опытов)

3.1.3 Анализ результатов верификации температуры смешанной нефти

На рисунке 3.15 приведен суточный график зависимости температуры смешанной нефти в функции времени.

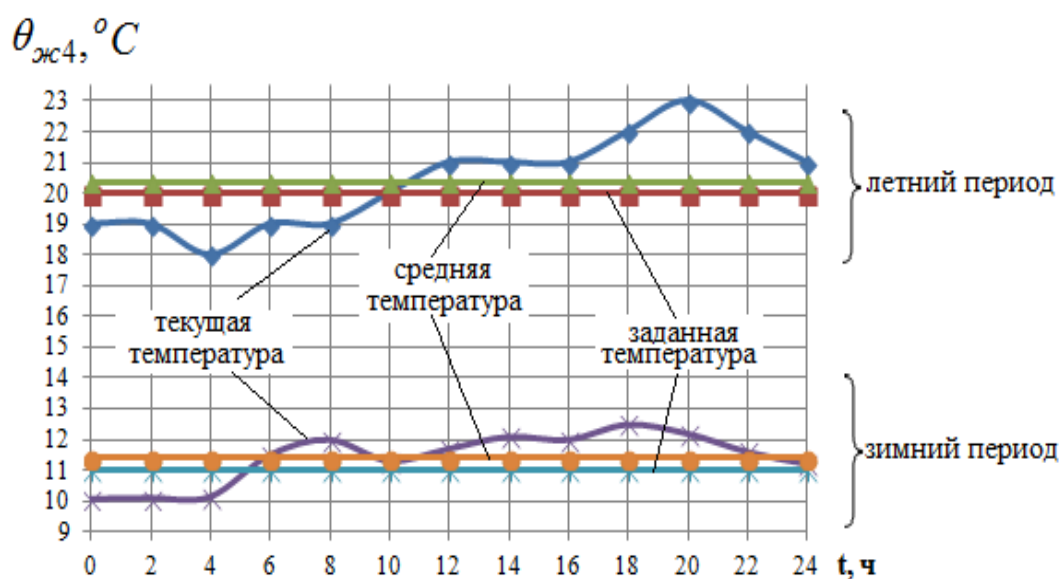


Рисунок 3.15 – Суточный график зависимости температуры смешанной нефти в функции времени

Экспериментальное исследование модели $\theta_{ж3}$ разбито на 2 выборки по

12 ÷ 360 опытов. На рисунке 3.16 приведена выборка №2 из 12 опытов.

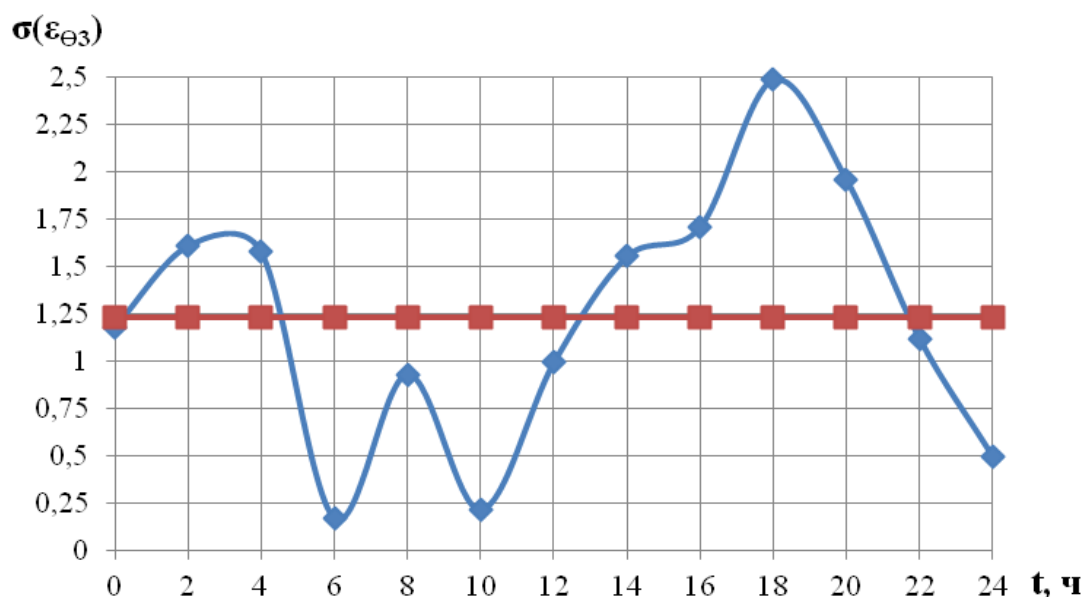


Рисунок 3.16 – График зависимости отклонения измеренной температуры от расчетных данных в функции времени (выборка №2 из 12 опытов)

Статические критерии о допустимости гипотезы из таблицы t-распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (5%). Для выборки №2 $t = 1,55$, $|(R_{\theta_{ж3}})_{\max}| = 2,5$, $|(R_{\theta_{ж3}})_{\min}| = 1,58$. Гипотезу о правомерности математической модели температуры потоков нефти $\theta_{ж1}$, $\theta_{ж2}$, $\theta_{ж3}$ можно считать справедливой.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

Проведена верификация в производственных условиях методик идентификации и компонентов ФОМ как базового блока идентификатора и приведены результаты, на основе которых доказана гипотеза о правомерности разработанной математической модели процесса тепловой обработки потока нефти с целью поддержания заданной температуры транспортируемой нефти в характерных точках на экспериментальной опытно-промышленной основе.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ ИДЕНТИФИКАТОРА СОСТОЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С СИНТЕЗОМ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ И МЕТОДИКА ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В данной главе сформулирована и решена задача применения ФОМ в качестве идентификатора состояния при управлении температурой потока смешанной нефти. В качестве критерия оптимизации в задаче управления вводится квадратичный функционал, подынтегральная функция которого зависит от двух векторных аргументов: вектора состояния $\bar{z}(t)$; и вектора управления $U(t) = U(z(t))$ (обратная связь), представляемых в общем виде выражением [21]:

$$J_m = \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + U(t)^T \cdot R \cdot U(t)) dt = \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + U(z(t))^T \cdot R \cdot U(z(t))) dt, \quad (4.1)$$

где Q, R – весовые матрицы.

Решение соответствующей оптимальной задачи для объекта (2.43...2.53) в пространстве состояний:

$$\dot{z}(t) = A \cdot z(t) + B \cdot U(t), \quad y(t) = C \cdot z(t), \quad (4.2)$$

в условиях ограничений $U(t) \subset \Omega$ приводит (4.1) к виду

$$J_m = \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + (-P \cdot z(t))^T \cdot R \cdot (-P \cdot z(t))) dt, \quad (4.3)$$

где $U(z(t)) = -P \cdot z(t)$ – оптимальная обратная связь; $P = -Q^{-1} \cdot B^T \cdot K^T$, K – положительно определенная симметричная матрица, являющаяся решением уравнения Рикатти:

$$K \cdot A + A^T \cdot K - K \cdot B \cdot B^{-1} \cdot B^T = -Q, \quad (4.4)$$

A, B – матрицы параметров объекта и управления соответственно, получаемые из уравнений объекта (2.43...2.53) или соответствующей ему передаточной функции вида:

$$W(s) = \frac{L[y(t)]}{L[U(t)]} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (4.5)$$

где $y(t)$ – выходной сигнал; $U(t)$ – входной сигнал; L – оператор преобразования

Лапласа; $b_m, \dots, b_0$; $a_n, \dots, a_0$ – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции матриц A , B , C :

$$A = \begin{bmatrix} k_{12,ж} & k_{1,ж} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{cm1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{22,ж} & k_{21,ж} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{cm2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{c_{11}}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{21}}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & -\frac{c_{11}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{21}}{J_2} & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \end{bmatrix}.$$

Программа для определения коэффициентов в матрицах параметров объекта A и управления B соответственно, получаемые из уравнений объекта (2.43...2.53) в пространстве состояний представлена в Приложение 3.

В практике достаточно распространенной является ситуация, когда не все компоненты вектора состояний доступны для измерения. В этом случае, чтобы в системе управления возможно было использовать обратную связь по состоянию, необходимо восстановить вектор состояния системы, недоступный для измерения.

4.1 Восстановление вектора состояния по его оценке наблюдателем (идентификатором)

В реальных производственных условиях технически не представляется возможным измерить все переменные состояния. Вектор состояния потока смешанной нефти состоит из компонентов недоступных для измерения и восстановление этого вектора осуществляется по его оценке наблюдателем (идентификатором) недоступных компонентов. Недоступными компонентами являются: θ_{cm1} , θ_{cm2} – температуры стенок змеевиков в емкостях ВСН и СВН; ω_{z1} , ω_{z2} – скорости вращения электроприводов задвижек; φ_1 , φ_2 – углы поворота заслонок в задвижках. Восстановление вектора состояния позволяет отделить полезный сигнал от помех наблюдателем (идентификатором).

Достаточным представляется синтез системы управления, который позволяет восстановить недостающие координаты методами оценки переменных с помощью

наблюдателя состояния полного порядка [67, 109]. Эта модель может быть представлена следующим уравнением, используя формулу системы (4.2):

$$\dot{\hat{z}}(t) = (A - G \cdot C) \cdot \hat{z}(t) + B \cdot U(t) + G \cdot y(t), \quad (4.6)$$

где G – матрица наблюдателя системы, которая определяется исходя из условия, что быстродействие наблюдателя в 2...4 раза выше, чем системы.

В большинстве случаев нелогично оценивать те переменные, которые можно измерить. Поэтому целесообразно синтезировать наблюдатель, дающий оценку только тех переменных состояния, которые не могут быть измерены – это наблюдатель пониженного порядка [42].

Для реализации такого наблюдателя необходимо разделить вектор состояния на составляющие:

$$z(t) = [z_1(t), \hat{z}(t)]^T, \quad (4.7)$$

где $z_1(t) = [\theta_{\text{жс}1}(t), \theta_{\text{жс}2}(t), I_1(t), I_2(t)]$ – вектор переменных состояния, которые можно измерить; $\hat{z}(t) = [\theta_{\text{см}1}(t), \theta_{\text{см}2}(t), \omega_{z1}(t), \omega_{z2}(t), \varphi_1(t), \varphi_2(t)]$ – вектор переменных состояния, подлежащих оценке.

Потом разделяется уравнение состояния (4.4) и записывается в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{\hat{z}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \hat{A}_1 \\ \hat{A}_2 & \hat{A}_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ \hat{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ \hat{B} \end{bmatrix} U(t). \quad (4.8)$$

Уравнение (4.8) приводится к виду (4.6) и их сравнивают. Эти уравнения эквивалентны, если перепишем с обозначениями:

$$\begin{aligned} z(t) &= \hat{z}(t); \quad A = \hat{A}_3; \quad B \cdot U(t) = \hat{A}_2 \cdot z_1(t) + \hat{B} \cdot U(t); \\ y(t) &= \dot{z}_1(t) - a_{11} \cdot z_1(t) - b_1 \cdot U(t); \quad C = \hat{A}_1. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Далее (4.9) подставляется в (4.6) и получается уравнение пониженного порядка

$$\dot{\hat{z}}(t) = (\hat{A}_3 - \hat{G} \cdot \hat{A}_1) \cdot \hat{z}(t) + \hat{A}_2 \cdot y(t) + \hat{B} \cdot U(t) + \hat{G}[\dot{y}(t) - a_{11} \cdot y(t) - b_1 \cdot U(t)], \quad (4.10)$$

где $\hat{G}$ – матрица коэффициентов синтезированного наблюдателя.

Результаты моделирования, которые синтезированы по рассмотренному выше методу, показаны на рисунке 4.1. и в приложение В.

Оптимальная система автоматического управления (САУ) с наблюдателем состояния отвечает требованиям, которые задаются функционалом вида (4.1). САУ обеспечивает сопротивляемость системы управления по отношению к возмущающему воздействию и способность воспроизводить постоянные входные воздействия.

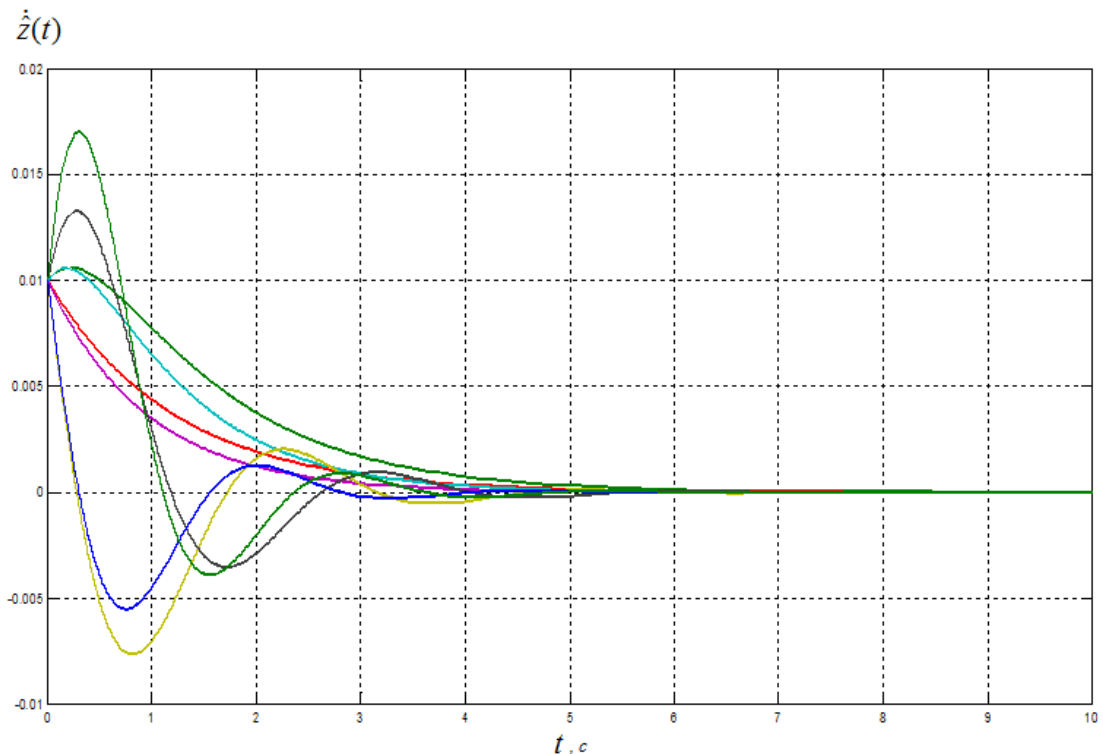


Рисунок 4.1 – Графики зависимости вектора состояния в функции времени, восстановленные наблюдателем

Полученные векторы состояния с помощью наблюдателей будут использованы для разработки алгоритма и структурной схемы адаптивной САУ регулирования температуры потока с идентификатором состояния.

4.2 Разработка алгоритма управления и методики идентификации функционально-ориентированной модели температуры потока смешанной нефти

Алгоритм управления температурой потока транспортируемой вязкой нефти (рис. 4.2) позволяет принять решение на повышение температуры в точке *C* или *TE5* (рис. 2.2).

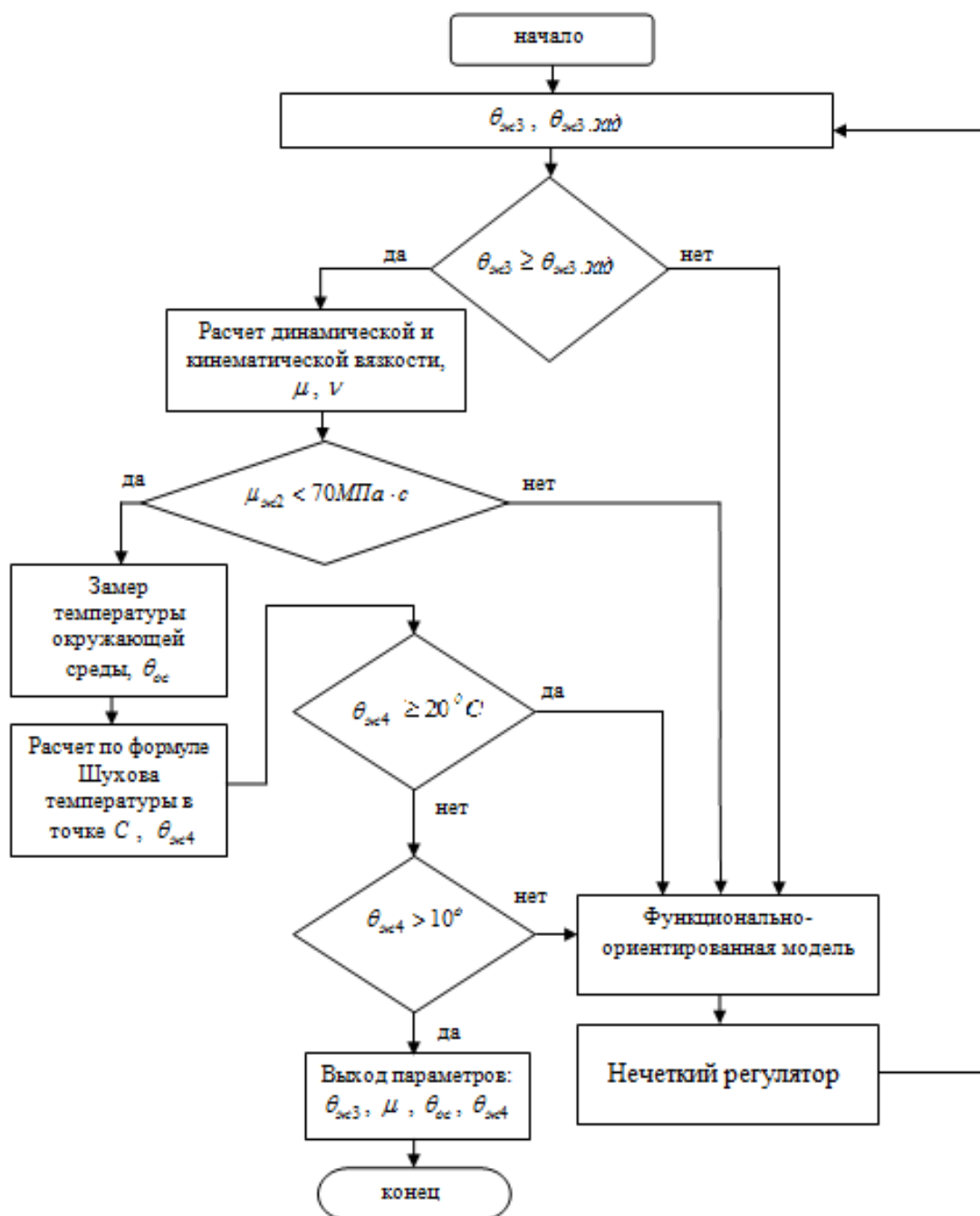


Рисунок 4.2 – Алгоритм управления температурой потока смешанной нефти

В качестве базовых значений принимается условие когда $\theta_{oc} = -13,5^\circ \text{C}$, а $\theta_{ж3} \geq 70^\circ \text{C}$, тогда в заданной точке С обеспечивается температура $\theta_{ж4} \geq 10^\circ \text{C}$, а если $\theta_{ж4} < 10^\circ \text{C}$ то сигнал поступает на идентификатор состояния, содержащий ФОМ (2.43)...(2.53).

Согласно ГОСТ Р 51858-2002 динамическая вязкость должна находиться в пределах $1600 \div 5000 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ при 20°C , $200 \div 500 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ при 40°C и $70 \div 150 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ при 70°C . Поэтому в температура смешанной нефти в т.С должна поддерживаться в границах от 10 до 20°C . При этом в летнее время этой температуре соответствует $20 \div 40^\circ\text{C}$ в точке В, а в зимнее время - $50 \div 70^\circ\text{C}$. Интервалы выбираются в зависимости от температуры окружающей среды.

Методика идентификации математической модели температурного режима потока смешанной нефти, по прямым измерениям температур, которая учитывает влияния температуры окружающей среды и объемное соотношение ВСН и СВН на суммарный поток нефти следующая:

1. Вводятся следующие параметры: $\theta_{ж3}$, $\theta_{ж4}$ – температура смешанной нефти и в т.С на входе в УПН, $\mu_{ж3}$ – динамическая вязкость смешанной нефти, θ_{oc} – температура окружающей среды, (рис. 2.2).

2. Определяются следующие векторы: $\bar{z}(t)$ – состояния потока, $\bar{x}(t)$ – качества потока, $\bar{y}(t)$ – непрерывного наблюдения.

3. Рассчитывается квадратичный функционал: $J_m \rightarrow \min$ по формуле (4.1).

4. Затем происходит восстановление недостающих координат методами оценки переменных с помощью наблюдателя состояния $\dot{\hat{z}}(t)$ (4.6).

5. Определяется следующее условие: $\frac{\theta_{ж3} - \theta_{ж3.зад}}{\theta_{ж3.зад}} \leq 0,05$.

6. При невыполнение условия пункта 5, происходит уточнение параметров $\theta_{ж3}$, μ , θ_{oc} , $\theta_{ж4}$.

7. Если условие выполняется, то сигнал поступает на НР, где в качестве управляющего воздействия на объект управления в нечетком алгоритме рассматривается скорость перемещения задвижки $\mathcal{A}(t)$ и применяется метод автоматической модификации продукционных правил.

8. Производится расчет параметров электропривода задвижки: I_1 – токи в цепи якоря электроприводов задвижек для подачи пара в змеевики; ω_{z1} – скорости вращения электроприводов задвижек; φ_1 – углы поворота заслонок в задвижках;

9. Происходит уточнение параметров: G_{n1} – расход пара в змеевике, θ_{n1} – температуры пара в змеевике в емкости ВСН, θ_{cm1} – температура стенки змеевика в емкости ВСН, $\theta_{жс1}$ – температура ВСН.

10. Уточнение векторов: $\bar{z}(t)$, $\bar{x}(t)$, $\bar{y}(t)$.

На основании предложенной методики идентификации математической модели процесса температурной обработки потока смешанной нефти, разработан алгоритм работы ФОМ, представленный на рисунке 4.3.

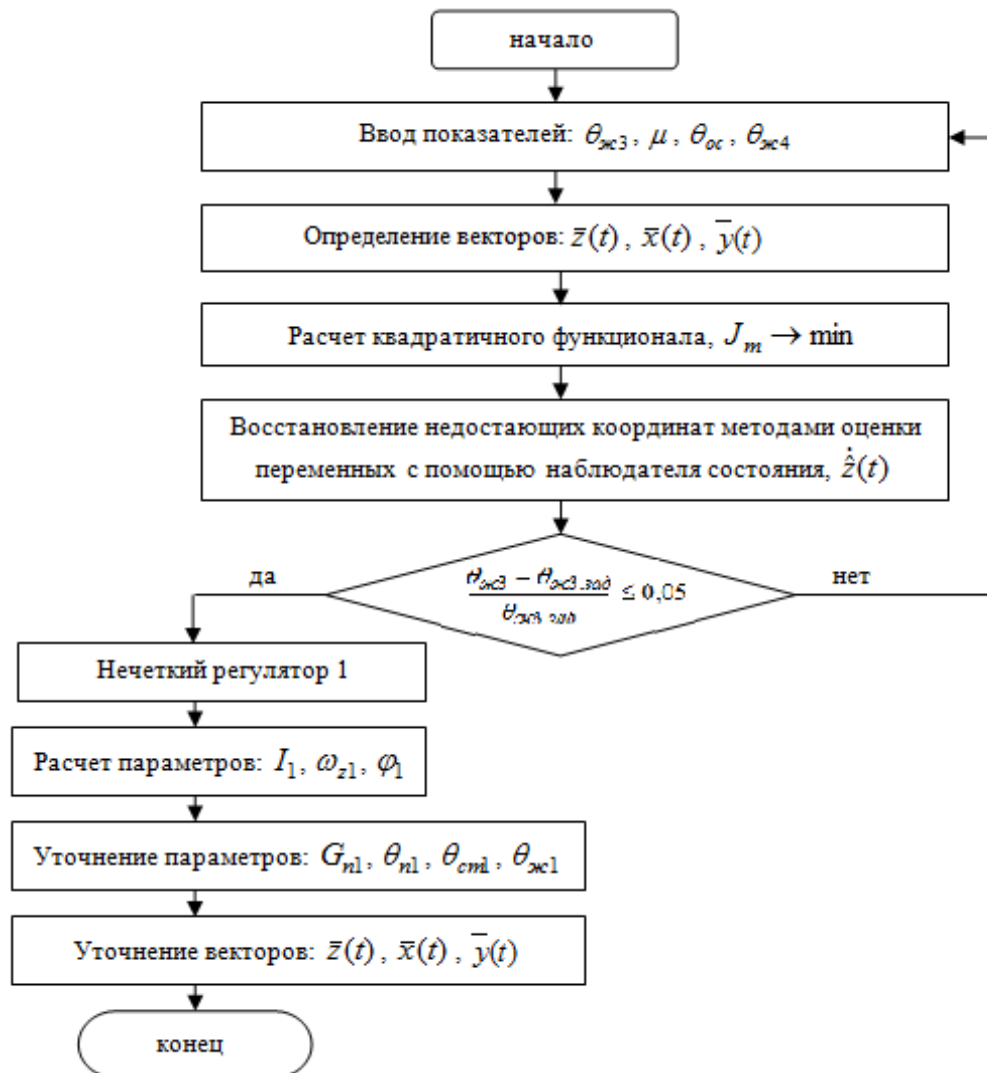


Рисунок 4.3 – Алгоритм идентификации функционально-ориентированной модели температуры потока смешанной нефти

Методика и алгоритмы идентификации параметров математической модели для потока СВН во внутреннем контуре системы управления (рис. 2.2) и модели для потока ВСН во внешнем контуре идентичны. Внешний контур управления является основным управляющим объектом, который управляет температурным режимом ВСН, существенно влияющим на температурный режим смешанной нефти.

4.3 Синтез нечетких алгоритмов управления на основе метода векторных функций Ляпунова

В параграфе рассматривается блок синтеза алгоритма управления для систем с нечеткой логикой в структуре ФОМ (рис. 4.1). Для разработки блок-схемы синтеза алгоритма управления для системы с нечетким регулятором автором используется метод синтеза линейных систем управления с запаздыванием совместно с моделью Такаги-Сугено [7, 39] с формированием нечеткого логического регулятора.

Отличительной особенностью данного подхода от известных работ [5, 6] является то, что кроме точности управления определяется устойчивость системы, которая строится с использованием метода векторных функций Ляпунова (ВФЛ).

Синтез алгоритма управления для системы с нечетким регулятором для линейной системы может быть представлена в структурно-матричном виде:

$$\dot{z} = A \cdot z + A_1 \cdot z_t + B \cdot U_1, \quad (4.11)$$

где $z_t = z(t - \tau)$ – температура потока, с учетом запаздывания; A , A_1 – $n \times n$ -, B – $n \times m$ – постоянные матрицы (для управления во внешнем контуре); i -я компонента ВФЛ определяется выражением $v_i = z^T P_i z$. Запишем ВФЛ $v = \{v_1, v_2, \dots, v_{m_c}\}^T$.

Согласно идеям метода ВФЛ строятся системы сравнения [75]. Здесь используются линейные системы сравнения (СС) [39] вида: $\dot{y} = A_c y_c$, (4.12)

где A_c – постоянная матрица с известными свойствами [39].

Тогда с учетом линейной СС можно записать дифференциальное

неравенство:

$$z^T G_i z + 2z^T P_i A_1 z_t + 2z^T P_i B u \leq a_{i1}^c z^T P_1 z + a_{i2}^c z^T P_2 z + \dots + a_{im_c}^c z^T P_{m_c} z,$$

где $\dot{v}_i = \dot{z}^T P_i z + z^T P_i z_t = z^T G_i z + 2z^T P_i A_1 z_t + 2z^T P_i B u$, $G_i = A^T P_i + P_i A$,
 $i = 1, 2, \dots, m_c$.

Определяются множества по всем компонентам ВФЛ:

$$B_i^0 = \{x \in X : B_i(x) = 0\}, \quad B_i^+ = \{x \in X : B_i(x) > 0\}, \quad B_i^- = \{x \in X : B_i(x) < 0\},$$

$i = 1, \dots, m_c$.

Из дифференциального неравенства [39] $F(x) + B(x)u \leq A_c v$ следует:

$$F_i(x) + B_i(x)u \leq a_{i1}^c x^T P_1 x + a_{i2}^c x^T P_2 x + \dots + a_{im_c}^c x^T P_{m_c} x \text{ или}$$

$$F_i(x) + B_i(x)u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{ij}^c x^T P_j x, \text{ где } F_i(x) = \frac{\partial v_i}{\partial x} f(x), \quad B_i(x) = \frac{\partial v_i}{\partial x} b(x).$$

Отсюда определяется система неравенств:

$$\begin{aligned} z^T G_1 z + 2z^T P_1 A_1 z_t + 2z^T P_1 B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c z^T P_j z, \\ z^T G_2 z + 2z^T P_2 A_1 z_t + 2z^T P_2 B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c z^T P_j z, \dots, \\ z^T G_{m_c} z + 2z^T P_{m_c} A_1 z_t + 2z^T P_{m_c} B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c z^T P_j z. \end{aligned}$$

$$\text{Преобразуем: } B_1(x)u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c x^T P_j x - F_1(x), \quad B_2(x)u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c x^T P_j x - F_2(x), \dots,$$

$$B_{m_c}(x)u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_{m_c}(x).$$

Перепишем неравенства в следующем виде:

$$\begin{aligned} 2z^T P_1 B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c z^T P_j z - z^T G_1 z - 2z^T P_1 A_1 z_t, \\ 2z^T P_2 B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c z^T P_j z - z^T G_2 z - 2z^T P_2 A_1 z_t, \dots, \\ 2z^T P_{m_c} B u &\leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c z^T P_j z - z^T G_{m_c} z - 2z^T P_{m_c} A_1 z_t. \end{aligned}$$

И используя лемму [7] $(2z^T Q y \leq k z^T Q S^{-1} Q^T z + \frac{1}{k} y^T S y)$, где Q любая $n \times n$

матрица, $k > 0$, $S > 0$, $z \in R^n$, $y \in R^n$), преобразуем неравенства:

$$2z^T P_1 B u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_1 z - k_1 z^T P_1 A_1 S^{-1} A_1^T P_1 z - \frac{1}{k_1} z_t^T S_1 z_t,$$

$$2z^T P_2 B u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_2 z - k_2 z^T P_2 A_1 S_2^{-1} A_1^T P_2 z - \frac{1}{k_2} z_t^T S_2 z_t, \dots,$$

$$2z^T P_{m_c} B u \leq \sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_{m_c} z - k_{m_c} z^T P_{m_c} A_1 S_{m_c}^{-1} A_1^T P_{m_c} z - \frac{1}{k_{m_c}} z_t^T S_{m_c} z_t$$

$S_i > 0$ симметричная матрица, $k_i > 0$ постоянная.

Дифференциальное неравенство запишем в следующем виде: $Su \leq R$,

$$\text{где } S = \|s_{ij}\|_{i,j=1,m_c}, \quad i=1,m; \quad j=1,m, \quad \|s_{11} \ s_{12} \ \dots \ s_{1m_c}\| = \|2z^T P_1 B\|,$$

$$\|s_{21} \ s_{22} \ \dots \ s_{2m_c}\| = \|2z^T P_2 B\|, \quad \dots, \quad \|s_{m_c 1} \ s_{m_c 2} \ \dots \ s_{m_c m_c}\| = \|2z^T P_{m_c} B\|,$$

$$R = \|r_1 \ r_2 \ \dots \ r_{m_c}\|^T,$$

$$r_1 = \sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_1 z - k_1 z^T P_1 A_1 S^{-1} A_1^T P_1 z - \frac{1}{k_1} z_t^T S_1 z_t,$$

$$r_2 = \sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_2 z - k_2 z^T P_2 A_1 S_2^{-1} A_1^T P_2 z - \frac{1}{k_2} z_t^T S_2 z_t, \dots,$$

$$r_{m_c} = \sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c z^T P_{jc} z - z^T G_{m_c} z - k_{m_c} z^T P_{m_c} A_1 S_{m_c}^{-1} A_1^T P_{m_c} z - \frac{1}{k_{m_c}} z_t^T S_{m_c} z_t.$$

Если $\det(S) \neq 0$, управление выбирается из соотношения $u \leq (S^{-1}R)_i$, $i=1,\dots,m_c$.
при $\det(S) > d$, где d – фиксированное малое число. Вводится $u = u_l = [u_{l1}, \dots, u_{lm}]^T$ –
вспомогательное управление, согласованное с нечетким регулятором, чтобы не
возникало особенностей. Если $\text{abs}(\det(S)) < d$, в СУ необходимо дополнительно
ввести такой линейный регулятор. Обозначим $(S^{-1}R)_i$ – i -строку матрицы $S^{-1}R$.
Тогда при обозначении $\bar{B} = S^{-1}$ запишем:

$$u_1 \leq (S^{-1}R)_1 = \bar{b}_{11}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{1j}^c x^T P_j x - F_1(x)) + \bar{b}_{12}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c x^T P_j x - F_2(x)) +$$

$$+ \dots + \bar{b}_{m_c}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_{m_c}(x))$$

$$u_2 \leq (S^{-1}R)_2 = \bar{b}_{21}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c x^T P_j x - F_2(x)) + \bar{b}_{22}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{2j}^c x^T P_j x - F_2(x)) +$$

$$+ \dots + \bar{b}_{2m_c}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_{m_c}(x))$$

...

$$u_{m_c} \leq (S^{-1}R)_{m_c} = \bar{b}_{m_c 1}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_1(x)) + \bar{b}_{m_c 2}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_2(x)) + \dots + \bar{b}_{m_c m_c}(\sum_{j=1}^{m_c} a_{m_c j}^c x^T P_j x - F_{m_c}(x))$$

Используя частный случай диагональной матрицы $A_c = \text{diag}\{a_{11}, a_{22}, \dots, a_{m_c m_c}\}$, $a_{ii} < 0$, $i = 1, \dots, m_c$ получим:

$$\begin{aligned} r_1 &= a_{11} z^T P_1 z - z^T G_1 z - k_1 z^T P_1 A_1 S_1^{-1} A_1^T P_1 z - \frac{1}{k_1} z_t^T S_1 z_t; \\ r_2 &= a_{22} z^T P_2 z - z^T G_2 z - k_2 z^T P_2 A_1 S_2^{-1} A_1^T P_2 z - \frac{1}{k_2} z_t^T S_2 z_t; \dots, \\ r_{m_c 1} &= a_{m_c m_c} z^T P_{m_c} z - z^T G_{m_c} z - k_{m_c} z^T P_{m_c} A_1 S_{m_c}^{-1} A_1^T P_{m_c} z - \frac{1}{k_{m_c}} z_t^T S_{m_c} z_t. \end{aligned}$$

Если матрица A не является гурвицевой, то возможен второй подход: алгоритм начинается с задания ВФЛ. Если первый эффективно алгоритмизируется, то и при втором необходимо детально рассматривать особенности системы управления.

Тогда получим соотношение для синтеза регулятора:

$$\begin{aligned} u_1 &\leq (S^{-1}R)_1 = \bar{b}_{11}(a_{11}^c x^T P_1 x - F_1(x)); \quad u_2 \leq (S^{-1}R)_2 = \bar{b}_{22}(a_{22}^c x^T P_2 x - F_2(x)); \\ \dots; \quad u_{m_c} &\leq (S^{-1}R)_{m_c} = \bar{b}_{m_c m_c}(a_{m_c m_c}^c x^T P_{m_c} x - F_{m_c}(x)). \end{aligned}$$

Нечеткая логическая система состоит из динамического процесса и нечеткого логического регулятора (НЛР). u – управление, полученное дефазификацией методом центров тяжести для систем Такаги-Сугено. НЛР состоит из r нечетких $IF - THEN$ -правил. Правило в системе Такаги-Сугено записывается в виде:

$$\begin{aligned} \text{RULE } i: \text{ IF } \psi_1(x) \text{ is } X_{\psi_{i,j}} \text{ AND...AND } \psi_l(x) \text{ is } X_{\psi_{i,j}} \\ \text{THEN } u = u_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, r; \quad r \in N, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где $\psi_{ij}(x)$, $j = 1, 2, \dots, l$ нечеткие множества, $u = u_i(x)$ – управление, определяемое i -м правилом.

Каждое нечеткое правило генерирует $\alpha_i \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, r$, согласно $\alpha_i(x) = \min\{\mu_{\psi_{i,1}}(\psi_1(x)), \mu_{\psi_{i,2}}(\psi_2(x)), \dots, \mu_{\psi_{i,j}}(\psi_l(x))\}$ – функции принадлежности.

Управление u , которое должно быть применено в процессе, является функцией

$$\alpha_i \text{ и } u_i. \text{ Выход } FLC \text{ задается } u = \frac{\sum_{i=1}^r \alpha_i u_i}{\sum_{i=1}^r \alpha_i}.$$

Если для некоторых $x_0 \in X$, $\alpha_i(\psi(x_0))$, соответствующее нечеткому правилу i , есть нуль, то нечеткое правило i называется неактивным нечетким правилом для входа x_0 ; в противном случае правило называется активным нечетким

правилом. В силу этого $u = \frac{\sum_{i=1}^r A_i u_i}{\sum_{i=1}^r A_i}$, $A_i = \alpha_i$, $\alpha_i \neq 0$. Активная зона нечеткого

правила i определяется как множество $X_i^A = \{x \in X, \psi_i(x) : \alpha_i(\psi(x)) \neq 0\}$.

Алгоритм синтеза управления для линейной системы представлен на рисунке 4.4., а сама программа представлена в Приложение 3.

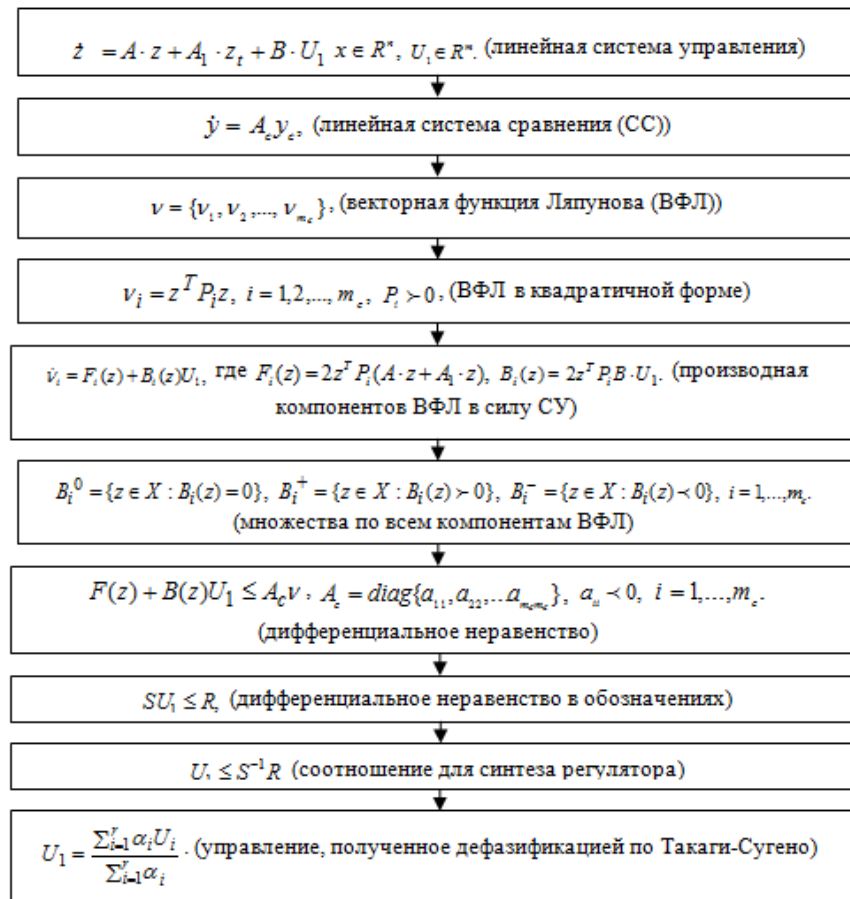


Рисунок 4.4 – Блок-схема синтеза алгоритма управления для системы с нечетким регулятором

4.4. Анализ построения оценок областей устойчивого функционирования систем управления

Оценка области устойчивого функционирования системы управления проводится либо относительно нулевого положения равновесия, либо относительно программной траектории [24, 40]. Рассматриваются системы автоматического регулирования вида:

$$\dot{x} = Ax + B\varphi(\sigma), \quad \sigma = \tilde{N}x, \quad (4.14)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния системы; A, B, C – постоянные $n \times n$ -, $n \times m$ - и $m \times n$ матрицы соответственно, причём A – гурвицева; $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)^T$ – переменный вектор; $\varphi(\sigma) = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)^T$ – векторная нелинейность ($\varphi: R^m \rightarrow R^m$), удовлетворяющая условиям $0 \leq \varphi_i(\sigma) \leq k_i \sigma_i$, $\varphi_i(0) = 0$ ($i = \overline{1, m}$), где k_i ($0 < k_i \leq \infty, i = \overline{1, m}$) – постоянные величины. Для получения условий асимптотической устойчивости решения $x = 0$ системы используется функция Ляпунова вида $v = x^T P x + \beta^T f(\sigma)$, производная по времени от которой в силу системы (4.48) будет $\dot{v} = x^T G x + 2x^T \chi(\sigma) + \beta^T \partial f(\sigma) / \partial f C B \varphi(\sigma)$.

Преобразуем заменой переменных: $z = (\bar{z}, \tilde{z})^T$, $\bar{z} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)^T$, $\tilde{z} = (x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)^T$, где $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_\nu)^T$ – постоянный вектор ($\beta \in R^\nu$); $f = (f_1(\sigma), f_2(\sigma), \dots, f_\nu(\sigma))^T$ – вектор-функция, имеющая непрерывные производные по σ ($f \in R^\nu$); P – $n \times n$ – симметричная матрица;

$$\chi(\sigma) = P\beta\phi(\sigma) + \frac{1}{2} A^T C^T \left(\frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \right)^T \beta; \quad \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} = \left\| \frac{\partial f_i}{\partial \sigma_j} \right\|_{i=1, \nu; j=1, m}.$$

Следуя [5], отыскиваем условные экстремумы функций Ляпунова и ее производной при условии связи $\sigma = \tilde{N}x$ на гиперплоскости $\sigma = \bar{\sigma}$, в результате чего получаем следующие неравенства: $\bar{\sigma}^T (C P^{-1} C^T)^{-1} \bar{\sigma} + \beta^T f(\bar{\sigma}) \geq 0$,

$$\begin{aligned} & \bar{\sigma}^T C_1 \bar{\sigma} + 2 \bar{\sigma}^T C_1 C G^{-1} \chi(\bar{\sigma}) + \chi^T(\bar{\sigma}) G^{-1} C^T C_1 C G^{-1} \chi(\bar{\sigma}) + \\ & + \chi^T(\bar{\sigma}) G^{-1} \chi(\bar{\sigma}) - \beta^T \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} C B \phi(\bar{\sigma}) \geq 0; \end{aligned} \quad (4.15)$$

при условиях $L^T P L > 0$, $L^T G L < 0$,

где $\tilde{N}_1 = -(CG^{-1}C^T)^{-1}$; $L = \begin{pmatrix} -\tilde{C}^{-1} & \tilde{C} \\ E_{n-m} \end{pmatrix}$; $C = (\bar{C} : \tilde{C})$, $\bar{C} - m \times m$ – неособенная матрица; $\tilde{C}, E_{n-m} - m \times (n-m), (n-m) \times (n-m)$ – матрицы соответственно, причем E_{n-m} – единичная, $\hat{z} = \hat{z}^{k_0}$.

Таким образом, система преобразуется к виду:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}\phi(\bar{z}), \quad (4.16)$$

$$\text{Здесь } \bar{A} = \begin{pmatrix} \bar{A}_1 & \vdots & \bar{A}_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{A}_3 & \vdots & \bar{A}_4 \end{pmatrix}, \bar{B} = \begin{pmatrix} C & B \\ \dots & \dots \\ B_2 \end{pmatrix}, \bar{A}_1 = \bar{C}_A \bar{C}^{-1}; \bar{A}_2 = \tilde{C}_A - \bar{C}_A \bar{C}^{-1} \tilde{C};$$

$$\bar{A}_3 = A_3 \bar{C}^{-1}; \bar{A}_4 = A_4 - A_3 \bar{C}^{-1} \tilde{C}; A = \begin{pmatrix} A_1 & \vdots & A_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ A_3 & \vdots & A_4 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_1 \\ \dots \\ B_2 \end{pmatrix};$$

$$A_1, B_1 - m \times m; A_2 - m \times (n-m); \bar{C}_A - m \times m; \tilde{C}_A - m \times (n-m).$$

Функция Ляпунова будет иметь вид: $v = z^T P_1 z + \beta^T f(\bar{z})$,

$$\text{где } P_1 = \bar{L}^T P \bar{L}; \bar{L} = \begin{pmatrix} \bar{C}^{-1} & \vdots & -\bar{C}^{-1} \tilde{C} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & E_{n-m} \end{pmatrix}.$$

Для получения оценок областей притяжения решения $x=0$ системы (4.16) рассмотрим искомую функцию, которая является левой частью неравенства (4.15):

$$\begin{aligned} F(\bar{z}) = & \bar{z}^T C_1 \bar{z} + 2\bar{z}^T C_1 C G^{-1} \chi(\bar{z}) + \chi^T(\bar{z}) G^{-1} C^T C_1 C G^{-1} \chi(\bar{z}) + \\ & + \chi^T(\bar{z}) G^{-1} \chi(\bar{z}) - \beta^T \frac{\partial f(\bar{z})}{\partial \bar{z}} C B \phi(\bar{z}). \end{aligned} \quad (4.17)$$

В пространстве R^n является уравнением некоторой гиперповерхности Π . $F(\bar{z})=0$ есть уравнение сечения N гиперповерхности Π гиперплоскостью $\tilde{z}=0$. Если в области R , ограниченной сечением N , выполняется условие (4.15), то, построив на гиперповерхности N гиперцилиндр T с образующей, параллельной $\tilde{z}$, и вписав в него поверхность $v = const$, получим оценку области притяжения решения $x=0$ системы (4.16).

Применяя к (4.17) неособенное преобразование $\bar{z} = \hat{D}\hat{z}$, $\hat{z} \in R^m$, $\hat{D} - m \times m$ – матрица, получим функцию $\bar{F}(\hat{z}) = F(\hat{D}\hat{z})$. Рассмотрим вектор, где $\hat{z}^{k0} = (0, \dots, 0, \hat{z}^{k0}, 0, \dots, 0)^T$, $k = \overline{1, m}$. Тогда функция $\bar{F}(\hat{z}^{k0}) = \tilde{F}(\hat{z}_k)$ зависит только от одной переменной $\hat{z}_k$; следовательно, $\tilde{F}(\hat{z}_k) = 0$ будет уравнением с одним известным, корни которого λ_i , $i = \overline{1, q}$. Число q зависит от вида конкретных нелинейностей. Наименьший положительный действительный корень λ_m дает нам границу области R в некотором направлении (вдоль оси $\hat{z}_k$), заданным матрицей преобразования $\hat{D}$. Задавая различные направления (например, с некоторым шагом по углам), можем найти дискретный набор точек границы области R . При наиболее часто встречающихся нелинейностях выражение при $\hat{z} = \hat{z}^{k0}$ превращается в многочлен по степеням $\hat{z}_k$, что облегчает нахождение корней. При достаточно большом m затруднительно построить матрицу преобразования $\hat{D} = \hat{D}_{n-1} \hat{D}_{n-2} \dots \hat{D}_2 \hat{D}_1$. При $m = 2$ и $m = 3$ это сделать просто. Построим алгоритм поиска дискретной сети точек границы области R для произвольного $m \geq 2$, используя матрицу преобразования при $m = 2$.

Сформируем набор матриц $\hat{D}_k$, $k = \overline{1, m-1}$:

$$\hat{D}_k = \begin{pmatrix} 1 & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & \hat{d}_{k,k}^{(k)} & \hat{d}_{k,k+1}^{(k)} & \\ & & & \hat{d}_{k+1,k}^{(k)} & \hat{d}_{k+1,k+1}^{(k)} & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & \ddots \\ 0 & & & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.18)$$

в которых 2×2 – блок из элементов $\hat{d}_{k,k}^{(k)} = \cos \alpha^{(k)}$, $\hat{d}_{k,k+1}^{(k)} = -\sin \alpha^{(k)}$, $\hat{d}_{k+1,k}^{(k)} = \sin \alpha^{(k)}$, $\hat{d}_{k+1,k+1}^{(k)} = \cos \alpha^{(k)}$ является матрицей преобразования для $m = 2$.

Запишем основные шаги отыскания дискретной сети граничных точек области R :

1. Задаем $i_k = 0$, $\alpha_1^{(k)} = \alpha_0^{(k)}$, $k = \overline{1, m-1}$, где $\alpha_0^{(k)}$ – начальные значения углов $\alpha_{i_k}^{(k)}$ и h_k , $k = \overline{1, m-1}$ – значения шагов по углам $\alpha_{i_k}^{(k)}$ для каждой пары $\hat{z}_k$, $\hat{z}_{k+1}$.

Вычисляем $P_1 = E\left(\frac{360}{h_1}\right)$, $P_i = E\left(\frac{180}{h_i}\right)$, $i = \overline{2, m-1}$, где $E(\cdot)$ – целая часть числа.

Задаем $l = l_0$, где l_0 – достаточно большое число.

2. $\alpha_{i_1}^{(1)}$ присвоим значение $\alpha_{i_1}^{(1)} + h_1$, $i_1 = 0$, p_1 , вычисляя на каждом шаге λ_m , тем самым находим дискретные граничные точки области R в сечении $\hat{z}_3^{(i_3)} = 0$, $\hat{z}_4^{(i_4)} = 0, \dots, \hat{z}_m^{(i_m)} = 0$. На каждом шаге проверяем: если $\lambda_m < l$, то l присвоим значение λ_m .

3. i_2 присвоим значение $i_2 + 1$. Если $i_2 \leq p_2$, то $\alpha_{i_2}^{(2)}$ присвоим значение $\alpha_{i_2}^{(2)} + h$ и возвратимся к 1. Если $i_2 > p_2$, то i_2 присвоим значение 0 и идем к 3.

4. i_3 присвоим значение $i_3 + 1$. Если $i_3 \leq p_3$, то $\alpha_{i_3}^{(3)}$ присвоим значение $\alpha_{i_3}^{(3)} + h_3$ и возвратимся к 1. Если $i_3 > p_3$, то i_3 присвоим 0 и пойдем к 4.

m-1. i_{m-1} присвоим значение $i_{m-1} + 1$. Если $i_{m-1} \leq p_{m-1}$, то $\alpha_{i_{m-1}}^{(m-1)}$ присвоим значение $\alpha_{i_{m-1}}^{(m-1)} + h_{m-1}$ и возвратимся к 1. Если $i_{m-1} > p_{m-1}$, то идем к m.

m. Дискретная сеть граничных точек области R вычислена. Оценка области притяжения $\mathcal{G} < l$, где $l = \lim \lambda_m$. Конец работы.

Шаги h_k , $k = \overline{1, m-1}$, в зависимости от вида области R могут выбираться автоматически.

Алгоритм областей устойчивого функционирования систем управления с учетом запаздывания показан на рисунке 4.5, а программа представлена в приложение 3.

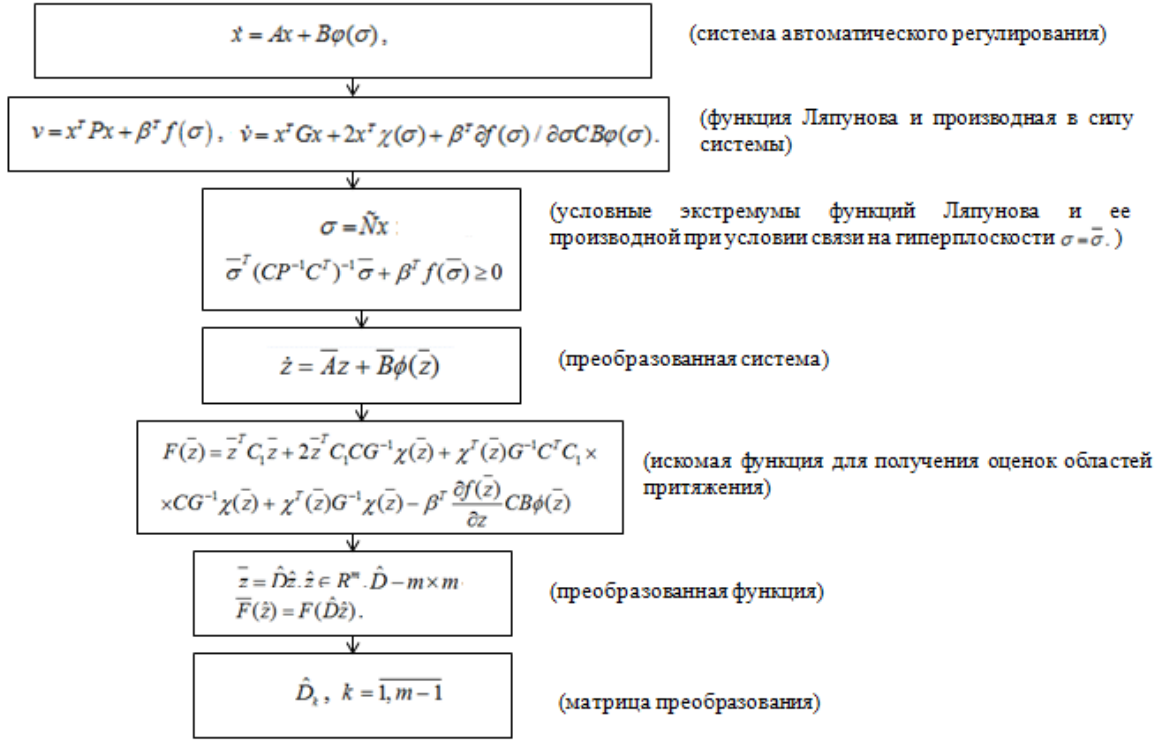


Рисунок 4.5 – Алгоритм областей устойчивого функционирования систем управления с учетом запаздывания

Таким образом, в результате работы приведенного алгоритма получена некоторая оценка области притяжения. Взяв в качестве критерия оптимальности оценки n -мерный объем, ограниченный гиперповерхностью $v = const$, и оптимизируя его по параметрам функции Ляпунова $P_{i,j}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$; β_s , $s = \overline{1, m}$ при условии положительной определенности P и ограничениях $\beta_s > 0$, где $P_{i,j}$, β_s – элементы матрицы P и вектора β , получаем оптимальные оценки области притяжения в заданном классе функций Ляпунова. n -мерный объем здесь вычисляется с помощью применения преобразования $z = \hat{D}_v \hat{z}_v$, $\hat{D}_v = \hat{D}_{(n-1)v} \hat{D}_{(n-2)v} \dots \hat{D}_{2v} \hat{D}_{1v}$, $\hat{D}_v - n \times n$ – матрица, при этом получаем:

$$\bar{F}_v(\hat{z}) = \hat{z}_v^T \hat{D}_v^T P_1 \hat{D}_v \hat{z}_v + \beta^T f(\hat{D}_v \hat{z}_v) - l, \quad (4.19)$$

где $\hat{z}_v = (\hat{z}_v, \hat{z}_v)^T$; $\hat{D}_v = (\hat{D}_v : \hat{D})$; $\hat{D} - n \times m$, $n \times (n - m)$ – матрицы соответственно.

Как и ранее, положив $\hat{z}^{k0} = \hat{z}_g^{k0} = (0, \dots, 0, \hat{z}_{gk}, 0, \dots, 0)^T$ из (4.19) получим:

$$\bar{F}_v(\hat{z}_v^{k0}) = \tilde{F}(\hat{z}_{vk}) = (\hat{d}_v^{(k)} \cdot W) \hat{z}_{vk}^2 + \beta^T f(\hat{d}_v^{(k)} \hat{z}_{vk}) - l.$$

Здесь $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$; $W \in R^n$; $W_i = (p_i^{(1)} \hat{d}_v^{(k)})$, $i = \overline{1, n}$, $p_i^{(1)}$ – i -я вектор-строка P_1 , $\hat{d}_v^{(k)}$ – k -й вектор-столбец $\hat{D}_v$. Построив алгоритм, подобный приведенному, решая уравнение $\tilde{F}_v(\hat{z}_{vk}) = 0$ и отбирая наименьшие действительные положительные корни λ_{mv} , вычисляем дискретную сеть точек, принадлежащих поверхности $v = l$. В качестве конкретного критерия оптимизации можно взять критерий $\tilde{N}_i = \sum \lambda_{mv}$, где сумма берется по всей дискретной сети точек. При практических расчетах бывает необходимо знать область притяжения только в некоторых сечениях. Тогда ненужные координаты можно исключить из критерия S_{ll} и, оптимизируя объем с преобразованным критерием, получить оценки по необходимым координатам. Приведенный алгоритм [5] может быть применен для достаточно общих систем, программно реализуется, а также выгоден тем, что позволяет управлять ростом оценки в нужных направлениях, т.е. позволяет проводить синтез регулятора с управляемым изменением оценки области притяжения.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Сформулированы и решены общие задачи по управлению в пространстве состояния, которые позволяют разработать функционально-ориентированную на использование в качестве идентификатора состояния математическую модель для управления температурой потока смешанной нефти.

2. Разработан алгоритм управления температурой потока вязкой нефти с идентификатором состояния в контуре управления.

3. Разработана методика и алгоритм идентификации математических моделей процессов температурной обработки потоков ВСН, СВН и смешанной нефти.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АДАПТИВНОЙ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОТОКА НЕФТИ

5.1 Разработка структурной схемы адаптивной системы автоматического управления по регулированию температурой потока смешанной нефти с идентификатором состояния

В пятой главе разработана автоматическая система управления процессом транспортировки потока смешанной нефти, содержащая подсистему адаптивного автоматического управления температурой потока нефти с моделью-идентификатором состояния в контуре, отличающаяся от известных обеспечением стабилизации заданной температуры потока нефти в условиях неопределенности.

От начальной температуры СВН и ВСН зависит расход пара для поддержания определенной температуры в точке С, которая должна быть в пределах 10...20°С.

Объект управления подразделяется на два объекта и соответственно управляется двумя контурами автоматического управления подачи пара в змеевики емкостей E_1 , E_2 – внешним и внутренним, которые представлены на рисунке 2.2.

Контур автоматического управления температурой потоков нефти с использованием подачи пара содержит последовательно соединенные звенья (рис. 5.1): непрерывное наблюдение, ФОМ, нечеткие звенья регулирования и регулирующие органы (задвиги на подачу пара в емкости E_1 и E_2).

Продолжительность периода идентификации ФОМ и ее погрешность могут оказаться слишком высокими в связи с невозможностью учета в структуре идентификатора состояния (ФОМ) неопределенности, связанной зависимостью температуры и вязкости потоков нефти от множества переменных $\mu_{t,1}(\theta_{ж1}, \theta_{ос}, G_{ж1}, N_{ж1})$ $\mu_{t,2}(\theta_{ж2}, \theta_{ос}, G_{ж2}, N_{ж2})$: физико-химического состава и доли СВН, ВСН в потоке смешанной нефти, массовой доли воды, концентрации хлористых солей, механических примесей, серы, смолы, парафинов, насыщенных паров, асфальтенов и др. С целью повышения качества идентификации в условиях

таких возмущений система дополнена нечеткими регуляторами.

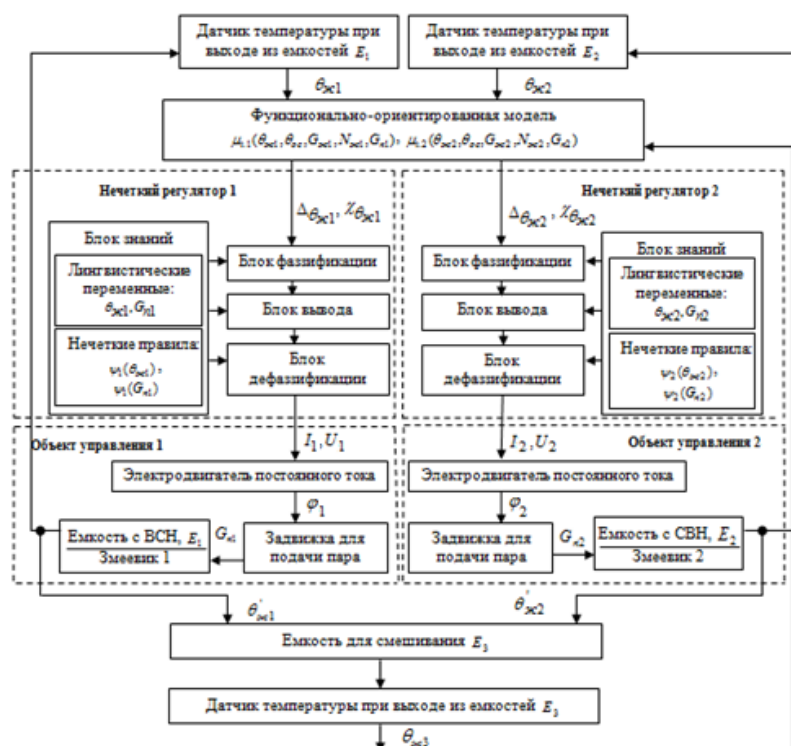


Рисунок 5.1 – Структурная схема адаптивной подсистемы автоматического управления температурой потока нефти

На рисунке 5.2 представлена адаптивная система управления с НР. НР обеспечивает достаточное быстродействие регулирования и качество переходного процесса по сравнению с ПИ и ПИД-регуляторами в адаптивной системе, повышается эффективность управления транспортировкой вязкой нефти. При этом с помощью идентификатора состояния в адаптивной системе [113(a)] повышается точность регулирования, так как осуществляется корректировка базы правил для НР. Изменение эмпирических зависимостей $\mu_{t,3}(\theta_{ж3})$, $\theta_{ж1}(G_{n1})$ поступающих на вход вычислительного блока ФОМ с интеграцией по времени в один час позволяет более точно настроить модель и провести коррекцию продукционных правил для НР.

Неполная исходная информация об объекте и условиях его функционирования требует корректировки закона управления, который реализуется посредством анализа поведения объекта при текущем управлении, при этом управляющий сигнал по обратной связи объекта управления формируется НР.

Детерминированное звено включает в себя априорную информацию по температуре и расходу потоков ВСН, СВН и пара, которая представлена в виде передаточных функций, описывающих текущие динамические процессы. При поступлении СВН и ВСН в емкость E_3 появляются неопределенности, основной причиной которых является зависимость вязкости смешанной нефти от температуры.

В качестве моделей технологических объектов используются передаточные функции, которые представлены в главе 2. Передаточная функция конкретного объекта управления находится из системы дифференциальных и алгебраических уравнений (глава 2). Динамику объекта управления в САУ качеством температурного режима потока смешанной нефти на основании известной модели идеального вытеснения для цилиндрической емкости можно описать двумя последовательно соединенными звеньями транспортного запаздывания и апериодического звена первого порядка.

На рисунке 5.2 обозначено $W_{ob1}(s)$, $W_{ob2}(s)$, $W_{ob3}(s)$ – передаточные функции объекта; $W_{oc1}(s)$, $W_{oc2}(s)$ – передаточные функции отрицательной связи; $u_1(s)$, $u_2(s)$ – управляющее воздействие; $\theta_{ж01}$, $\theta_{ж02}$ – возмущающее воздействие (исходная температура ВСН и СВН); $\theta_{ж2}$, $\theta_{ж3}$ – управляемая переменная.

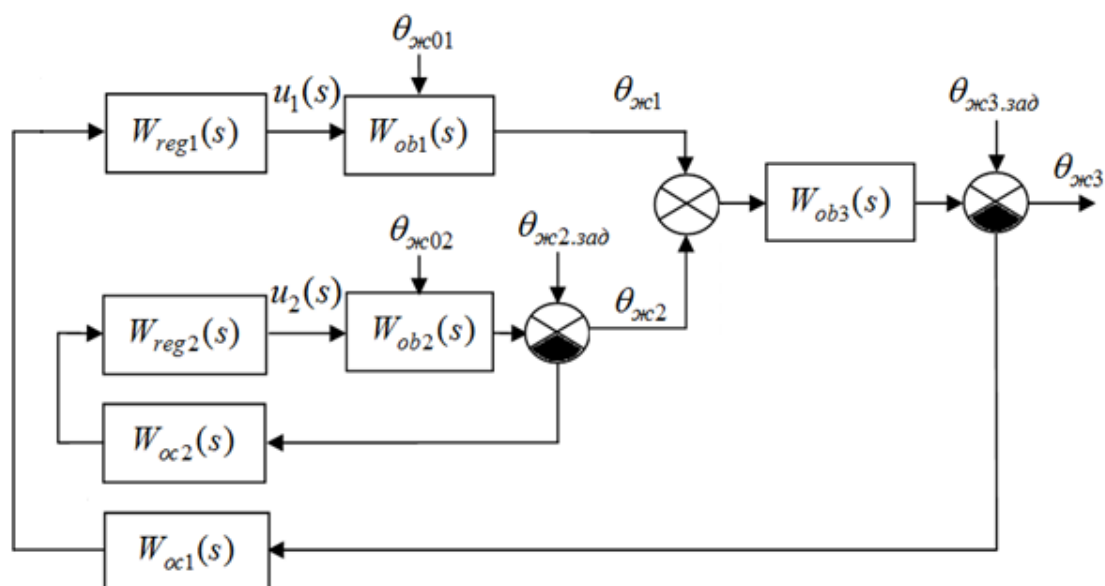


Рисунок 5.2 – Адаптивная система управления в передаточных функциях

Передаточные функции:

$$W_{ob1}(s) = \frac{W_{cm1}(s) \cdot W_{E1}(s)}{W_{cm1}(s) + W_{E1}(s)} + W_{z1}(s), \quad W_{ob2}(s) = \frac{W_{cm2}(s) \cdot W_{E2}(s)}{W_{cm2}(s) + W_{E2}(s)} + W_{z2}(s),$$

$$W_{ob3}(s) = \frac{k_{E3}}{T_{E3} \cdot s + 1} \quad W_{reg1}(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot s,$$

где k_{E3} , T_{E3} - коэффициент усиления и постоянная времени для емкости E_3

Передаточные функции стенки змеевиков и емкостей E_1 , E_2 ($i=1 \dots 2$):

$$W_{cm.i}(s) = \frac{\frac{\theta_n}{\theta_{cm.i}}}{\frac{G_{ni} \cdot c_{ni}}{\alpha_i \cdot S_i} \cdot s + 1}, \quad W_{Ei}(s) = \frac{\frac{\theta_{cmi}}{\theta_{жи}}}{\frac{G_{жиi} \cdot c_{жиi}}{\alpha_i \cdot S_i} \cdot s + 1}.$$

Передаточные функции исполнительных устройств:

$$W_{zi}(s) = k_{СУУ} \cdot \frac{k_{ДВi}}{T_{ДВi}s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot k_{\phi i},$$

где $k_{СУ}$ – коэффициент согласующего устройства, $T_{ДВ}$ – постоянная времени для двигателя в пределах от 0,6 до 1,8 с., $k_{ДВ}$ – коэффициент передачи для двигателя.

Адаптивная система управления с детерминированным звеном и нечетким регулятором в приложении Simulink пакета MatLab [30, 31, 98], построенные на основе передаточных функций приведена на рисунке 5.3:

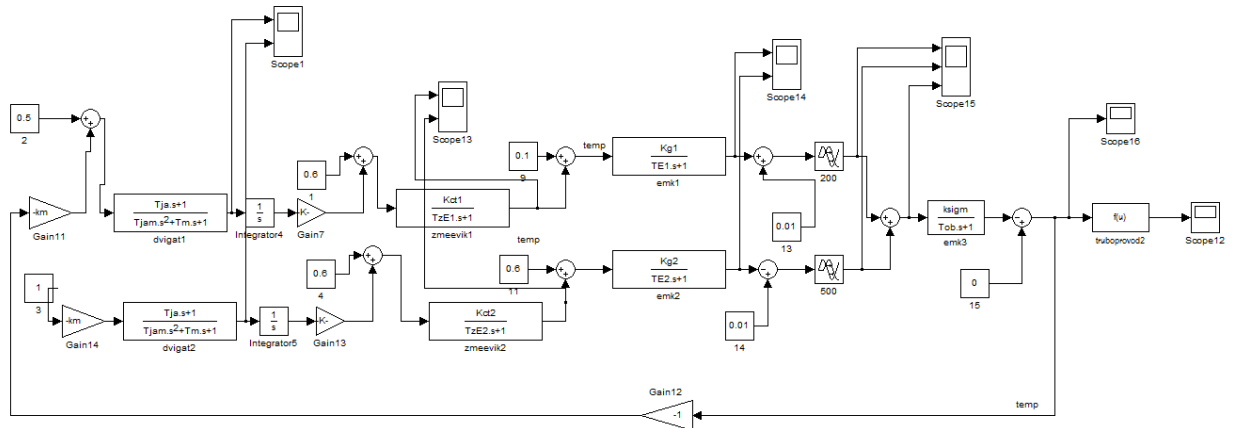


Рисунок 5.3 – Адаптивная система управления с детерминированным звеном и нечетким регулятором в приложении Simulink пакета MatLab

5.2 Разработка нечеткой системы управления температурой потоков нефти

В альтернативу разработки структурной схемы адаптивной системы автоматического управления температурой потока смешанной нефти с идентификатором состояния рассмотрим основные шаги разработки нечеткой

системы управления температурой потоков нефти. Для создания и разработки модели нечёткого управления используется среда математического моделирования MATLAB и инструмент, имеющийся в ней под названием Fuzzy Logic Toolbox, который является средством разработки систем нечеткого управления [73]. Системы нечёткого управления создаются в редакторе систем нечёткого вывода – FIS редакторе. Лингвистические переменные создаются в редакторе ФП. А правила изменения выходных переменных в зависимости от входных задаются в редакторе правил (Rule Editor).

5.2.1 Определение состава и характеристики входных и выходных переменных нечеткого регулятора

На вход НР [27...31, 33...37, 43] подаются три параметра:

1) скорость изменения потока нефти (rate); 2) разность между заданной температурой и текущей (temp); 3) скорость перемещения задвижки ($\vartheta(t)$).

Скорость потока нефти в емкости может быть: низкой (low), нормальной (normal), высокой (high).

Разность между заданной температурой потока нефти и текущей может быть: 1) отрицательной предельной ($\text{minus}_{\text{limit}}$), 2) отрицательной нормальной ($\text{minus}_{\text{normal}}$), 3) нормальной (norm), 4) положительной нормальной ($\text{plus}_{\text{normal}}$), 5) положительной предельной ($\text{plus}_{\text{limit}}$).

На выходе НР две переменные:

1) расход подачи пара в змеевики емкостей E_1 и E_2 для нагрева потока нефти; 2) напряжение, подаваемое на электропривод задвижки подачи пара в змеевики емкостей E_1 и E_2 .

5.2.2 Нечеткий логический вывод и дефаззификация выходного показателя

Рассмотрим алгоритмическую реализацию блока (Приложение 4) на основе нечеткой логики на закрытие задвижки для подачи пара в змеевики емкостей E_1 и E_2 . Центральное место в системах нечеткого управления занимает нечеткий вывод. Механизм логического вывода включает четыре этапа:

1) Блок фаззификации (БФЗ). Определяется диапазон по углу открытия задвижки φ , а также тип функции принадлежности.

2) Блок знаний (БЗ). Соответствующей формулировкой продукционных правил достигается результат, при котором для любой лингвистической переменной (ЛП) управляющего воздействия, как минимум, одно из нечетких правил оказывается приемлемым.

3) Обработка правил. Это процедура обработки базы правил с формированием результирующей функции принадлежности (ФП) представляет собой логическое решение для расчета выходной величины нечеткого регулятора (НР). В работе используется «минимаксный» метод логического решения, при котором результирующая ФП определяет собой текущее воздействие базы правил.

4) Блок дефаззификация (БДФ) и вычисление выходного показателя. На этом этапе осуществляется переход от нечетких значений величин к определенным физическим параметрам, которые могут служить командами исполнительному устройству.

5.2.3 Математическая модель нечеткой базы знаний и организация данных в базе знаний

Нечеткий алгоритм составляется с учетом воздействия внешних климатических факторов и неоднородности нагреваемых структур. Разработаны нечеткие правила в режиме реального времени в диапазоне изменения температуры ВСН от 40°C до 90°C, а СВН от 80°C до 90°C (рис. 5.6 а, б), с учетом изменения подачи пара. При этом скорость передачи тепла от змеевика к потоку ВСН будет выше так как вязкость $\mu_{ж1} < \mu_{ж2}$.

График зависимости температуры ВСН и СВН от расхода пара получен путем изменения угла поворота задвижки при подаче пара в змеевик емкости E_1 , E_2 с шагом 10°C (рис. 5.4).

Для обработки экспериментальных данных используется метод наименьших квадратов, когда аппроксимирующая функция ограничена диапазоном заданных точек и служит в качестве только интерполирующей зависимости.

Уравнение прямой имеет вид: $\theta_{ж.і} = m \cdot G_{n.і} + b$,

где $m = \frac{\sum (G_{n.і} - \bar{G}_{n.і}) \cdot (\theta_{ж.і} - \bar{\theta}_{ж.і})}{\sum (G_{n.і} - \bar{G}_{n.і})^2}$ - наклон; $b = \bar{G}_{n.і} - m \cdot \bar{\theta}_{ж.і}$ - пересечение с осью

$\theta_{ж.і}$; $\bar{G}_{n.і}, \bar{\theta}_{ж.і}$ - средние значения расхода пара и температуры нефти, $i = 1...2$.

Точность аппроксимации с помощью прямой зависит от степени разброса данных.

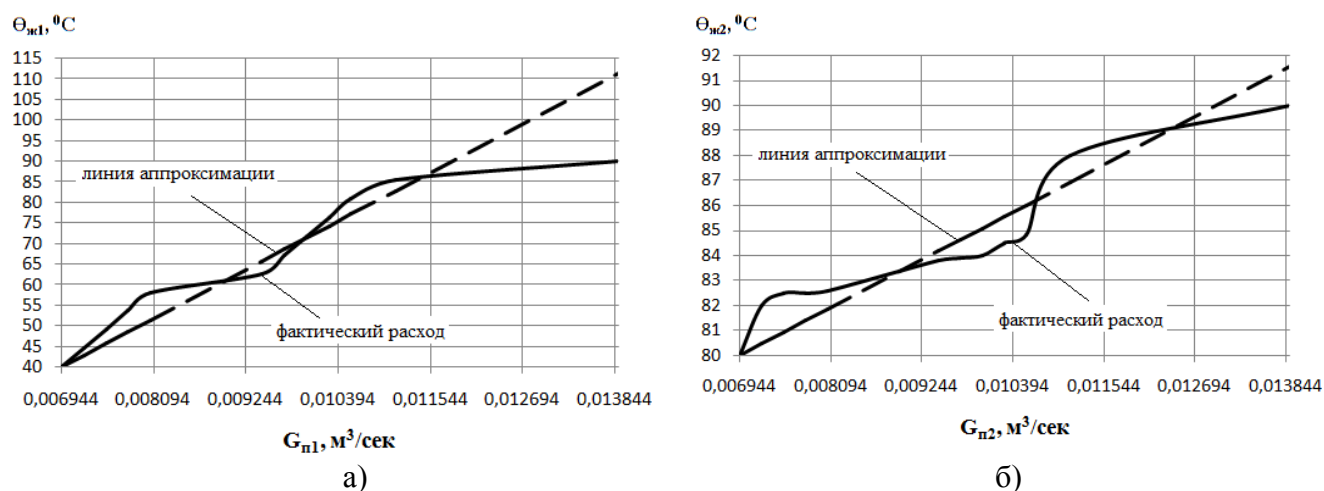


Рисунок 5.4 – Зависимость температуры нефти от расхода пара:
а) для высокосернистой нефти, б) для сверхвязкой нефти

Подача пара в замерную емкость регулируется с помощью задвижки, степень открытия которой φ пропорциональна G_n . Объект управления (емкость) представлен идеальным интегрирующим звеном, который охвачен нелинейной отрицательной обратной связью, соответствующей закону истечения потока ВСН из емкости E_1 , характеризующейся коэффициентом $1/S$, где S – площадь поверхности потока ВСН, m^2 .

В качестве управляющего воздействия на объект управления в нечетком алгоритме рассматривается скорость перемещения задвижки $\dot{g}(t) = d(\varphi(t))/dt$.

Функцию принадлежности (ФП) рассмотрим на примере потоков ВСН и СВН: отклонение температуры $\Delta\theta_{ж1} = \theta_{ж1.зад} - \theta_{ж1}$, $\Delta\theta_{ж2} = \theta_{ж2.зад} - \theta_{ж2}$, скорость её изменения $\chi_{\theta_{ж1}} = d\theta_{ж1}/dt$, $\chi_{\theta_{ж2}} = d\theta_{ж2}/dt$ и скорость перемещения задвижки

$\mathcal{G}_1(t)$, $\mathcal{G}_2(t)$ показаны на рисунке 5.5, где ZR – zero, NB – negative big, PB – positive big, NM – negative medium, PM – positive medium.

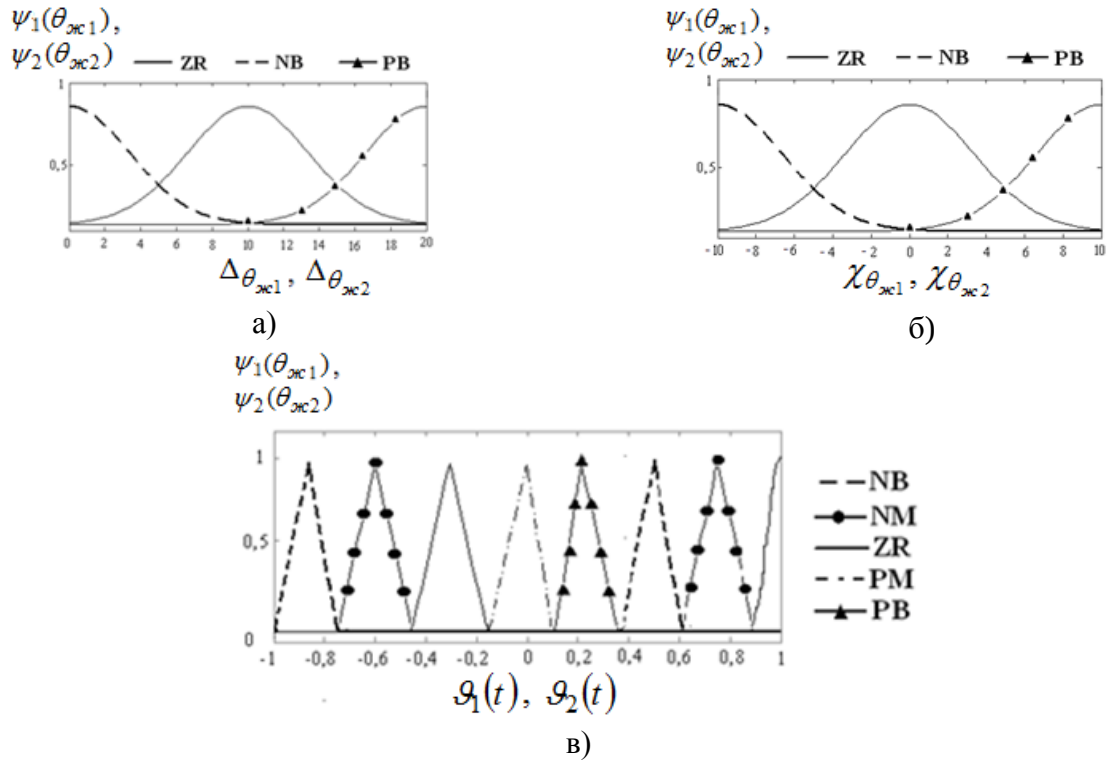


Рисунок 5.5 – Функции принадлежности для отклонения температуры $\Delta\theta_{ж1}$, $\Delta\theta_{ж2}$ (а), скорости её изменения $\chi\theta_{ж1}$, $\chi\theta_{ж2}$ (б) и скорости перемещения задвижки $\mathcal{G}_1(t)$, $\mathcal{G}_2(t)$ (в)

На рисунке 5.6 представлен алгоритм управления задвижкой по подаче пара.

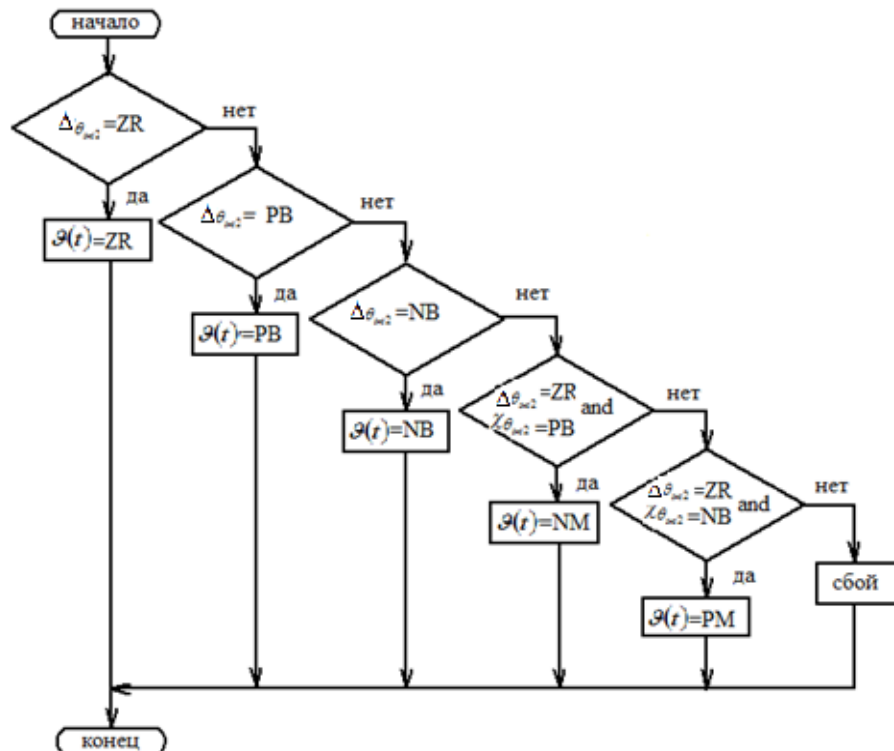


Рисунок 5.6 – Логическая схема алгоритма функционирования нечеткого регулятора

Алгоритм управления процессом тепловой обработки потоков нефти и ее транспортировки представлен на рисунке 5.7.

За основу взят известный метод автоматической модификации продукционных правил [66]. Он предусматривает выделение зон в режиме реального времени и последующее изменение в соответствии с количеством выделенных зон функций принадлежности термов лингвистических переменных. С этой целью в процессе обогрева нефти управляющая программа выделяет точки перегиба функции изменения температуры $\theta_{ж1,j}$, $\theta_{ж2,j}$ в зависимости от изменения расхода пара $G_{п1,j}$, $G_{п2,j}$, где ($j=1...9$), которые в дальнейшем становятся границами новых зон.

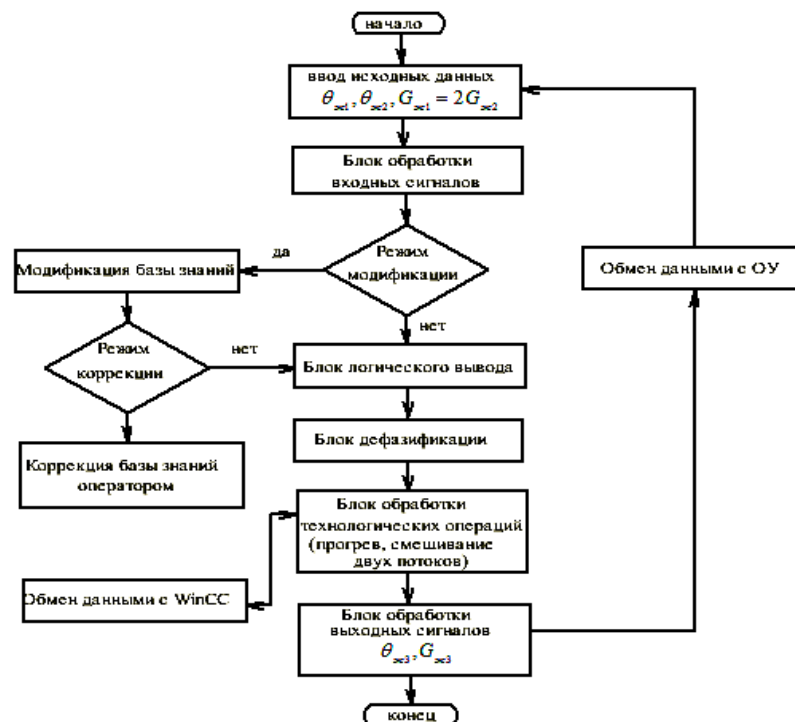


Рисунок 5.7 – Алгоритм синтеза управления процессом тепловой обработки потоков нефти с нечетким регулятором

Каждой зоне определяются в соответствии термы лингвистических переменных «Температура», «Расход пара» и строятся их функции принадлежности упомянутых лингвистических переменных.

Так как зависимость «температура нефти-расход пара» носит нелинейный характер, то область значений каждой переменной разбивается на неравные

интервалы, например для нелинейной зависимости температуры ВСН $\theta_{ж1}$, СВН $\theta_{ж2}$ от расхода пара G_{n1} , G_{n2} разделены на следующие зоны:

$$\psi_1(\theta_{ж1}) = \begin{cases} 1 - |\theta_{ж1} - 41,2|/2 & \text{для } \theta_{ж1} \in [40, 42,5]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 49|/0,25 & \text{для } \theta_{ж1} \in [41, 49,75]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 58,2|/0,25 & \text{для } \theta_{ж1} \in [49, 58,5]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 62,75|/0,5 & \text{для } \theta_{ж1} \in [58, 64]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 67,3|/0,25 & \text{для } \theta_{ж1} \in [65,7, 68]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 71,85|/0,5 & \text{для } \theta_{ж1} \in [68, 72]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 76,4|/0,4 & \text{для } \theta_{ж1} \in [72, 77]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 80,95|/0,5 & \text{для } \theta_{ж1} \in [76, 86,7]; \\ 1 - |\theta_{ж1} - 85,5|/2 & \text{для } \theta_{ж1} \in [85, 89,5]. \end{cases}$$

$$\psi_1(G_{n1}) = \begin{cases} 1 - |G_{n1} - 41,2|/2 & \text{для } G_{n1} \in [40, 42,5]; \\ 1 - |G_{n1} - 49|/0,25 & \text{для } G_{n1} \in [41, 49,75]; \\ 1 - |G_{n1} - 58,2|/0,25 & \text{для } G_{n1} \in [49, 58,5]; \\ 1 - |G_{n1} - 62,75|/0,5 & \text{для } G_{n1} \in [58, 64]; \\ 1 - |G_{n1} - 67,3|/0,25 & \text{для } G_{n1} \in [65,7, 68]; \\ 1 - |G_{n1} - 71,85|/0,5 & \text{для } G_{n1} \in [68, 72]; \\ 1 - |G_{n1} - 76,4|/0,4 & \text{для } G_{n1} \in [72, 77]; \\ 1 - |G_{n1} - 80,95|/0,5 & \text{для } G_{n1} \in [76, 86,7]; \\ 1 - |G_{n1} - 85,5|/2 & \text{для } G_{n1} \in [85, 89,5]. \end{cases}$$

$$\psi_2(\theta_{ж2}) = \begin{cases} 1 - |\theta_{ж2} - 81,2|/2 & \text{для } \theta_{ж2} \in [80, 82,5]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 82|/0,25 & \text{для } \theta_{ж2} \in [81, 82,75]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 82,8|/0,25 & \text{для } \theta_{ж2} \in [82, 83,5]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 83,3|/0,5 & \text{для } \theta_{ж2} \in [82,7, 84]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 84|/0,25 & \text{для } \theta_{ж2} \in [83,7, 84,8]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 84,75|/0,5 & \text{для } \theta_{ж2} \in [84, 85,5]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 85,4|/0,4 & \text{для } \theta_{ж2} \in [84,7, 86]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 86|/0,5 & \text{для } \theta_{ж2} \in [85,55, 86,7]; \\ 1 - |\theta_{ж2} - 88|/2 & \text{для } \theta_{ж2} \in [86, 89,5]. \end{cases}$$

$$\psi_2(G_{n2}) = \begin{cases} 1 - |G_{n2} - 81,2|/2 & \text{для } G_{n2} \in [80, 82,5]; \\ 1 - |G_{n2} - 82|/0,25 & \text{для } G_{n2} \in [81, 82,75]; \\ 1 - |G_{n2} - 82,8|/0,25 & \text{для } G_{n2} \in [82, 83,5]; \\ 1 - |G_{n2} - 83,3|/0,5 & \text{для } G_{n2} \in [82,7, 84]; \\ 1 - |G_{n2} - 84|/0,25 & \text{для } G_{n2} \in [83,7, 84,8]; \\ 1 - |G_{n2} - 84,75|/0,5 & \text{для } G_{n2} \in [84, 85,5]; \\ 1 - |G_{n2} - 85,4|/0,4 & \text{для } G_{n2} \in [84,7, 86]; \\ 1 - |G_{n2} - 86|/0,5 & \text{для } G_{n2} \in [85,55, 86,7]; \\ 1 - |G_{n2} - 88|/2 & \text{для } G_{n2} \in [86, 89,5]. \end{cases}$$

Кривые $\theta_{ж1} = f(G_{n1})$, $\theta_{ж2} = f(G_{n2})$ на рисунке 5.4 разделяется на соответствующие зоны, в пределах которых она имеет постоянный угол наклона к оси абсцисс. Центр каждой зоны по оси температур на рисунках 5.8 и 5.9 является центром термов функции принадлежности лингвистической переменной «Температура». Аналогичным образом строятся функции принадлежности термов для лингвистической переменной «Расход пара».

Алгоритм работы управляющей части системы формулируется в виде иерархического набора продукционных правил, разбитых на секции в соответствии с принадлежностью к той или иной задаче и этапу принятия решения по управлению.

На следующем этапе определяются продукционные правила, связывающие лингвистические переменные. Совокупность таких правил описывает стратегию управления, применяемую в данной задаче.

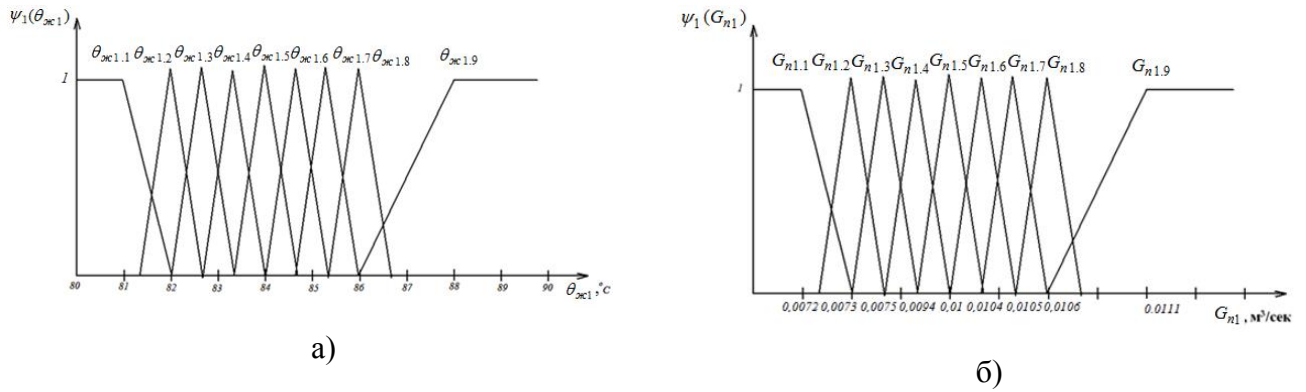


Рисунок 5.8 – Функции принадлежности термов лингвистических переменных для ВСН:
а) «Температура», б) «Расход пара»

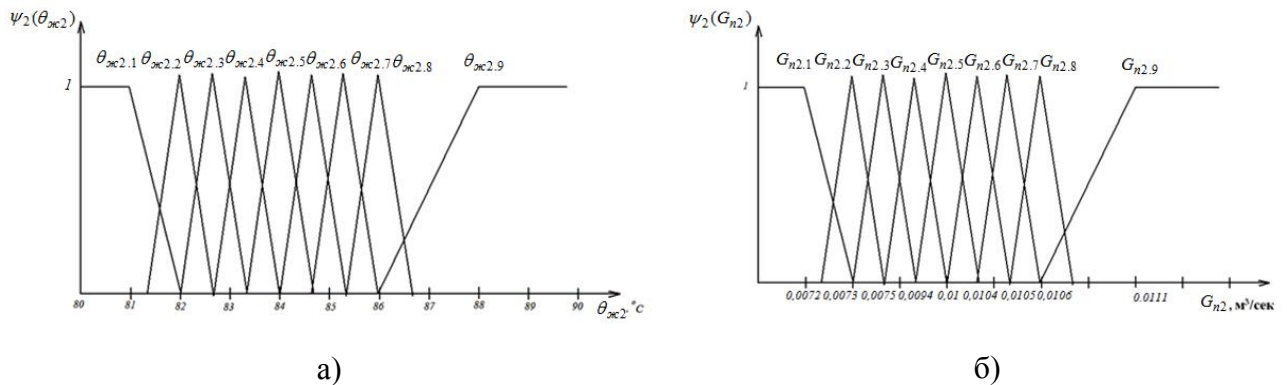


Рисунок 5.9 – Функции принадлежности термов лингвистических переменных для СВН:
а) «Температура», б) «Расход пара»

Для каждого терма взятой лингвистической переменной определяется числовое значение или диапазон значений, наилучшим образом характеризующие данный терм и соответствующие единичному значению функции принадлежности. Общие правила управления по расходу пара, осуществляются следующей системой продукционных правил для ВСН и СВН:

- | | |
|---|---|
| 1. If ($\theta_{жс1}$ is $\theta_{жс1.1}$) then (G_{n1} is $G_{n1.1}$); | 1. If ($\theta_{жс2}$ is $\theta_{жс2.1}$) then (G_{n2} is $G_{n2.1}$); |
| 2. If ($\theta_{жс1}$ is $\theta_{жс1.2}$) then (G_{n1} is $G_{n1.2}$); | 2. If ($\theta_{жс2}$ is $\theta_{жс2.2}$) then (G_{n2} is $G_{n2.2}$); |
| 3. If ($\theta_{жс1}$ is $\theta_{жс1.3}$) then (G_{n1} is $G_{n1.3}$); | 3. If ($\theta_{жс2}$ is $\theta_{жс2.3}$) then (G_{n2} is $G_{n2.3}$); |
| 4. If ($\theta_{жс1}$ is $\theta_{жс1.4}$) then (G_{n1} is $G_{n1.4}$); | 4. If ($\theta_{жс2}$ is $\theta_{жс2.4}$) then (G_{n2} is $G_{n2.4}$); |
| | |
| 9. If ($\theta_{жс1}$ is $\theta_{жс1.9}$) then (G_{n1} is $G_{n1.9}$). | 9. If ($\theta_{жс2}$ is $\theta_{жс2.9}$) then (G_{n2} is $G_{n2.9}$). |

Количество правил равно количества термов по расходу пара.

Нечеткий алгоритм регулирования температуры потоков нефти с соответствующими правилами и лингвистическими переменными представлен в программе приложение 4.

Пространство управления, соответствующее правилам, выбранным ФП и принципу дефаззификации показано на рис. 5.10. Здесь: rate – скорость изменения потока нефти; temp – разность между заданной температурой и текущей; $g(t)$ – скорость перемещения задвижки.

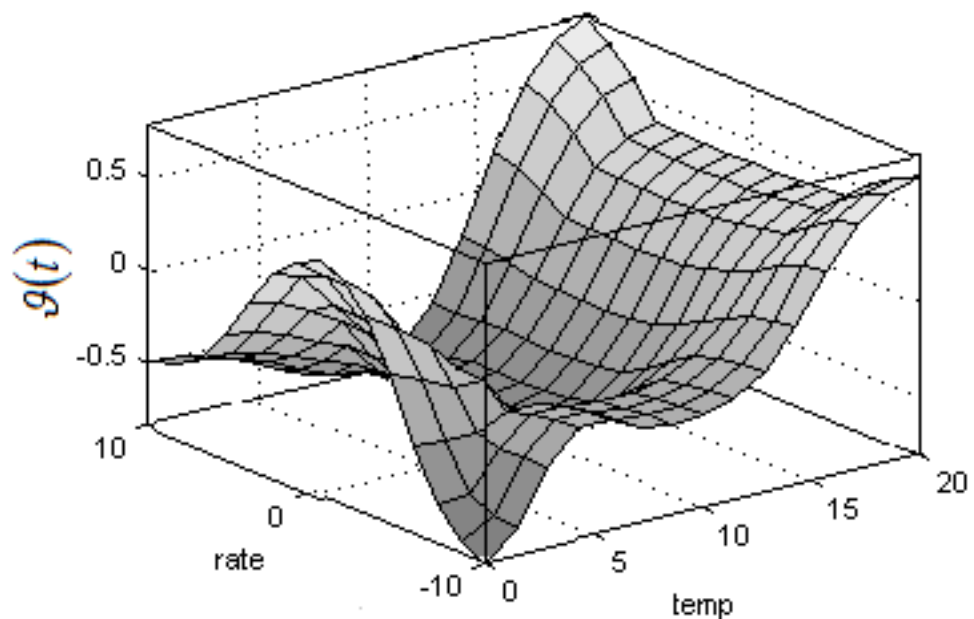


Рисунок 5.10 – Пространство управления фаззи-регулятора температуры нефти

Применение нечеткого алгоритма позволяет учесть основные параметры в режиме реального времени, а также регулировать степень открытия задвижки.

5.3 Адаптивная система управления с детерминированным звеном и нечетким регулятором в приложении Simulink пакета MatLab

Реализация технической разработки системы управления с детерминированным звеном и НР представлена на рисунке 5.11. Система контроля температуры ВСН, СВН и смешанной нефти состоит из трех уровней.

На нижнем уровне находятся датчики температуры, измеряющие температуру ВСН, СВН и смешанной нефти и задвижки, изменяющие подачу пара.

На управляющем уровне используется контроллер TREI. Контроллер получает данные от датчиков температуры и расхода нефти, пара, производит обработку и отправляет на рабочую станцию. Далее от нее он получает значение управляющего воздействия, применяемого к объекту. В контроллере производится широтно-импульсная модуляция управляющего воздействия и выдача этого сигнала на исполнительный механизм.

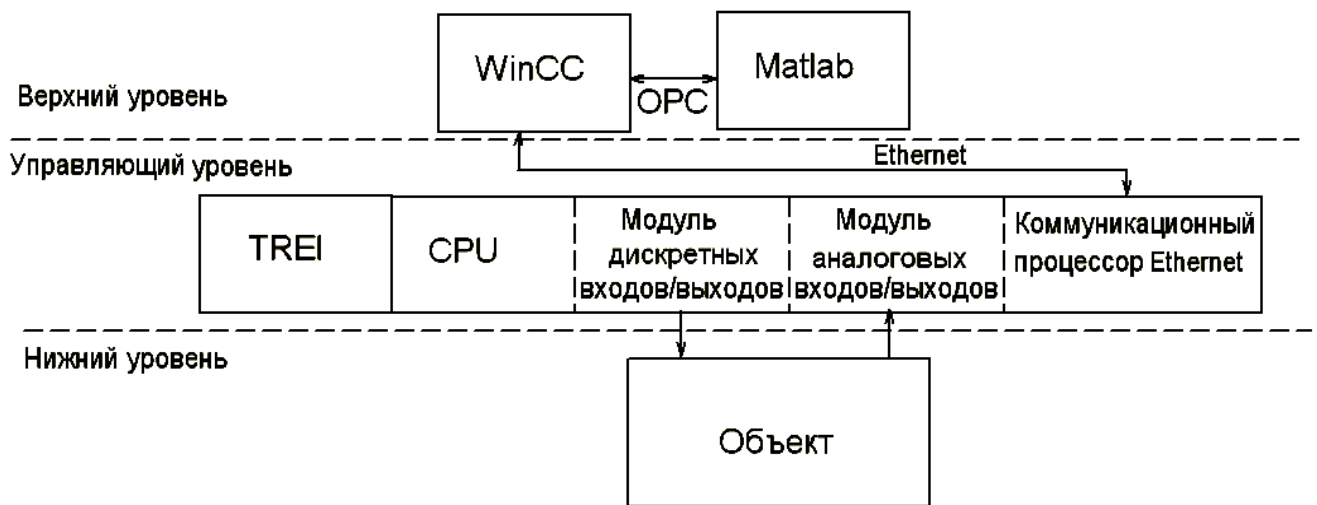


Рисунок 5.11 – Схема системы управления температурой потока нефти на основе нечеткой логики:

WinCC (Windows Control Center) – рабочая станция, OPC (OLE for Process Control)– связывание и встраивание объектов для управления процессом, Matlab - программа имитационного моделирования, Ethernet – локальная сеть, TREI – промышленный контроллер, CPU (central processing unit) – модуль процессора

На верхнем уровне находится рабочая станция WinCC и программное обеспечение Matlab, в котором реализован нечеткий алгоритм. Здесь взаимодействие происходит между рабочей станцией и Matlab через OPC-интерфейс посредством тегов. Рабочая станция передает данные о температуре и уставку по температуре в Matlab, где НР формирует значение управляющего воздействия, которое через рабочую станцию WinCC поступает в контроллер.

Эффективность разработанных алгоритмов была проверена на имитационной модели системы управления температурой потоков нефти. Для этого были проведены имитационные эксперименты. Полученный алгоритм представлен в виде диаграмм регулирования (Rules Viewer) на рисунке 5.12.

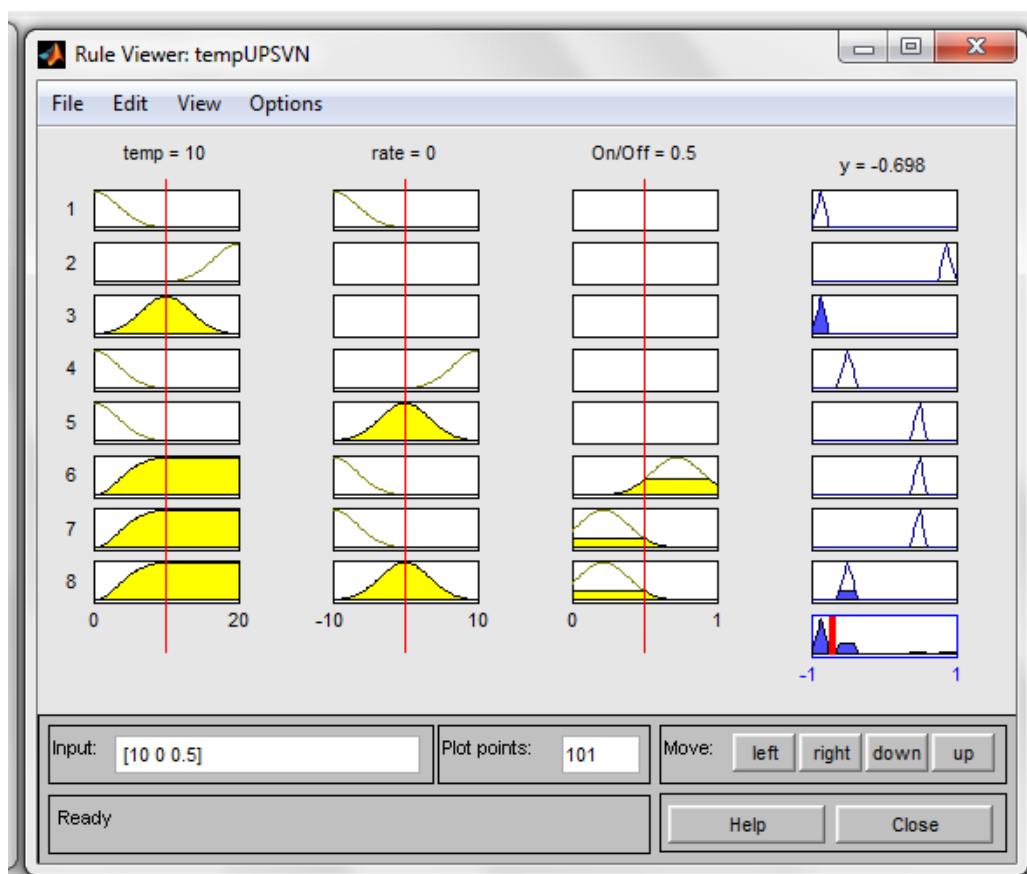


Рисунок 5.12 – Диаграмма регулирования

Из результатов экспериментов сделан вывод, что предлагаемый алгоритм управления температурой потоков нефти обеспечивает требуемое качество управления электроприводом задвижек по подаче пара в змеевики емкостей E_1 , E_2 .

Связь между контроллером TREY, промышленными компьютерами и станциями управления верхнего (второго уровня) уровня на базе совместимых персональных компьютеров осуществляется в большинстве случаев по сети Ethernet.

Стандартным механизмом взаимодействия программного обеспечения с контроллерами или устройствами ввода-вывода признан стандарт OPC (OLE for Process Control), который основан на объектной модели COM/DCOM фирмы Microsoft.

Поскольку адаптивная система управления с НР построена в приложении Simulink пакета MatLab, необходимо организовать связь между объектом, реализованным в программе, и станцией управления. Для этого нужно внести

следующие изменения в созданные программы: 1) Настройка связи контроллера – OPC; 2) Настройка связи Matlab – OPC; 3) Моделирование алгоритма в Matlab .

В программе станции управления необходимо добавить функциональные блоки для ввода и переменные ввода-вывода для приема-передачи сигналов, прописать связи между каналами ввода-вывода сигналов в редакторе связей, а именно: реализовать взаимосвязь между рассчитанным в модели значением параметра с сигналом датчика.

В программе Matlab на рисунке 5.13 добавлены OPC-блоки для передачи сигналов измерений (OPC-Write) и приема управляющих сигналов (OPC-Read), OPC-конфигуратор.

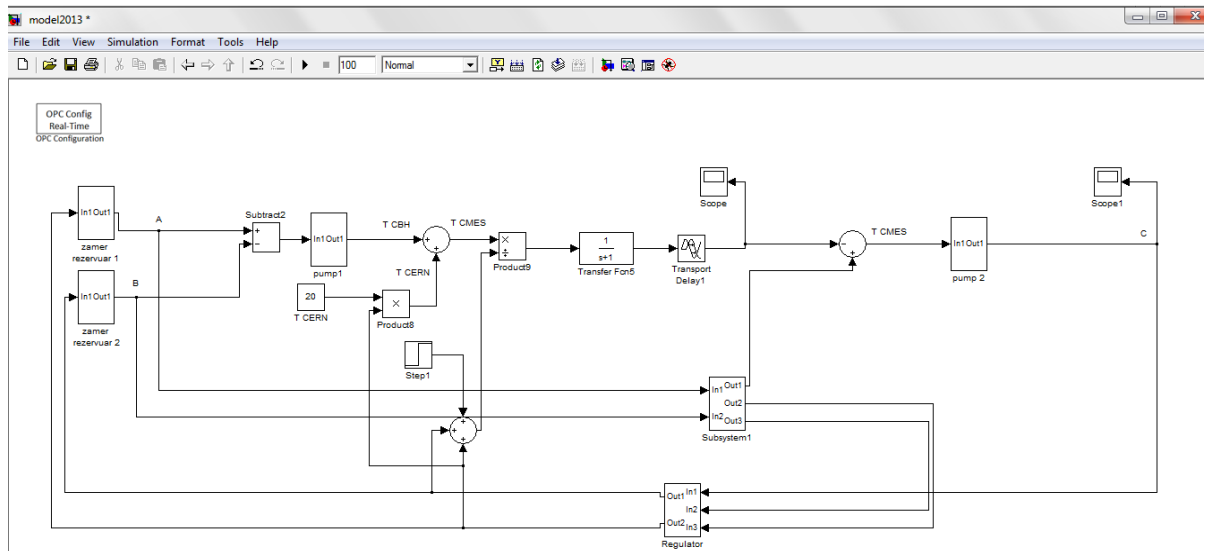


Рисунок 5.13 – Подключение математической модели по OPC к рабочей станции

Необходимо произвести настройку связи по V-net по протоколу OPC, запустить проект и убедиться, что связь между объектом и станцией управления установлена.

Результаты тестирования и оценки эффективности программных средств разработанной интеллектуальной системы представлен на рисунке 5.14 в виде отчета о прохождении тестирования математической модели регулирования температуры потоков нефти на основе нечеткой логики.

Summary

Model Hierarchy/Complexity:			Test 1
			D1
1. cmecitel1	1045	46%	
2. . . . Fuzzy regulator3	519	46%	
3. Fuzzy Logic Controller	513	46%	
4. FIS Wizard	513	46%	
5. Defuzzification1	1	50%	
6. Rule1	103	52%	
7. Rule2	103	50%	
8. Rule3	103	51%	
9. Subsystem1	6	83%	
10. . . . Fuzzy regulator4	519	46%	
11. Fuzzy Logic Controller	513	45%	
12. FIS Wizard	513	45%	
13. Defuzzification1	1	50%	
14. Rule1	103	52%	
15. Rule2	103	50%	
16. Rule3	103	50%	
17. Subsystem1	6	75%	
18. . . . zamer rezervuar	2	25%	
19. Subsystem	2	25%	

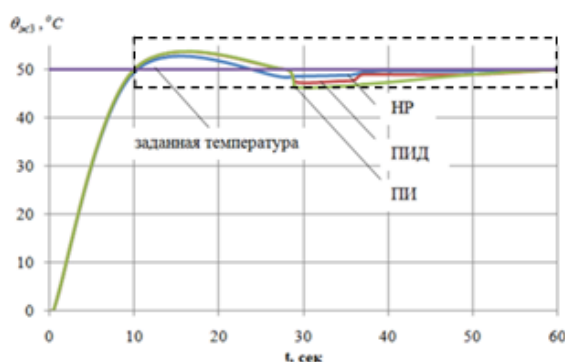
Рисунок 5.14 – Отчет о прохождении тестирования математической модели регулирования температуры потоков нефти на основе нечеткой логики

5.4 Результаты математического моделирования

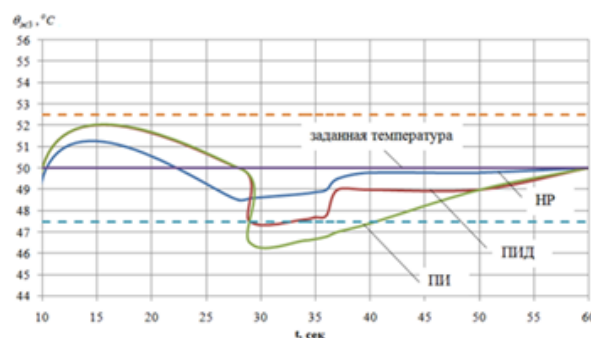
Результаты регулирования температурным режимом потока нефти по заданным законам регулирования приведены на рисунке 5.15. Результаты компьютерного моделирования технологического процесса температурной обработки и транспортировки потока нефти показали, что НР обеспечивает наименьшее отклонение температуры от заданного значения по сравнению с альтернативными (таблица 5.1). Максимальное перерегулирование ($t=30$ с.): для НР – 2,4%, для ПИД-регулятора – 4,8%, а для ПИ-регулятора – 6,8%. Время регулирования: для НР – 8 с., для ПИД-регулятора – 33 с., а для ПИ-регулятора – 41 с.

Таблица 5.1

	$\sigma_{cp}, \%$	$t_1 = 15 \text{ сек}$	$\sigma_1, \%$	$t_2 = 25 \text{ сек}$	$\sigma_2, \%$	$t_3 = 30 \text{ сек}$	$\sigma_3, \%$	$t_4 = 40 \text{ сек}$	$\sigma_4, \%$
НР	1,7	51,3	2,6	49,3	1,4	48,8	2,4	49,8	0,4
ПИД	3,05	52	4	50,7	1,4	47,6	4,8	49	2
ПИ	4,35	52	4	50,7	1,4	46,6	6,8	47,4	5,2



а)



б)

Рисунок 5.15 – Графики изменения температур потока нефти по заданным законам регулирования: а) полное амплитудное значение, б) выделенный фрагмент

Основываясь на определенных ограничениях временных характеристик известных процессов в системе управления с многоканальным и одноканальным регуляторами нечеткой логики производился сравнительный анализ динамических характеристик при использовании стандартного ПИД – регулятора и регулятора нечеткой логики при изменении статической ошибки. Результаты моделирования режима работы этих регуляторов приведены на рисунках 5.16 и 5.17.

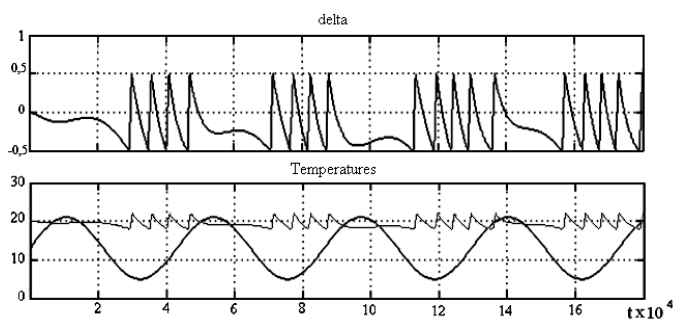


Рисунок 5.16 – Графики зависимости температуры в функции времени с ПИД-регулятором

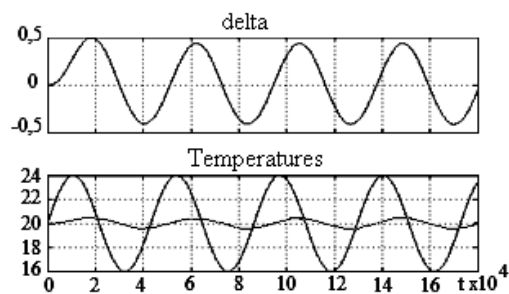


Рисунок 5.17 – Графики зависимости температуры в функции времени с регулятором нечеткой логикой

В результате математического моделирования процесса предварительной подготовки и транспортировки потока нефти получены графики зависимостей безразмерных величин во времени следующих параметров: $\bar{\theta}_{ж1}$ – температура потока нефти в емкости ВСН, $\bar{\theta}_{см1}$ – температура змеевика в емкости ВСН, $\bar{\varphi}$ – угол поворота задвижки, $\bar{U}_1$ – управление и $\bar{\theta}_{ж3}$ – регулируемая величина по температуре смешанной нефти. На линейный регулятор с запаздыванием вводится ограничение по отклонению.

При заданных тестовых возмущениях и с учетом времени запаздывания изменения температур, приведены зависимости отклонений от требуемой величины в безразмерных величинах на рисунках 5.18...5.21.

Результаты математического моделирования технологического процесса без учета возмущения приведены в приложении Г [38], где также приведены графики зависимостей тока в цепи статора и частоты вращения ротора насосов в функции времени.

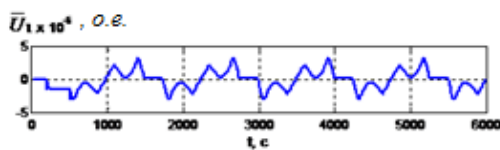


Рисунок 5.18 – График зависимости управления $\bar{U}_1$ в функции времени

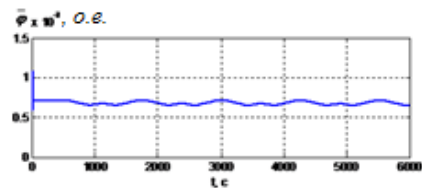


Рисунок 5.19 – Графики зависимости угла поворота $\bar{\varphi}$ задвижки Э31 в функции времени

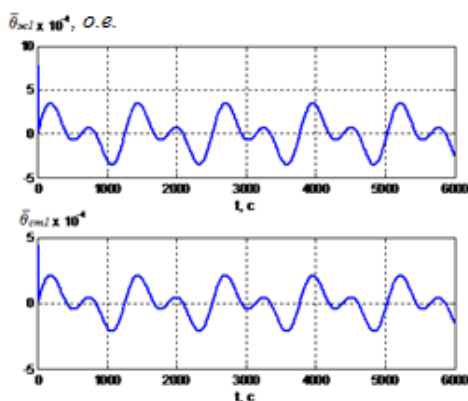


Рисунок 5.20 – Графики зависимости температуры ВСН $\bar{\theta}_{ж1}$ и змеевика $\bar{\theta}_{см1}$ в емкости ВСН в функции времени

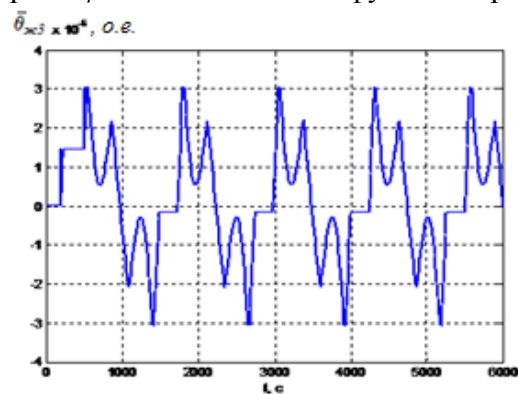


Рисунок 5.21 – График зависимости регулируемой температуры смешанной нефти $\bar{\theta}_{ж3}$ в функции времени

Из анализа рисунка 5.19 видно, что угол поворота задвижки не зависит от уровня напряжения электрической сети (рис.5.18), от температуры в емкости E_1 и

в промежутки времени переключения имеет устойчивый характер. Характер изменения температуры объема нефти в емкости E_1 за период является стабильным и имеет одинаковый закон изменения, повторяющий температуру змеевика в емкости E_1 (рис.5.20). Регулируемый параметр $\bar{\theta}_{жз}$ находится строго в диапазоне от $-3 \cdot 10^{-5}$ до $+3 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц и имеет циклический характер (рис.5.21).

На рисунках 5.22 и 5.23 приведены графики переходного процесса в емкости со смешанной нефтью и в контрольной точке. При перерегулировании в 1°C (соответствует перерегулированию 2,5%), требуемая температура в контрольной точке равна 11°C (установлена с учетом чистого запаздывания за 8 часов).

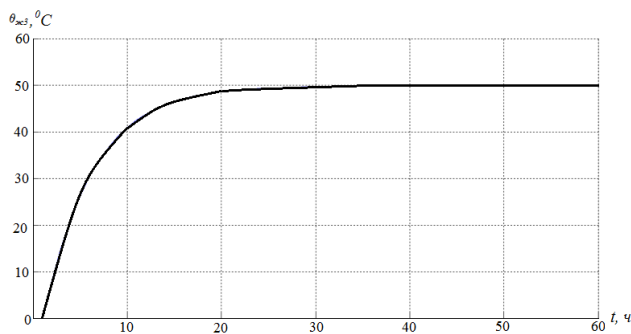


Рисунок 5.22 – График изменения температуры в емкости для смешанной нефти

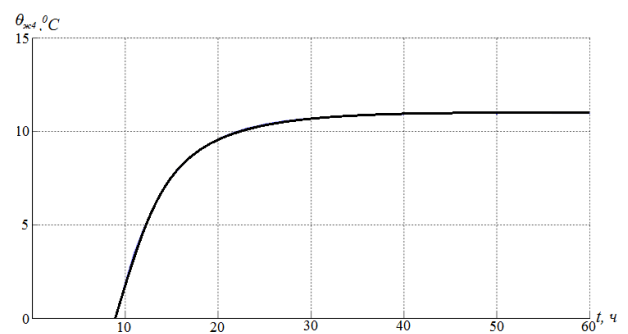


Рисунок 5.23 – График изменения температуры в контрольной точке С

По сравнению с существующей системой управления данная разработка позволяет обеспечить стабильную заданную температуру потока нефти и снизить энергетические затраты.

ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана структурная схема адаптивной системы автоматического управления по регулированию температурой потока смешанной нефти с идентификатором состояния.
2. Разработана нечеткая система, отличающаяся от известных обеспечением стабильного качества поддержания заданной температуры потока нефти в условиях некоторых неопределённостей и снижением энергозатрат и проанализированы результаты математического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе системного анализа иерархических структур первичной подготовки и транспортировки вязкой нефти разработана математическая модель этого процесса, функционально ориентированная на применение в системах управления в составе идентификатора состояния, содержащая в своей структуре новые расчётные блоки, учитывающие неопределенность при математическом моделировании из-за взаимного влияния температуры потока и вязкости нефти.

2. Разработана методика идентификации температурного режима потока смешанной нефти, позволяющая по непрерывным наблюдениям косвенных параметров с высокой достоверностью определять температуру потока в характерной заданной точке.

3. Разработан алгоритм управления температурой потоков нефти с использованием нечеткого регулятора, учитывающий неопределенный характер объекта управления и влияние на него глубоких внешних и внутренних возмущений.

4. Разработана автоматическая система управления процессом температурной обработки потока вязкой нефти, содержащая подсистему адаптивного автоматического управления температурой нефти с моделью-идентификатором состояния в контуре с НР, отличающаяся обеспечением стабильного качества стабилизации температуры потока нефти в условиях неопределенности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с. (Серия «Проблемы искусственного интеллекта»).
2. Адаптивные системы автоматического управления: учеб. пособие // В.Н. Антонов, А.М. Пришвин, В.А. Терехов, А.Э. Янчевский / Под ред. проф. В.Б. Яковлева. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. – 202 с.
3. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
4. Алексанкин Я.Я., Бржозовский А.Э., Жданов В.А. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления. Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 332с.
5. Алексеев Ф.Ф., Бородин В.М. К исследованию систем автоматического регулирования с несколькими нелинейностями. В кн.: Устойчивость и управление. Казань: Казанский авиационный институт, 1983. С. 59-67.
6. Алексеев Ф.Ф., Бильченко Г.Г., Бородин В.М. Теоремы об устойчивости управляемых систем. В кн.: Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением. Новосибирск: Наука, Сиб.отделение, 1991. С. 11-20.
7. Алексеев А.Ф., Алексеев Ф.Ф., Дегтярев Г.Л. Анализ и синтез нечетких систем управления с запаздыванием и импульсами. Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. 2012. № 2. С. 274-281.
8. Алиев Р.А., Захарова Э.Г., Ульянов С. В Нечеткие модели управления динамическими системами // Итоги и техники. Сер. Техническая кибернетика.-М.: ВИНТИ, 1990.-Т.29.-С.127-201.
9. Алиев Р.А., Захарова Э.Г., Ульянов С.В. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные промышленные системы управления // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1991. – Т. 32. – с. 233-313.

10. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Ред.: В.Н. Вагин, В.И. Петухова. – М.: Энергомиздат, 1991. – 240 с.
11. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
12. Алтунина Л.К. Кувшинов В.А., Кувшинов И.В., Алабушин А.А., Урсегов С.О. Технологии увеличения нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей физико химическим и паротепловым воздействием // Нефть. Газ. Новации. – 2012. - №8. С. 33-38.
13. Анализ нечетких систем управления методом гармонической линеаризации / Б.Г. Ильясов, Р.А. Мунасыпов, О.В. Даринцев, Л.П. Челушкина // Сборник трудов конференции по теории управления, посвященной памяти академика Б.Н.Петрова. Москва. 2003.
14. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1976. – 424 с.
15. Антониади Д.Г. Научные основы разработки нефтяных месторождений термическими методами. –М.: Недра, 1995. – 95с.
16. Афонин В.В. Моделирование систем: Учебно-практическое пособие / В.В. Афонин, С.А. Федосин. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 231 с.
17. Батыршин И.З., Недосекин А.О., Стецко А.А., Тарасов В.Б., Язенин А.В., Ярушкина Н.Г. Нечеткие гибридные системы: Теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. – М.: Физматлит, 2007. – 208 с.
18. Бессекерский В.А., Небывалов А.В. Робастные системы автоматического управления. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 240с.
19. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В., Слядзь Н.Н., Глушков В.И. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.

20. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Системный анализ и управление». Изд. 2-е, перераб. И доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 512 с.

21. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.

22. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение \ Под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.

23. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере / Отв. ред. В.И. Быков. – Новосибирск: Наука, 1996. – 276 с.

24. Горбунов А.В., Каменецкий В.А. Метод функций Ляпунова для построения областей притяжения систем с запаздыванием. Автоматика и телемеханика. 2005. Вып. 10. С. 42-53.

25. Горшкова К.Л. «Анализ развития и современный технический уровень в нефтяной промышленности» Информационное пространство современной науки: материалы Международной заочной научно-практической конференции. - г. Чебоксары: ЧОУ «Центр Интеллект», 2010. -с. 280-281.

26. Горшкова К.Л. «Измерение количества и качества высоковязкой нефти в трубопроводах» Молодая наука России: вопросы теории и практики: Материалы международной научно-практической конференции.-г.Волгоград: ООО «Волгоградское научное издательство», 2010.-С.76-77.

27. Горшкова К.Л. «К вопросу о применении нечеткой логики (на примере нечетких регуляторов в АСУТП)» Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов III Международной научно-практической конференции: в 2-х частях. Часть 2/Под общ. ред. С.С. Чурнова. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. с. 60-65.

28. Горшкова К.Л. «Применение нечеткой логики и нечетких регуляторов в АСУТП» Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. Том IX. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2011. – с. 180-184.

29. Горшкова К.Л. «Применение нечетких регуляторов в АСУТП» Материалы научной сессии ученых. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2011. с. 134-137.

30. Горшкова К.Л., Садыков А.Р., Фархутдинов Л.Ф. «Применение нечеткой логики в управлении системами на примере регулирования динамического уровня жидкости в емкости» Научно-технический вестник Поволжья. №5 2011г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. - с. 102-110.

31. Горшкова К.Л., Садыков А.Р., Якупов А.Р. «Установка для поверки скважинных термометров с использованием нечеткой логики» Научно-технический вестник Поволжья. №6 2011г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. - с. 142-145.

32. Горшкова К.Л. «Анализ измерения расхода высоковязкой и битумной нефти» Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции (17-18 ноября 2011г.) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – с. 164-167.

33. Горшкова К.Л., Богданов Х.У., «Проектирование нечетких регуляторов для объектов управления с запаздыванием» Региональная научно-практическая конференция «Научная сессия ученых АГНИ», 2012. – с. 153-155.

34. Горшкова К.Л., «Применение нечеткой логики для регулирования температуры жидкости в емкости» Ученые записки. г. Альметьевск: АГНИ, 2012. – с. 193-196.

35. Горшкова К.Л. «Синтез нечеткого регулятора для объекта управления с чистым запаздыванием» Наука и современность – 2012: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции: в 4-х частях. Часть 1 / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2012. – с. 97-102.

36. Горшкова К.Л. «Система управления температурой с нечеткими регуляторами» IX Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения» посвященной 100-летию Аширова К.Б., 2012. – с. 86-87.

37. Горшкова К.Л. «Разработка интеллектуальной системы управления на базе нечетких алгоритмов // Молодежная научно-практическая конференция

молодых работников ОАО «Татнефть» посвященной 50-летию НГДУ «Елховнефть»: – Альметьевск. 2012. – с. 112-114.

38. Горшкова К.Л. Математическая модель тепловых процессов объекта смешивания сверхвязкой и высокосернистой нефти с дальнейшей транспортировкой / Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Алексеев А.Ф., Алексеев Ф.Ф. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – №3 – С. 184-195.

39. Горшкова К.Л. Синтез нечетких алгоритмов управления на основе метода векторных функций Ляпунова для систем с запаздыванием / Алексеев А.Ф., Алексеев Ф.Ф., Дегтярев Г.Л. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – №2, вып. 1 – С. 174-184.

40. Горшкова К.Л. К построению оценок областей устойчивого функционирования систем управления с учетом запаздывания / Алексеев Ф.Ф., Широков П.С. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – №2, вып. 1 – с. 74-84.

41. Горшкова К.Л. Разработка математической модели технологического процесса предварительной подготовки сверхвязкой нефти и смешивания её с высокосернистой нефтью с дальнейшей транспортировкой / Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В. // Экология и нефтегазовый комплекс. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Атырауский институт нефти и газа, г. Атырау, РК, 2013. С.463-468.

42. Горшкова К.Л. Анализ оптимальной системы управления при неполных измерениях для динамических объектов // Региональная научно-практическая конференция «Научная сессия ученых АГНИ» – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2014. – С. 34-38.

43. Горшкова К.Л. Синтез нечетких нейрорегуляторов для систем управления сложными объектами с применением динамических сетей и генетических алгоритмов / Алексеев А.Ф., Широков П.С. // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014г.: Труды. [Электронный ресурс] М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С.1937-1945.

43(a). Горшкова К.Л. Снижение энергетических затрат при первичной

подготовке и транспортировке нефти на основе системного анализа общей структуры производства /Тбачникова Т.В. // Ученые записки АГНИ: – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. 2015. Т.ХІІІ. №-1. С. 292-306.

44. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416с.

45. Громова П.С. Метод векторных функций Ляпунова для систем с отклоняющимся аргументом. В кн.: Прямой метод в теории устойчивости и его приложения. Новосибирск: Наука, С. 46-54.

46. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

47. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах // учебн. пособие МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: – 2005. – 198 с.

48. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. – 400с.

49. Дьяконов А.П., Круглов В.В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2+Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: СОЛОН-Пресс, 2006. 456с.

50. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей: Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с франц. В.Б. Тарасова под ред. С.А. Орловского. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

51. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его приложения в экономике и бизнесе. – М.: Изд-во МИФИ, 1998. – 224 с.

52. Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.

53. Живоглядов В.П. Адаптивное и оптимальное управление динамическими системами: Сб. статей / АН Кирг. ССР. – Бишкек: Илим, 1991. – 218 с.

54. Заде Л. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // В сб.: Математика сегодня: Пер. с англ. – М.: Знание, 1974. – с. 5-12.

55. Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // В сб.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений / Под ред. И.Ф. Шахнова, с предисл. Г.С. Поспелова. – М.: Мир, 1976. – с. 172-215.

56. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Пер. с англ. Н.И. Ринго под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. М.: Мир, 1976. – 166с.

57. Згуровский М.З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования // учебн. пособие для вузов. – Киев:Вища школа, 1900.–350 с.

58. Зоря Е.И., Зенин В.И., Никитин О.В., Прохоров А.Д. Ресурсосберегающий сервис нефтепродуктообеспечения. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 448 с.

59. Использование нечеткой адаптивной системы управления для компьютерного мониторинга сетью котельных установок / Михайленко В.С., Никольский В.В. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 2(20). – с. 20-27.

60. Катков М.С. Непрервные системы адаптивного управления с идентификаторами. – М.: Изд-вщ МПИ «Мир книги», 1992. – 385 с.

61. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

62. Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина: Пер. с англ. П.П. Кольцова под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1980. – 389 с.

63. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. – М.: Энергия, 1974. – 135 с.

64. Клыков Ю.И. Семиотические основы ситуационного управления. учеб. пособие. – М.: МИФИ, 1974. – 171 с.

65. Кокорев В.И. «Инновационный подход к разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти». Нефтяное хозяйство. – 2009. – №8. С. 58-59.
66. Колязов К.А. «Система управления энергозатратами для технологических процессов на основе нечетких алгоритмов». Диссертация на соискания ученой степени кандидата наук. – Мелеуз, 2010. – 171 с.
67. Квакернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. Издательство «Мир» Москва, 1977. – с. 638.
68. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. С предисл. Л.А. Заде: Пер. с франц. В.Б. Кузьмина под ред. С.И. Травкина. С предисл. М.А. Травкина. С предисл. М.А. Айзермана. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
69. Круглов В.В., М.И. Дли, Р.Ю. Голупов. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. — М.: Физматлит, 2000. — 224 с.
70. Кудинов Ю.И., Дорохов И.Н., Пашенко Ф.Ф. Нечеткие регуляторы и системы управления. ИПУ им. В.В. Трапезникова. – М.: 2006. -19 с.
71. Кузьмин В.Б. Построение групповых решений в пространстве четких и нечетких бинарных отношений. – М.: Наука, 1982. – 168 с.
72. Курдюков А.П. Основы робастного управления: Учеб. пособие / Под. ред. К.А. Попкова; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ, 1995. – 50с.
73. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736с.
74. Лукас В.А. Введение в Fuzzy-регулирование. – Екатеринбург: Изд-во УТГГА, 1997. – 36 с.
75. Лурье Б.Я., Энрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления / под ред. А.А. Ланнэ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
76. Лурье М.В, Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Учебное пособие. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.

77. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования: Пер. с англ. Ю.В. Тюменцева и Ю.Т. Каганова под ред. Ю.В. Тюменцева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с. – (Серия «Адаптивные и интеллектуальные системы»)
78. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
79. Максutow Р., Орлов Г., Осипов А. Освоение запасов высоковязких нефтей в России // Технологии ТЭК. – 2005. - №6. С. 36-40.
80. Малышев Н.Г., Бернштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергомиздат, 1991. – 136 с.
81. Мееров М.В., Дианов В.Г. Теория автоматического регулирования и авторегуляторы. Гостоптехиздат, М., 1963 г. с.264.
82. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
83. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости. Под ред. А.А.Воронова, В.М.Матросова. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1987. 312 с.
84. Метрология, стандартизация и сертификация. Методические указания по проведению практических занятий. Булатов Р.Б., Анохина Е.С., Ситдикова И.П. – Альметьевск: АГНИ, 2009. – 100 с.
85. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти томах: 2-е изд. перераб. и доп. Т. 2: Статическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 460 с.
86. Нечеткие множества и теория возможностей: Последние достижения / под ред. Р.Р. Ягера: Пер. с англ. В.Б. Кузьмина под ред. С. И. Травкина. М.: Радио и связь, 1986. – 480 с.
87. Новак В., Перфильева И., Мочкорж И. Математические принципы нечеткой логики: Пер. с англ. под ред. А.Н. Аверкина. М.: Физматлит, 2006. – 352 с.

88. Новые методы управления сложными системами. – М.: Наука, 2004. – 333с.

88а. Нурбосынов Д.Н. Методы расчетов и математическое моделирование режима напряжения и электропотребления в установившихся и переходных процессах: Монография. – СПб.: Электромиздат, Санкт-Петербургское отделение, 1999г, 214с.

89. Овчаров Л.А., Битюков В.С., Волков В.М., Юдовский О.В., Молотков Г.П., Кучин Б.Л., Куроптева И.С. Математические модели информационных процессов и управления: Учеб. для вузов. – М.: ОАО «Издательство «Недра»», 2001. – 247 с.

90. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990. – 256с.

91. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления.- СПб.; Невский Диалект, 2001.- 557С.

92. Орлов А.И. Задачи оптимизации и нечеткие переменные. – М.: Знание, 1980. – 64 с.

93. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.

94. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.

95. Перспективы воспроизводства сырьевой базы тяжелых нефтей и природных битумов Республики Татарстан / Б.В. Успенский, А.С. Борисов, М.Я. Боровский, С.И. Петров, Е.Г. Фархутдинов // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – №8 (81). С.6–10.

96. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. – М.: Наука, 1980. 430 с.

97. Позняк А.С. Основы робастного управления: Учеб. пособие / Моск. физ.-техн. ин-т. – М.: МФТИ, 1991. – 128 с.

98. Потемкин В.Г. Система MATLAB. Справочное пособие / Пакет программ Robust Control Toolbox. М.: Диалог-МИФИ, 1997. – 350с.
99. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 281 с.
100. Поспелов Д.А. Большие системы (ситуационное управление). – М.: Знание, 1975. – 64 с.
101. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи и М. Сугэно: Пер. с япон. Ю.Н. Чернышова. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
102. Пытьев Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности: Математические и эмпирические основы, применения. – М.: Физматлит, 2007. – 464 с.
103. Рабочий проект. Система контроля и управления объектами АМ природных битумов скважины» - 2008г. – 160 с.
104. Рабочий документ 153-39.0-746-11 Инструкция по безопасному проведению опытно-промышленных работ по добыче сверхвязкой нефти методом парогравитационного воздействия на пласт. Институт «ТатНИПИнефть». Бугульма – 2011. – 100 с
105. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. – СПб: СЗГЗТУ – 2006. – 186 с.
106. Романенко В.Д. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ. Учебное пособие по спец. «Автоматизация технологических процессов и производств». – Киев: Вища школа, 1990. – 333с.
107. Ротач В.Я. Экспертная оценка алгоритмов управления методами нечеткой логики и теории вероятностей // Теплоэнергетика, 2002. - №4. – с. 51-56.
108. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
109. Синтез оптимальных систем управления с наблюдателем состояния. В.Д. Волков, С.А. Токарева. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №3. с.43-45.

110. Семенова Д.В. Нечеткие множества: теория и практика: учеб. пособие / Д.В. Семенова; Федерю Агенство по образованию, Красноярский гос. университет, 2006. – 245 с.
111. Сигеру О., Марзуки К., Рубия Ю. Нейроуправление и его приложения: Пер. с англ. Н.В. Батина под общ. ред. А.И. Галушкина и В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
112. Сироджа И.Б., Соколов А.Ю., Калинин В.В. Иерархические интеллектуальные системы управления с нечеткой логикой// Системный анализ, управление и информационные технологии: Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Вып. 70. Харьков: ХГПУ, 1999.-С.187-193.
113. Современные методы идентификации систем: Пер. с англ. / Под П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400с.
- 113(a). Солодянникова Ю.В. «Моделирование, идентификация и управление по системным критериям качества ионообменными процессами водоподготовки» Диссертация на соискания ученой степени кандидата наук. – Самара, 2013. – 166с.
114. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
115. Стальский В.В., Проскуряков Р.М. Нечеткая логика и ее применение в автоматическом регулировании. - СПб.: СПГИ, 1998. – 94 с.
116. Трахтенгерц Э.А., Степин Ю.П., Андреев А.Ф. Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности. – М.: СИНТЕГ, 2005 – 592 с.
117. Теория систем автоматического управления / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.
118. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов/А.С.Востриков, Г.А.Французова. – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.
119. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.

120. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа: Учеб. пособие / С.А. Ахметов, М.Х. Ишмияров, А.П. Вережки; Под ред. С.А. Ахметова. – М.: Химия, 2005. – 736 с.

121. Технологический регламент установки подготовки сверхвязкой нефти Ашальчинского месторождения. Документ разработан Татарским научно-исследовательским и проектным институтом нефти (ТатНИПИнефть). В.М. Валовский, Р.З. Сахабутдинов, Р.А. Сафиуллин. – Бугульма. 2007 г. – 71 с.

122. Технологический регламент установки предварительного сброса воды (упсв-7) «Ашальчи» НГДУ «Нурлатнефть». ОАО «Татнефть» Нефтегазодобывающее управление «Нурлатнефть». С.С. Гафиятуллин, Р.К.Хасанов, Р.Х. Язданов, Р.А. Галеев, А.Ф. Шигапов, Р.Р.Ахмадуллин. – Бугульма. 2009 г. – 64 с.

123. Тимофеев А.В. Построение адаптивных систем управления программным движением. – Л.: Энергия, 1980. – 300 с.

124. Ткачев Р.Ю. Транспортное запаздывание технологических процессов как объект исследований. Электроника и системы управления. 2012. №2(32) с.57-61.

125. Фокин А.Л. Робастное управление технологическими процессами: Учеб. пособие / А.Л. Фокин, В.В. Сыроквашин, П.А. Бороздин. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007. -201 с.

126. Фомин А.М., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. -447 с.

127. Хазаров В.Г. Интегрированные системы управления техническими процессами – СПб: Профессия, 2009. – 592 с.

128. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс: Пер. с англ. Н.Н. Куссуль и А.Ю. Шелестова под ред. Н.Н. Куссуль. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

129. Хо Дак Лок «Синтез адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии». Диссертация на соискание доктора технических наук. – Москва, 2002. – с. 237.

130. Чернов В.Г. Нечеткие множества в задачах управления и принятия решений: текст лекций / В.Г. Чернов: Мин-во общ. и проф. образования РФ, Владимирской. гос. ун-т, 1999. – 85 с.
131. Шапиро Д.И. Принятие решений в системах организационного управления: Использование расплывчатых категорий. – М.: Энергомиздат, 1983. – 184 с.
132. Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Шаврон В.С., Носков А.С. Механика жидкости и газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464с.
133. Щербаков А.З. Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов с подогревом. – М.: Недра, 1981 – 220с.
134. Эрриот П. Регулирование производственных процессов. Пер. с англ., М., «Энергия», 1967. – 480с.
135. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
136. Ядыкин И.Б., Шумский В.М., Овсепян Ф.А. Адаптивное управление непрерывного технологическими процессами. – М.: Энергомиздат, 1985. – 240с.
137. Якуцени В.П., Петрова Ю.Э., Суханов А.А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007 (2). – С.1-11.
138. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. – 2-е изд., испр. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 316 с.
139. Anderson B. A simplified viewpoint of hyperstability/ IEEE Transactions on Automatic Control, 1968 – №13, p.292-294
140. Babuska R., Verbuggen H.B. A new identification method for linguistic fuzzy models. Proceedings of the International Conference FUZZ- IEEE/IFES'95. Yokohama, Japan, 1995. p. 905-912.

141. Baldwin J.F. Fril method for soft computing, fuzzy control and classification. Proceeding of the International Conference FUZZ-IEEE/ IFES'95, vol.1. Yokogama, Japan, p. 309-316.
142. Bartolan G., Pedrycz W. Reconstruction problem and information granularity. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1997 – vol.5, №2, p.234-248.
143. Beigy H., Eydgahi A.M. Fuzzy modeling of two-dimensional linear systems. Proceedings of the International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR'95, vol.2. Miedzyzdroje, Poland, p.775-780.
144. Cao S.G., Rees N.W., Feng G. Analysis and design for a class of complex control systems. Part I: Fuzzy modeling and identification. Automatica, vol. 33, №6, 1997 a. pp. 1017-1028.
145. Cao S.G., Rees N.W., Feng G. Analysis and design for a class of complex control systems. Part II: Fuzzy modeling and identification. Automatica, vol. 33, №6, 1997 b. pp. 1029-1039.
146. Cao Y.-Y., Frank P.M. Stability and synthesis of nonlinear time-dlay systems via linear Takagi-Sugeno fuzzy models. Fuzzy Sets and Systems. 124 – 2001. p. 213-229.
147. Carpenter G.A., Grossberg S., Markuzon N., Reynolds J.H., Rosen D.B. Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. IEEE Transactions on Neural Network, vol.3, №5, 1992. p.698-713.
148. Chen C.L., Wang S.N., Hsieh C.T., Chang F.Y. Theoretical analysis of a fuzzy-logic controller with unequallyspaced triangular membership functions // Fuzzy Sets and Systems. 1999. – № 101. p. 87-108.
149. Culliere T., Titli A., Corrieu J.M. Neuro-fuzzy modeling of nonlinear systems for control purposes. Proceedings of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES' 95, – vol.4. Yokohama, Japan, p.2009-2016.
150. Eklund P., Klawonn F. Neural fuzzy logic programming. IEEE Transactions on Neural Network, – vol.3, №5, 1992. p.815-818.

151. Fischle K., Schroder D. Sfabile adapfve Furry- Regelung ohne Differenfiafion der Regelgrosse. Automafisierungsechnik, - vol. 45, №8, 1997. pp.360-367.
152. Fuzzy Logic Motor Control with MSP430x14x.Aplication Report. Texas Instruments, Inc., 2005. – 10-17c.
153. Fuzzy Logic Toolbox. For Use with MATLAB: User's Guide. - Natick: The MathWorks, Inc., 1998. - 235 p.
154. Gorrini V., Salome T., Bersini H. Self-structuring fuzzy systems for function approximation. Proceedings of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 2. Yokohama, Japan, pp. 919-926.
155. Hathaway R.J., Bezdek J.C., Pedrycz W. (1996) A parametric model for fusing heterogeneous fuzzy data. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol.4, №3, pp.270-281.
156. Hauptmann W., Heesche K. A neural net topology for bidirectional fuzzy-neuro transformation. Proceedings of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 3. Yokohama, Japan, pp. 1511-1518.
157. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. Tuning fuzzy controllers by genetic algorithms // Internat. J. Approx. Reasoning. 1995. № 1. p. 299-315.
158. Ishibuchi H., Fujioka R., Tanaka H. (1993) Neural networks that learn from fuzzy if-then. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol.1, №2, pp.85-97.
159. Kandel A., Langholz G. (1994) Fuzzy Control Systems. London: CRC Press. adaptive learning control network. IEEE Transactions on Neural Networks, vol.7, №7 pp.709-731.
160. Lim J.T. Absolute stability of class of nonlinear plants with fuzzy logic controllers // Electronic letters. № 28. 1992. p. 1968-1970.
161. Lofti A., Howarth M., Thomas P.D. (1996) Non-interactive model for fuzzy rulebased systems. Proceedings of the International Conference EUFIT'96, vol.1 Aachen, Germany, pp.597-601
162. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proceedings IEEE, № 121, 1974. pp. 1585-1588.

163. Mamdani E.H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. – International Journal of Man-Machine Studies, vol. 8, 1976, pp. 669-678.
164. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Transactions on Computers, vol/ C-26, № 12, 1977. pp. 1182-1181.
165. Murata T., Ishibuchi H. Adjusting membership functions of fuzzy classification rules by genetic algorithms. Proceeding of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 4. Yokohama, Japan, pp. 1819-1824.
166. Narazaki H., Shigaki I., Watanabe T. A method for extracting approximate rules from neural networks. Proceedings of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 4. Yokohama, Japan, pp. 1865-1870.
167. Nelles O., Ernst S., Isermann R. (1997) Neuronale Netze zur Identifikation nichtlinearer, dynamischer Systeme: Ein Überblick. Automatisierungstechnik, vol.45 №6, pp. 251-261.
168. Nobre. Genetic-neuro-fuzzy systems: a promising fusion. Proceedings of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 1. Yokohama, Japan, 1995. pp. 259-266.
169. Piegat A., Jaszczak S., Plucinski M. Selflearning neuro-fuzzy PID controller without simplifications. Proceedings of the International Symposium on Method and Models in Automation and Robotics MMAR'96 vol.3. Miedzyzdroje, Poland, 1996. pp. 1195-1200.
170. Ray K.S., Majumder D.D. Application of circle criteria for stability analysis of linear SISO and MIMO systems associated with fuzzy logic controller // IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics. SMC-14. 1984. p. 345-349.
171. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. – McGraw-Hill, 1995. – p. 600.
172. Serac A., Rofh., Gardus V. (1996) Adaptive fuzzy controller for a MIMO system. Proceedings of the International Conference EUFIT 96, vol.2. Aachen, Germany, pp.901-905.

173. Simpson P.K. Fuzzy min-max neural networks – part 1: classification. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 1, №1, 1992. pp. 32-45.
174. Sousa J., Babuska. R., Verbruggen H. B. (1995) Adaptive model-based control. Proceedings of the International Conference EUFIT95, vol.2. Aachen, Germany, pp.865-869.
175. Successful Application of Fuzzy Logic and Fuzzy Control (Part 1) Preiffer B.M., Jakel J., Kroll A., Kuhn C., Kuntze H.B., Lehmann U., Slawinski T., Tews V. // Automatisierungstechnik. 2002. № 10. (50) P. 461-471.
176. Successful Application of Fuzzy Logic and Fuzzy Control (Part 1) Preiffer B.M., Jakel J., Kroll A., Kuhn C., Kuntze H.B., Lehmann U., Slawinski T., Tews V. // Automatisierungstechnik. 2002. № 11. (50) P. 511-521.
177. Takagi N., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 15, no. 1, 1985, pp. 116-132.
178. Tomescu M.-L., Preitl S., Precup R.-E., J.K.Tar. Stability analysis Method for fuzzy Control Systems Dedicated Controlling Nonlinear Processes. Acta Polytechnica Hungarica. V. 4. No. 3. 2007. Pp. 127-141.
179. Wallace R. and Freuder E. Anytime Algorithms for Constraint Satisfaction and SAT Problems. Paper presented at the IJCAL-95 Workshop. 1995 – P. 63-69.
180. Wang L.X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems // IEEE Trans. Fuzzy Systems 1993. №1 (2). P.146-155.
181. Yao C.C., Kuo Y.H. A fuzzy neural network model with three-layered structure. Proceeding of the International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, vol. 3. Yokohama, Japan, 1995. pp. 1503-1510.
182. Zadeh L.A. Fuzzy logic. – IEEE Transactions on Computers, vol. 21, no. 4, 1988, pp. 83-93.
183. Zadeh L.A. Fuzzy Sets // Inform. And Control, 1965.-№8.– p. 338 – 353.

Ожидаемый годовой экономический эффект по принятым организационно-техническим мероприятиям

Фактический режим при температуре потока нефти 20С ⁰ за смесителем, а в конце трубопровода 5 С ⁰ - вариант - I			
$P_{I,дог.20} = 79,2 \text{ кВт}$	$Q_{I,20} = 65 \text{ кВАр}$	$S_{I,20} = 94 \text{ кВА}$	$\cos\varphi_I = 0,843$
Предлагаемый режим при температуре потока нефти 55С ⁰ за смесителем, а в конце трубопровода 15 С ⁰ - вариант - II			
$P_{II,дог.55} = 66,686 \text{ кВт}$	$Q_{II,55} = 18,4 \text{ кВАр}$	$S_{II,55} = 69 \text{ кВА}$	$\cos\varphi_{II} = 0,93$
Вариант I		Вариант II	
Годовой расход электрической энергии, кВтч:			
$W_I = 30712560$		$W_{II} = 29909956$	
Экономия электрической энергии: $\Delta W = W_I - W_{II} = 802604 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.			
Затраты за использование электрической энергии, руб.:			
$C_{эI} = 12m_1P_{I.дог.50} + m_2W_I = 233 \text{ 160}$		$C_{эII} = 12m_1P_{II.дог.60} + m_2W_{II} = 180 \text{ 698}$	
где $m_1=1029,885 \text{ руб./кВт}$ – основной тариф; $m_2=0,18485 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$ – дополнительный тариф двухставочного тарифа на 15.06.2012г.			
Капитальные затраты, руб.:			
$K_I = 0$		$K_{II} = 8515,30$	
$E_n K_I = 0$		$E_n K_{II} = 2555$	
Приведенные затраты, руб.:			
$З_I = [E_n * K_I + C_{эI}] = 233 \text{ 160}$		$З_{II} = [E_n * K_{II} + C_{эII}] = 183 \text{ 252}$	
Ожидаемый годовой экономический эффект по двум насосам для транспортировки потока нефти: $\mathcal{E}_r = (З_I - З_{II}) * 2 = 99 \text{ 815 руб.}$			

Ожидаемый годовой экономический эффект по двум насосам для транспортировки нефти около 100 тыс. руб.

Срок окупаемости предлагаемого проекта: $T = \left| \frac{\Delta K}{\Delta C} \right| = 2 \text{ месяца.}$

Приложение 2

Физико-химические свойства сырой ВСН в соответствии с нормативно-технической документацией

Таблица 1

№ п/п	Наименование сырья, материалов, реагентов, изготавливаемой продукции	Номер государственного или отраслевого стандарта технических условий, стандарта организации	Показатели качества, обязательные для проверки	Норма по ГОСТ, ОСТ, СТП, ТУ (заполняется при необходимости)	Область применения изготавливаемой продукции
1	2	3	4	5	6
1.	Сырая нефть	Не стандартизирована	1. Плотность, кг/м ³ при 20°С при 40°С при 60°С	916 902 888	Откачивается на УПСВ-5 «Кутема»
			2. Массовая доля воды, %	до 2	
			3. Массовая концентрация хлор. солей, мг/дм ³	до 20000	
			4. Массовая доля мех. примесей, %	до 1	
			5. Массовая доля серы, %	до 5	
			8. Массовая доля смол, %	до 30	
			9. Массовая доля парафина, %	до 6	
			10. Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт) при 20°С при 50°С	52,39 24,88	
			11. Выход фракций, % до 200°С до 300°С	16,1 31,5	
			12. Давление насыщенных паров, кПа	до 100	

Продолжение приложения 2

Сырьём установки является продукция скважин Ашальчинского месторождения сверхвязкой нефти (пермские отложения). Готовой продукцией установки является товарная сверхвязкая нефть, соответствующая III группе качества по ГОСТ Р 51858-2002. Физико-химические свойства сырья и товарной сверхвязкой нефти приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-химические свойства сырья и товарной сверхвязкой нефти

Наименование показателя	Значение показателя сырья	Значение показателя товарной сверхвязкой нефти	Метод определения
1	2	3	4
1 Массовая доля воды, %	до 80	1,0	ГОСТ 2477-65
2 Массовая концентрация хлористых солей, мг/дм ³ , не более	-	900	ГОСТ 21534-76
3 Массовая доля механических примесей, %, не более	-	0,05	ГОСТ 6370-83
4 Давление насыщенных паров, кПа (мм. рт. ст.), не более	-	66,7 (500)	ГОСТ 1756-2000
5 Плотность, кг/м ³ , в пределах при 20 °С при 40 °С при 60 °С при 80 °С	970 – 980 960 – 970 945 – 955 935 – 945	962 – 965 949 – 952 936 – 939 923 – 926	ГОСТ Р 51069-97
6 Вязкость динамическая, мПа*с, в пределах при 20 °С при 40 °С при 60 °С при 80 °С	7000 – 11000 1000 – 2000 250 – 400 120 – 170	1600 – 5000 200 – 500 70 – 150 20 – 50	ГОСТ 1929-87
7 Массовая доля серы, %, в пределах	-	4,0– 4,5	ГОСТ 1437-75
8 Массовая доля сероводорода, млн. ⁻¹ (ppm), в пределах	100 – 200	-	ГОСТ Р 50802-95
9 Массовая доля метил- и этилмеркаптанов, млн. ⁻¹ (ppm), в пределах	0,5 – 1,0	-	ГОСТ Р 50802-95
10 Массовая доля парафина, %, в пределах	-	0,9 – 1,6	ГОСТ 11851-85
11 Массовая доля смол, %, в пределах	-	25 – 28	Методика, Рыбак Б.М. «Анализ нефти и нефтепродуктов», Гостоптехиздат, М: 1962, с. 60 - 66
12 Массовая доля асфальтенов, %, в пределах	-	4,8 – 5,5	
13 Фракционный состав, % (по объёму), в пределах температура начала кипения, °С до температуры 200 °С до температуры 300 °С	- - -	170 – 180 1 – 2 12 – 15	ГОСТ 2177-99

Приложение 3

Программа для определения коэффициентов в матрицах параметров объекта *A* и управления *B*

% USTANOVKA

global x xdl TT3 xdlPfi xPfiGr x11 v v1 v2 v3 v4 fff fff1 fff2 d dd nu1 nu2 n m ...

A AA1 AA1T B C D K KL kopt KKK ...

A1Pfi AA1Pfi B1Pfi K1Pfi u u0 u1 u2 u12...

u2ij G1 G2 G3 G4 P1 P2 P3 P4...

t1zad t3zad...

rP1 rP2 rP3 rP4 rP rrP rrP1 ppr BFLC1 BFLC2 BFLC3 BFLC4 ...

F FF1 FF2 FF3 FF4 PF An Anr Gd Gdr AG AC S1 S2 S3 S4 S1INV S2INV S3INV S4INV;

% Аккумулирующая емкость для ВСН (E1)

Vemk=200; % объем аккумулирующей емкости для ВСН (E1)[м3] базис

pj1=634; % плотность высокосернистой нефти [кг/м3]

pj2=960; % плотность сверхвязкой нефти [кг/м3]

pj3=800; % плотность смешанной нефти [кг/м3]

Cj1=(2.09*1000);% теплоемкость ВСН нефти [Дж/кг*град]

Cj2=(4.208*1000);% теплоемкость СВН нефти [Дж/кг*град]

Vp=2.77; % объем змеевика1[м3] базис

tj1=30; % [град]

tj11=40; % температура ВСН[град]

pp=988.1; % плотность пара [кг/м3] базис

Cr=(4.178*1000);% теплоемкость пара[Дж/кг*град] базис

tp=179; % температура пара [град] базис

tp11=100; % [град]

a1=120; % коэффициент теплоотдачи [Вт/м2*град]

a2=150; % базис

S1=11.785; % площадь поверхности трубы [м2] базис

S2=12;

Gj1=(30/3600); % расход высокосернистой нефти [м3/с]

Gj2=(12/3600); % расход сверхвязкой нефти [м3/с]

Gj12=(42/3600); % расход смешанной нефти [м3/с] базис

Gjp=(40/3600); % расход пара [м3/с]

% в безразмерной форме

Vemkb=Vemk/Vemk; % объем аккумулирующей емкости для ВСН

pj1b=pj1/pp; % плотность высокосернистой нефти

pj2b=pj2/pp; % плотность сверхвязкой нефти

pj3b=pj3/pp; % плотность смешанной нефти

Cj1b=Cj1/Cj2; % теплоемкость нефти

Cj2b=Cj1/Cj2;

tj1b=tj1/tp;

tj11b=tj11/tp; % температура ВСН

Vpb=Vp/Vp; % объем змеевика

ppb=pp/pp; % плотность пара

Crp=Cr/Cj2; % теплоемкость пара

tpb=tp/tp; % температура пара

tp11b=tp11/tp;

a1b=a1/a2; % коэффициент теплоотдачи

a2b=a2/a2;

S1b=S1/S2; % площадь поверхности трубы

S2b=S2/S2;

Gj1b=Gj1/Gj12; % расход высокосернистой нефти

```

Gj2b=Gj2/Gj12; % расход сверхвязкой нефти
Gj12b=Gj12/Gj12; % расход смешанной нефти
Gjpb=Gjp/Gj12; % расход пара
A2=Gj1b*Cj1b;
A1=Gjpb*Cpb;
% параметры ПФ для E1
mu1=Gj1b;
T1E1=(Gjpb*Cpb*tj11b)/Gjpb*(A2/(a1b*S1b)+A1/(a1b*S1b));
T2E1=A1*A2*Gjpb*Cpb/(a1b*S1b)^2;
ro1=Gjpb*Cpb*tj11b/Gjpb;
k1=-(a1b*S1b)/(Gj1b*Cj1b);
k2=(a2b*S2b)/(Gj1b*Cj1b);
a11=k1;
a12=k2;
% Змеевик1
Vjct=2.77; % объем змеевика[м3] базис
pjct=7800; % плотность стали[кг/м3] базис
Cjct=(0.48*1000); % теплоемкость стали[Дж/кг*град] базис
qk=(2.257*10^6); % теплота конденсации пара [Дж/кг*град] базис
a1=120; % коэффициент теплоотдачи [Вт/м2*град] базис
S1=11.785; % площадь поверхности трубы [м2] базис
Gj1=(30/3600); % расход высокосернистой нефти [м3/с]
Gjp=(40/3600); % расход пара [м3/с]
Gj12=(42/3600); % расход смешанной нефти [м3/с] базис
Cp=(4.178*1000); % теплоемкость пара[Дж/кг*град] базис
Cj1=(2.09*1000); % теплоемкость нефти [Дж/кг*град]
% в безразмерной форме
Vjctb=Vjct/Vjct; % объем змеевика
pjctb=pjct/pjct; % плотность стали
Cjctb=Cjct/Cjct; % теплоемкость стали
qkb=qk/qk; % теплота конденсации пара
a1b=a1/a2; % коэффициент теплоотдачи
S1b=S1/S2; % площадь поверхности трубы
Gj1b=Gj1/Gj12; % расход высокосернистой нефти
Gjpb=Gjp/Gj12; % расход пара
Cpb=Cp/Cp; % теплоемкость пара
Cj1b=Cj1/Cj2; % теплоемкость нефти
Kct3e=-(a1b*S1b)/(Cpb*Gjpb);
a22=Kct3e;
% Замерная емкость для СВН (E2)
Vemk=200; % объем аккумулирующей емкости для СВН (E2)[м3] базис
pj1=634; % плотность высокосернистой нефти [кг/м3]
pj2=960; % плотность сверхвязкой нефти [кг/м3]
pj3=800; % плотность смешанной нефти [кг/м3]
Cj1=(2.09*1000); % теплоемкость нефти [Дж/кг*град]
Cj2=(4.208*1000); % теплоемкость СВН нефти [Дж/кг*град]
Vjct=2.77; % объем змеевика2[м3] базис
t1=70; % [град]
t11=80; % температура СВН[град]
pp=988.1; % плотность пара [кг/м3] базис
Cp=(4.178*1000); % теплоемкость пара[Дж/кг*град] базис
tp=179; % температура пара [град] базис

```

$tp11=100$; % [град]
 $a1=120$; % коэффициент теплоотдачи [Вт/м²*град] базис
 $a2=150$;
 $S1=11.785$; % площадь поверхности трубы [м²] базис
 $S2=12$;
 $Gj1=(30/3600)$; % расход высокосернистой нефти [м³/с]
 $Gj2=(12/3600)$; % расход сверхвязкой нефти [м³/с]
 $Gj12=(42/3600)$; % расход смешанной нефти [м³/с] базис
 $Gjp=(40/3600)$; % расход пара [м³/с]
 % в безразмерной форме
 $Vemkb=Vemk/Vemk$; % объем аккумулирующей емкости для СВН
 $pj1b=pj1/pp$; % плотность высокосернистой нефти
 $pj2b=pj2/pp$; % плотность сверхвязкой нефти
 $pj3b=pj3/pp$; % плотность смешанной нефти
 $Cj1b=Cj1/Cj2$; % теплоемкость нефти
 $Cj2b=Cj2/Cj2$; % теплоемкость нефти
 $t1b=t1/tp$;
 $t11b=t11/tp$; % температура ВСН
 $Vpb=Vp/Vp$; % объем змеевика
 $ppb=pp/pp$; % плотность пара
 $Cpb=Cp/Cj2$; % теплоемкость пара
 $tpb=tp/tp$; % температура пара
 $tp11b=tp11/tp$;
 $a1b=a1/a2$; % коэффициент теплоотдачи
 $a2b=a2/a2$;
 $S1b=S1/S2$; % площадь поверхности трубы
 $S2b=S2/S2$;
 $Gj1b=Gj1/Gj12$; % расход высокосернистой нефти
 $Gj2b=Gj2/Gj12$; % расход сверхвязкой нефти
 $Gj12b=Gj12/Gj12$; % расход смешанной нефти
 $Gjpb=Gjp/Gj12$; % расход пара
 $k3=-(a1b*S1b)/(Gj2b*Cj2b)$;
 $k4=(a2b*S2b)/(Gj2b*Cj2b)$;
 $a33=k3$;
 $a34=k4$;
 % параметры ПФ для E2
 $mu2=Gj2b$;
 $T1E2=(Gjpb*Cpb*tj11b)/Gjpb*(A2/(a1b*S1b)+A1/(a1b*S1b))$;
 $T2E2=A1*A2*Gjpb*Cpb/(a1b*S1b)^2$;
 $ro2=Gjpb*Cpb*tj11b/Gjpb$;
 % Змеевик2
 $Vjct=5$; % объем змеевика2[м³] базис
 $pjct=7800$; % плотность стали[кг/м³] базис
 $Cjct=(0.48*1000)$; % теплоемкость стали[Дж/кг*град] базис
 $qk=(2.257*10^6)$; % теплота конденсации пара [Дж/кг*град] базис
 $a1=150$; % коэффициент теплоотдачи [Вт/м²*град] базис
 $S1=15$; % площадь поверхности трубы [м²] базис
 $Gj2=(12/3600)$; % расход высокосернистой нефти [м³/с]
 $Gjp=(50/3600)$; % расход пара [м³/с]
 $Gj12=(42/3600)$; % расход смешанной нефти [м³/с] базис
 $Cp=(4.179*1000)$; % теплоемкость пара[Дж/кг*град] базис
 $Cj1=(2.09*1000)$; % теплоемкость нефти [Дж/кг*град]

% в безразмерной форме
 $V_{jctb} = V_{jct} / V_{jct}$; % объем змеевика2
 $\rho_{jctb} = \rho_{jct} / \rho_{jct}$; % плотность стали
 $C_{jctb} = C_{jct} / C_{jct}$; % теплоемкость стали
 $q_{kb} = q_k / q_k$; % теплота конденсации пара
 $a_{1b} = a_1 / a_1$; % коэффициент теплоотдачи
 $S_{1b} = S_1 / S_2$; % площадь поверхности трубы
 $G_{j2b} = G_{j1} / G_{j12}$; % расход высокосернистой нефти
 $G_{jpb} = G_{jp} / G_{j12}$; % расход пара
 $C_{pb} = C_p / C_p$; % теплоемкость пара
 $C_{j1b} = C_{j1} / C_p$; % теплоемкость нефти
 $K_{ct2e} = -(a_{1b} * S_{1b}) / (G_{jpb} * C_{pb})$;
 $a_{44} = K_{ct2e}$;
 % Аккумулирующая емкость для смешанной нефти (E3)
 $V_{emk} = 200$; % объем аккумулирующей емкости (E3)[м3] базис
 $\rho_{j1} = 634$; % плотность высокосернистой нефти [кг/м3]
 $\rho_{j2} = 960$; % плотность сверхвязкой нефти [кг/м3]
 $\rho_{j3} = 800$; % плотность смешанной нефти [кг/м3]
 $C_{j1} = (2.09 * 1000)$; % теплоемкость нефти [Дж/кг*град]
 $t_{j1} = 30$; % [град]
 $t_{j11} = 40$; % температура ВСН[град]
 $t_1 = 70$; % [град]
 $t_{11} = 80$; % температура СВН[град]
 $t_3 = 60$; % температура смешанной нефти [град]
 $\rho_p = 988.1$; % плотность пара [кг/м3] базис
 $C_p = (4.178 * 1000)$; % теплоемкость пара [Дж/кг*град] базис
 $t_p = 179$; % температура пара [град] базис
 $t_{p11} = 100$; % [град]
 $a_1 = 120$; % коэффициент теплоотдачи [Вт/м2*град] базис
 $S_1 = 11.785$; % площадь поверхности трубы [м2] базис
 $G_{j1} = (30/3600)$; % расход высокосернистой нефти [м3/с]
 $G_{j2} = (12/3600)$; % расход сверхвязкой нефти [м3/с]
 $G_{j12} = (42/3600)$; % расход смешанной нефти [м3/с] базис
 $G_{jp} = (40/3600)$; % расход пара [м3/с]
 % в безразмерной форме
 $V_{emkb} = V_{emk} / V_{emk}$; % объем аккумулирующей емкости для ВСН
 $\rho_{j1b} = \rho_{j1} / \rho_p$; % плотность высокосернистой нефти
 $\rho_{j2b} = \rho_{j2} / \rho_p$; % плотность сверхвязкой нефти
 $\rho_{j3b} = \rho_{j3} / \rho_p$; % плотность смешанной нефти
 $C_{j1b} = C_{j1} / C_p$; % теплоемкость нефти
 $t_{j1b} = t_{j1} / t_p$;
 $t_{j11b} = t_{j11} / t_p$; % температура ВСН
 $t_{1b} = t_1 / t_p$;
 $t_{11b} = t_{11} / t_p$; % температура СВН
 $t_{3b} = t_3 / t_p$; % температура смешанной нефти
 $V_{pb} = V_p / V_p$; % объем змеевика
 $\rho_{pb} = \rho_p / \rho_p$; % плотность пара
 $C_{j1b} = C_{j1} / C_{j2}$; % теплоемкость нефти
 $C_{j2b} = C_{j1} / C_{j2}$;
 $C_{pb} = C_p / C_{j2}$; % теплоемкость пара
 $t_{pb} = t_p / t_p$; % температура пара
 $t_{p11b} = t_{p11} / t_p$;

```

a1b=a1/a2;      % коэффициент теплоотдачи
S1b=S1/S2;      % площадь поверхности трубы
Gj1b=Gj1/Gj12;  % расход высокосернистой нефти
Gj2b=Gj2/Gj12;  % расход сверхвязкой нефти
Gj12b=Gj12/Gj12; % расход смешанной нефти
Gjpb=Gjp/Gj12;  % расход пара
Ttau1=(pj1b*Cj1b*Gj1b)/(pj3b*Cj1b*(Gj1b+Gj2b)); % коэффициент из теплового баланса
для первой емкости
Ttau2=((pj2b*Cj2b*Gj2b)/(pj3b*Cj1b*(Gj1b+Gj2b))); % коэффициент из теплового баланса
для второй емкости
a51=-(pj1b*a1b*S1b)/(pj3b*Cj1b*(Gj2b+Gj1b));
a52=(pj1b*a1b*S1b)/(pj3b*Cj1b*(Gj2b+Gj1b));
a53=-(pj2b*a1b*S1b)/(pj3b*Cj1b*(Gj2b+Gj1b));
a54=(pj2b*a1b*S1b)/(pj3b*Cj1b*(Gj2b+Gj1b));
a55=-1/5;
sigma=tj11b;
klam=tj11b;
ksigm=klam/sigma;
Tob=Vemkb*pj1b*Cj1b/(pj2b*Cj1b*tj11b);
% Исполнительное устройство 1
f=50;
uuu=20;
ksu1=f/uuu;
nn=2950/3000;
kdv1=nn/f;
Tdv1=1.2; %1.2;
phi1=0;
phi1=1;
kphi1=phi1/(pi/2);
L1=0.020;
c12=2;
c22=2.5;
J2=0.05;
% Исполнительное устройство 1
ksu2=f/uuu;
nn=2950/3000;
kdv2=nn/f;
Tdv2=1.2;
phi2=0;
phi2=1;
kphi2=phi2/(pi/2);
R1=11;
L1=0.020;
c12=2;
c22=2.5;
J2=0.05; % кг*м2
R1b=R1/10; % в безразмерной форме
L1b=L1/L1;
c12b=2;
c22b=2.5;
J2b=J2/J2;
a55=-R1b/L1b; a56=-c12b/L1b;

```

```

a65=c22b/J2b;
% Трубопровод
tokr=15;
i0=.001; %гидравл. уклон
L=15600;
rotr=800;
pj1=634;      % плотность высокосернистой нефти [кг/м3]
pj2=960;      % плотность сверхвязкой нефти [кг/м3]
pj3=800;      % плотность смешанной нефти [кг/м3]
pj1b=pj1/pp;   % плотность высокосернистой нефти
pj2b=pj2/pp;   % плотность сверхвязкой нефти
pj3b=pj3/pp;   % плотность смешанной нефти
Gj1b=Gj1/Gj12; % расход высокосернистой нефти
Gj2b=Gj2/Gj12; % расход сверхвязкой нефти
Gj12b=Gj12/Gj12; % расход смешанной нефти
Gjpb=Gjp/Gj12; % расход пара
Gtr=42/3600; % мкуб/с
Cj1b=Cj1/Cj2; % теплоемкость нефти
Cj2b=Cj2/Cj2; % теплоемкость нефти
d=.2;
k=4;
Cv=2090;
% % % в безразмерной форме
tokrb=15/179;
i0b=i0/i0; %гидравл. уклон базис
L1b=800/15600;
L2b=1000/15600;
L3b=15600/15600;% базис
rotrb=800/800;% базис
Gtrb=(42/3600)/(42/3600); % мкуб/с % базис
db=0.2/0.2;% базис
kb=4/4;% базис
M1b=(pj1b*Gj1b);% базис
M2b=(pj2b*Gj2b);% базис
M3b=(pj3b*Gj12b);% базис
tpv1b=9.81*i0*M1b/(pi*d*k); %пост вел с разм темп-ры
tpv2b=9.81*i0*M2b/(pi*d*k); %пост вел с разм темп-ры
tpv3b=9.81*i0*M3b/(pi*d*k); %пост вел с разм темп-ры
Cvb=2090/2090;% базис
gb=9.8/9.8;
pib=3.14/3.14;% базис
T1b=21/179;
T12b=60/179;
tp=179;      % температура пара [град]      базис
% Начальная температура в первой емкости по формуле Лурье
TO1=tokrb+((gb*i0b*M1b)/(pib*db*kb))+((T12b-tokrb-(gb*i0b*M1b)/(pib*db*kb))/exp(-(pib*db*kb*L1b)/(Cvb*M1b)));
% Начальная температура во второй емкости по формуле Лурье
TO2=tokrb+((gb*i0b*M2b)/(pib*db*kb))+((T12b-tokrb-(gb*i0b*M2b)/(pib*db*kb))/exp(-(pib*db*kb*L2b)/(Cvb*M2b)));
% Начальная температура в третьей емкости по формуле Лурье

```

```

TO3=tokrb+((gb*i0b*M3b)/(pib*db*kb))+(Tlb-tokrb-(gb*i0b*M3b)/(pib*db*kb))/exp(-
(pib*db*kb*L3b)/(Cvb*M3b));
% %
TO1;
TO2;
TO3;
% % % % % % % % % % МАТРИЦА A6x6
% Матрица A
for i=1:6
    for j=1:6
        A(i,j)=0;    % Задание нулевой матрицы A
    end
end
A(1,1)=a11; A(1,2)=a12;
    A(2,2)=a22;
A(3,3)=a33; A(3,4)=a34;
    A(4,4)=a44;
A(5,5)=a55; A(5,6)=a56;
    A(6,5)=a65;
A
korniA = eig(A);
korniA
% Матрица AA1
for i=1:6
    for j=1:6
        AA1(i,j)=0;    % Задание нулевой матрицы A1
    end
end
% Матрица B
for i=1:n
    for j=1:m
        B(i,j)=0;    % Задание нулевой матрицы B
        O(i,j)=0;
    end
end
B(5,1)=1;
B
% Коэффициенты из уравнения теплового баланса, с запаздыванием по Лурье
AA1(5,1)=0.2572*.5661; AA1(5,3)=.4570*0.3425;
AA1
% Матрица A1Pfi
for i=1:7
    for j=1:7
        A1Pfi(i,j)=0;    % Задание нулевой матрицы A1
    end
end
A1Pfi = [A O; zeros(1,7)];
A1Pfi(7,6) = 1;
A1Pfi
AA1Pfi=[AA1 O;zeros(1,7)];
AA1Pfi
B1Pfi = [B; zeros(1,1)];

```

```

B1Pfi
% Матрица K
for i=1:m
    for j=1:6
        KKK(i,j)=0;    % Задание нулевой матрицы K
    end
end
kk1=1;
KKK(1,5)=kk1;
KKK
K1Pfi = [KKK zeros(1,1)];
K1Pfi
korniA = eig(A);
korniA

```

Программа алгоритм синтеза управления для линейной системы с векторной функцией Ляпунова

```

clear all
clc
% алгоритм с векторной функцией Ляпунова
global x xdl TT3 xdlPfi xPfiGr x11 v v1 v2 v3 v4 fff fff1 fff2 d dd nu1 nu2 n m ...
A AA1 AA1T B C D K KL kopt KKK ...
A1Pfi AA1Pfi B1Pfi K1Pfi u u0 u1 u2 u12...
u2ij G1 G2 G3 G4 P1 P2 P3 P4...
t1zad t3zad...
rP1 rP2 rP3 rP4 rP rrP rrP1 ppr BFLC1 BFLC2 BFLC3 BFLC4 ...
F FF1 FF2 FF3 FF4 PF An Anr Gd Gdr AG AC S1 S2 S3 S4 S1INV S2INV S3INV S4INV;
n=6;
m=1;
Pr=zeros(n,n);PF=zeros(m,1);
G=zeros(n,n); G1=zeros(n,n); G2=zeros(n,n); G3=zeros(n,n); G4=zeros(n,n);
u = zeros(m,1);u0 = zeros(m,1);u1 = zeros(m,1);u2 = zeros(m,1);u12 = zeros(m,1);
u1r=zeros(n,1);u2r=zeros(n,1);
G1=(-1)*eye(n,n);G2=(-1)*eye(n,n);G3=(-1)*eye(n,n);G4=(-1)*eye(n,n);
G1(1,1)=-190;G2(2,2)=-170;G3(3,3)=-150;G4(4,4)=-120;
An=zeros(2*n,2*n); Anr=zeros(2*n,2*n); Gd=zeros(2*n); Gdr=zeros(2*n);
P1=zeros(n,n);P2=zeros(n,n);P3=zeros(n,n);P4=zeros(n,n);
rP1=zeros(n,m); rP2=zeros(n,m); rP3=zeros(n,m); rP4=zeros(n,m);
u=zeros(m,1); u1=zeros(m,1); u2=zeros(m,1);u2ij=zeros(m,m);
K=zeros(m,n); KL=zeros(m,n); kopt=zeros(m,n);KKK=zeros(m,n);
BFLC1=zeros(1,n); BFLC2=zeros(1,n); BFLC3=zeros(1,n); BFLC4=zeros(1,n);
rP=zeros(m,m); rrP=zeros(m,m); rrP1=zeros(m,m);ppr=zeros(m,m);
fff=zeros(n,1);
fff1=zeros(n,1);
fff2=zeros(n,1);
AC=zeros(m,m);AC=eye(m,m);
AC=-AC;
Pr=zeros(n,n);
A=zeros(n,n);B=zeros(n,m);AA1=zeros(n,n);
AA1T=zeros(n,n);
A1Pfi=zeros(n+1,n+1);AA1Pfi=zeros(n+1,n+1);
B1Pfi=zeros(n+1,m);K1Pfi=zeros(m,n+1);

```

```

AR=zeros(n,n);
x=zeros(n,1);xdl=zeros(n,1);
xPdl=[0 0 0]';
xPfi=zeros(n+1,1);
xdlPfi=zeros(n+1,1);
% для построения графика
xPfiGr=zeros(n+1,1);
S1=zeros(n,n); S2=zeros(n,n); S3=zeros(n,n); S4=zeros(n,n);
S1=eye(n,n);S2=eye(n,n);S3=eye(n,n);S4=eye(n,n);
S1INV=zeros(n,n); S2INV=zeros(n,n); S3INV=zeros(n,n); S4INV=zeros(n,n);
S1INV=inv(S1);S2INV=inv(S2);S3INV=inv(S3);S4INV=inv(S4);
% нефтяная установка подогрева m=1
Ustanovka;
A
B
KKK
A1Pfi
AA1Pfi
B1Pfi
K1Pfi
korniA=eig(A);
AG=A-B*KKK;
d=det(AG);
AR=A;
% ограничения на регулятор
t1zad=.00000001;
t3zad=.00000001;
% построение векторной квадратичной функции Ляпунова
P1=funcLyapunovexpANS2(AR,G1);
P2=funcLyapunovexpANS2(AR,G2);
P3=funcLyapunovexpANS2(AR,G3);
P4=funcLyapunovexpANS2(AR,G4);
prov1 = AR'*P1+P1*AR-G1;
prov2 = AR'*P2+P2*AR-G2;
prov3 = AR'*P3+P3*AR-G3;
prov4 = AR'*P4+P4*AR-G4;
% использование функции FLC_DiffEqSysSolve
% NN - общий_шаг_квантования
h=1;
tn=0; % Начальное время
tk=6000; %Конечное время
ntau1=1;ntau2=1;
xP11d=zeros(ntau1,1);
xP12d=zeros(ntau1,1);
xP21d=zeros(ntau2,1);
xP22d=zeros(ntau2,1);
% локальные интервалы интегрирования
tnq=tn-h;tkq=tk+h;
xPfi0 = [0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.0]'; %Начальные условия 7
NN=tk/h;
tt=zeros(NN,1);
Y1=zeros(NN,1);Y2=zeros(NN,1);Y3=zeros(NN,1);Y4=zeros(NN,1);

```

```

Y5=zeros(NN,1);Y6=zeros(NN,1);Y7=zeros(NN,1);
Y8=zeros(NN,1);Y9=zeros(NN,1);
Y11=zeros(NN,1);
% запаздывание кратное 1
for i=1:ntau1
xP11d(i,1)=0;
xP12d(i,1)=0;
end;
for i=1:ntau2
xP21d(i,1)=0;
xP22d(i,1)=0;
end;
for iii=1:NN
for i=1:(ntau1-1)
i1=ntau1-i+1
xP11d(i1,1)=xP11d(i1-1,1);
end;
xP11d(1,1)=xPfi(1,1);
for i=1:(ntau1-1)
i1=ntau1-i+1
xP12d(i1,1)=xP12d(i1-1,1);
end;
xP12d(1,1)=xPfi(2,1);
for i=1:(ntau2-1)
i1=ntau2-i+1
xP21d(i1,1)=xP21d(i1-1,1);
end;
xP21d(1,1)=xPfi(3,1);
for i=1:(ntau2-1)
i1=ntau2-i+1
xP22d(i1,1)=xP22d(i1-1,1);
end;
xP22d(1,1)=xPfi(4,1);
xdl = [xP11d(ntau1,1) 0 xP21d(ntau2,1) 0 0 0]'; % 6
xdlPfi=[xdl;zeros(1,1)];
if (xP11d(ntau1)>t1zad)
xP11d(ntau1)= t1zad
end;
if (xP11d(ntau1)<-t1zad)
xP11d(ntau1)= -t1zad
end;
if (xP21d(ntau2)>t3zad)
xP21d(ntau2)= t3zad
end;
if (xP21d(ntau2)<-t3zad)
xP21d(ntau2)= -t3zad
end;
TT3=0.2572*0.5661*xP11d(ntau1)+...
0.4670*0.3425*xP21d(ntau2);
% TT3=xPfi0(5,1); %Регулируемая переменная
xPfiGr=xPfi0;
xrab=zeros(n+1);

```

```

xrab=xPfi0';
tnq=tnq+h;tkq=tkq+h;
[t, xPfi] = ode45('FLC_DiffEqSysSolve_VFLexpANS2', ...
    tnq, tkq, xPfi0);
kkk=1;
s=iii;
tt(s,1) = tn + (s-1)*h;
% вектор состояния=6 +1(угол)+3(управления)
Y1(s,1) =xPfiGr(1,1);
Y2(s,1) = xPfiGr(2,1);
Y3(s,1) = xPfiGr(3,1);
Y4(s,1) = xPfiGr(4,1);
Y5(s,1) = xPfiGr(5,1);
Y6(s,1) = xPfiGr(6,1);
Y7(s,1) = xPfiGr(7,1);
Y8(s,1) = u1(1,1);
Y9(s,1) = u2(1,1);
Y10(s,1) = u12(1,1);
Y11(s,1) = TT3;% Регулируемая величина
xPfi0 = xPfiGr; %Начальные условия по шагам (переприсвоение)
rrrr=xPfiGr(7)
end;% end NN
% вектор состояния=6+1(угол)
figure(5);
subplot(2,1,1);
plot(tt,Y1,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('Температура ВСН в E1');
subplot(2,1,2);
plot(tt,Y2,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('Температура змеевика1');
figure(6);
subplot(2,1,1);
plot(tt,Y3,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('Температура СВН в E2');
subplot(2,1,2);
plot(tt,Y4,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('Температура змеевика2');
figure(7);
subplot(2,1,1);
plot(tt,Y5,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('A/A'); xlabel('t, c');
title('Ток в цепи');
subplot(2,1,2);
plot(tt,Y6,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('(рад/с)/(рад/с)'); xlabel('t, c');
title('Скорость вращения двигателя');
figure(8);
subplot(2,1,2);
plot(tt,Y7,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('рад/рад'); xlabel('t, c');
title('Угол поворота заслонки');
% управления
figure(9);
subplot(3,1,1);
plot(tt,Y8,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');

```

```

title('управление u1');
subplot(3,1,2);
plot(tt,Y9,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('нечеткое управление u2');
subplot(3,1,3);
plot(tt,Y10,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('комбинированное управление u12');
figure(10);
subplot(1,1,1);
plot(tt,Y11,'Linewidth', 2); grid on; ylabel('град/град'); xlabel('t, c');
title('регулируемая величина T3');
function f1 = FLC_DiffEqSysSolve_VFLexpANS2(t,xPfi);
global x xdl TT3 xdlPfi xPfiGr x11 v v1 v2 v3 v4 fff fff1 fff2 d dd nu1 nu2 n m ...
    AA1 AA1T B C D K KL kopt KKK ...
    A1Pfi AA1Pfi B1Pfi K1Pfi u u0 u1 u2 u12...
    u2ij G1 G2 G3 G4 P1 P2 P3 P4...
    t1zad t3zad...
    rP1 rP2 rP3 rP4 rP rrP rrP1 ppr BFLC1 BFLC2 BFLC3 BFLC4 ...
    F FF1 FF2 FF3 FF4 PF An Anr Gd Gdr AG AC S1 S2 S3 S4 S1INV S2INV S3INV S4INV;
kd1=1;kd2=1;kd3=1;kd4=1;
nu1=sqrt(u1(1,1)^2);% m=1
% вектор состояния=6
x = [xPfi(1,:) xPfi(2,:) xPfi(3,:) xPfi(4,:) xPfi(5,:) xPfi(6,:)]';
FF1=x'*G1*x;%m=1
F=FF1;% m=1
rP1=P1*B;% m=1
BFLC1=2*x'*rP1;% m=1
rP=BFLC1;% m=1
d=det(rP);
if (abs(d)>0.00001)
    rrP=inv(rP);
end;
ppr= rrP*rP;
FF1=x'*G1*x; % m=1
F=FF1;%m=1
for i=1:m
    for j=1:m
        rrP1(i,j)=-rrP(i,j)/F(j);
    end;
end;
PFF1= AC(1,1)*x'*P1*x-x'*G1*x-kd1*x'*P1*AA1*S1INV*AA1T*P1*x-...
    (1/kd1)*xdl'*S1*xdl;
PF=PFF1;% m=1
% текущие значения ФЛ1, ФЛ2, ФЛ3,ФЛ4
% m=1
v1=x'*P1*x;
v=sqrt(v1^2);
% провести оценку значений ФЛ и соответствующую настройку
v1b=10;v2b=10;v3b=10;v4b=10;
v1m=5;v2m=5;v3m=5;v4m=5;
v1z=0.0000001;v2z=0.0000001;v3z=0.0000001;v4z=0.0000001;
vb=sqrt(v1b^2+v2b^2+v3b^2+v4b^2);

```

```

vm=sqrt(v1m^2+v2m^2+v3m^2+v4m^2);
vz=sqrt(v1z^2+v2z^2+v3z^2+v4z^2);
if (abs(d)>0.00001)
%   rrP=inv(rP);
rrP=rP^(-1);
end;
% m=1
if PF(1,1)>0 cr=0;
    if rrP(1,1)>0 rrP(1,1)=rrP(1,1);end;
    if rrP(1,1)<0 rrP(1,1)=-rrP(1,1);end;
end;
    if PF(1,1)<0 cr=0;
        if rrP(1,1)>0 rrP(1,1)=-rrP(1,1);end;
        if rrP(1,1)<0 rrP(1,1)=rrP(1,1);end;
    end;
u2=rrP*PF;
nu2=sqrt(u2(1,1)^2);% m=1
% %                                     нормирование по линейному регулятору
%
    if abs(nu2)>0
        if abs(nu1)>0
            for i=1:m
                u2(i,1)= u2(i,1)/(abs(nu2)/abs(nu1));
            end;
        end;
    end;

u1(1,1)=-K1Pfi(1,5)*TT3;
u12(1,1)=(u1(1,1)+u2(1,1))/2;
% выбор регулятора: линейного. нечеткого или комбинированного
u=u1;
% ограничения на линейный регулятор с запаздыванием
t1zad=.0001;
t3zad=.0001;
if (xdlPfi(1,1)>t1zad)
    xdlPfi(1,1)= t1zad
end;
if (xdlPfi(1,1)<-t1zad)
    xdlPfi(1,1)= -t1zad
end;
if (xdlPfi(3,1)>t3zad)
    xdlPfi(3,1)= t3zad
end;
if (xdlPfi(3,1)<-t3zad)
    xdlPfi(3,1)= -t3zad
end;
f1=A1Pfi*xPfi+AA1Pfi*xdlPfi+B1Pfi*u; % комбинированный
% заслонка
pi=3.14;
xPfiGr=xPfi;
f1(2,1)=f1(2,1)+.001*1.11*xPfi(7,1)/(pi/2); % Заслонка
f1(1,1)=f1(1,1)+0.0001*sin(.005*t)+0.0001*sin(.01*t);% вводится произвольное возмущение
f1(2,1)=f1(2,1)+0.0001*sin(.005*t)+0.0001*sin(.01*t);% вводится произвольное возмущение

```

```

f1(3,1)=f1(3,1)+0.0001*sin(.001*t)+0.0001*sin(.01*t);% вводится произвольное возмущение
f1(4,1)=f1(4,1)+0.0001*sin(.001*t)+0.0001*sin(.01*t);% вводится произвольное возмущение
function P = funcLyapunovexpANS2(A,G);
global x xdl TT3 xdlPfi xPfiGr x11 v v1 v2 v3 v4 fff fff1 fff2 d dd nu1 nu2 n m ...
A AA1 AA1T B C D K KL kopt KKK ...
A1Pfi AA1Pfi B1Pfi K1Pfi u u0 u1 u2 u12...
u2ij G1 G2 G3 G4 P1 P2 P3 P4...
t1zad t3zad...
rP1 rP2 rP3 rP4 rP rrP rrP1 ppr BFLC1 BFLC2 BFLC3 BFLC4 ...
F FF1 FF2 FF3 FF4 PF An Anr Gd Gdr AG AC S1 S2 S3 S4 S1INV S2INV S3INV S4INV;
n1=n*n;
A=AG;
% Формирование матрицы An
for i=1:n1
    for j=1:n1
        An(i,j)=0;
    end
end
for i=1:n
    for j=1:n
        for k=1:n
            i1=k+(i-1)*n;
            i2=k+(j-1)*n;
            An(i1,i2)=A(j,i);
        end
    end
end
for i=1:n
    for k=1:n
        for L=1:n
            i1=k+(i-1)*n;
            i2=L+(i-1)*n;
            An(i1,i2)=An(i1,i2)+A(L,k);
        end
    end
end
for i=1:n
    for j=1:n
        i1=j+(i-1)*n;
        Gd(i1,1)= G(i,j);
    end
end
% Решение системы алгебраических уравнений
d=det(An);
Anr=inv(An);
AN=An*Anr;
Gdr=Anr*Gd;
for i=1:n
    for j=1:n
        kq=j+(i-1)*n;
        P(i,j)=Gdr(kq,1);
    end
end

```

end
 % Проверка
 % $A'P + P^*A - G$

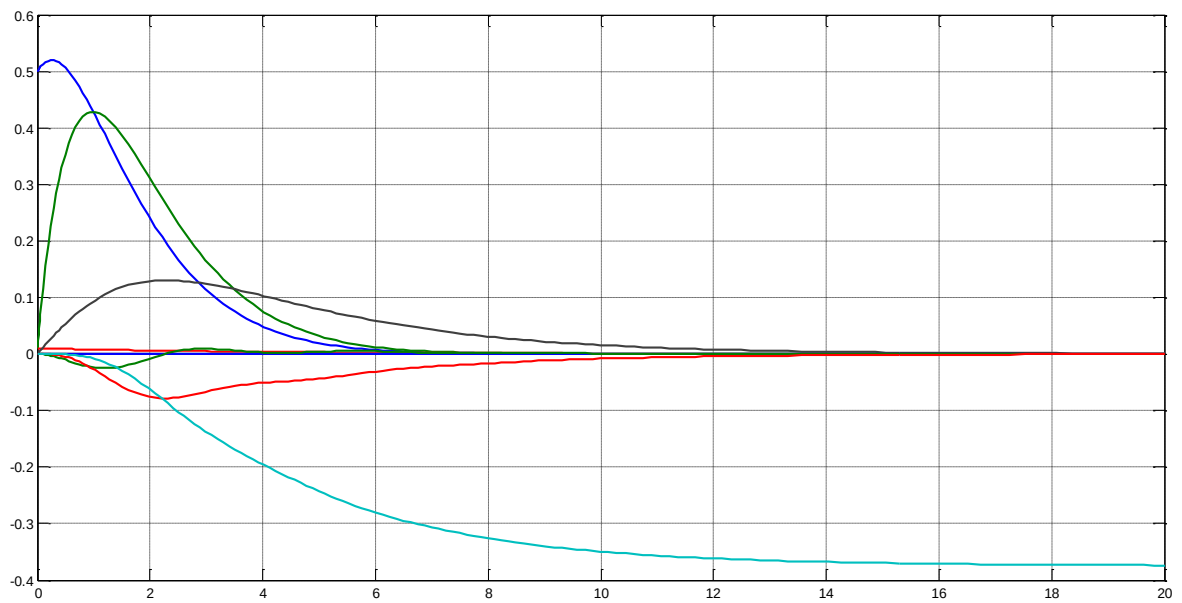


Рисунок П.1.1

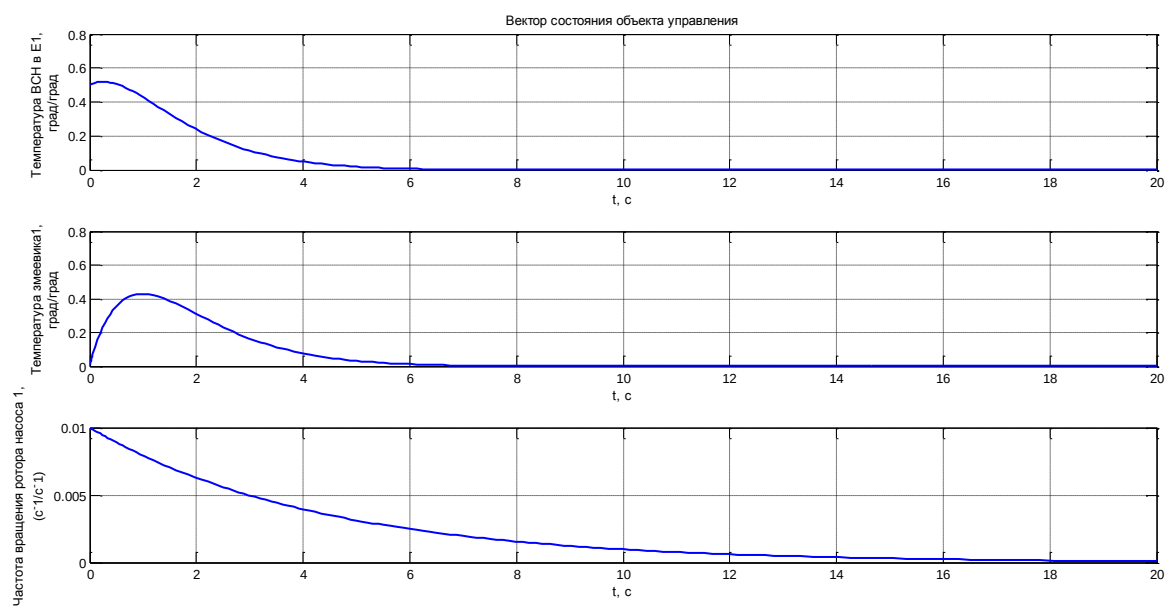


Рисунок П.1.2

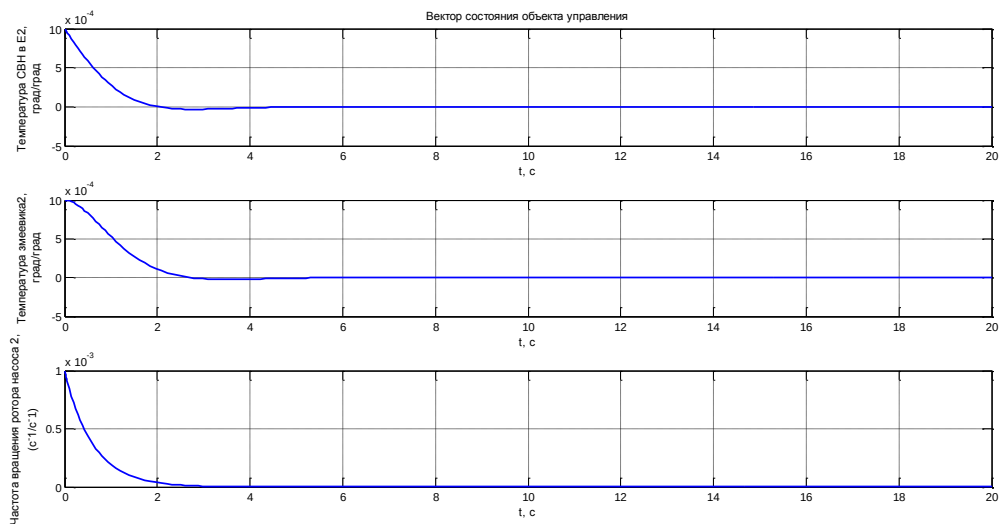


Рисунок П.1.3

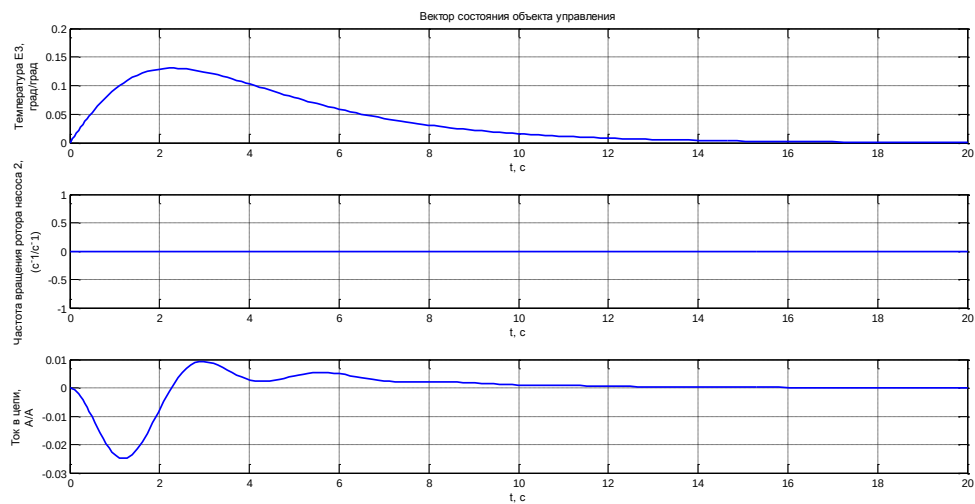


Рисунок П.1.4

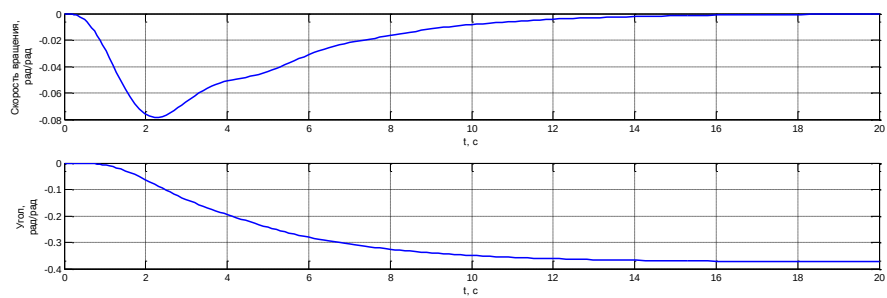


Рисунок П.1.5

Программа по построению оценок областей устойчивого функционирования систем управления

Система представлена в следующем виде:

$$\sigma^T \bar{C}_1 \sigma + \sigma^T \bar{C}_2 \varphi(\sigma) + \varphi^T(\sigma) \bar{C}_3 \varphi(\sigma) = 0,$$

где $C_1 = C_1^T = -(CG^{-1}C^T)^{-1}, \quad C_2 = C_2^T = 2\sigma C_1 CG^{-1}CP\beta + \frac{1}{2}A^T C^T (\text{diag}\beta),$

$$C_3 = C_3^T = (\beta^T P^T + \frac{1}{2}(\text{diag}\beta)CA)G^{-1}C^T C_1 CG^{-1}(P\beta + \frac{1}{2}A^T C^T (\text{diag}\beta)) + (\beta^T P^T +$$

$$+ \frac{1}{2}(\text{diag}\beta)AC)G^{-1}(PB + \frac{1}{2}A^T C^T (\text{diag}\beta)) - (\text{diag}\beta)C\beta$$

```
> restart;
> with (linalg);
> n := 8: m := 2:
> inn:=10:
> hrrr:=(6.28/inn):
> m1:=1:
> n3 :=n+m:
> hh := 0.00001:dx := .1e-3:eps:= .1e-6:
> alpha1 := 0:alpha2 := 6.28:rk1 := 1: rk2:=1:rk1 := 1:
> A := matrix(n,n,0):
> alfa := matrix(m1,m1,0):
> #alfa:=1:
> betat:=1:
> B:=matrix(n,m,0):
> A := matrix([[ -2.2146, 2.8188, 0, 0, 0, 0, 0, 0], [0, -0.8250, 0, 0, 0, 0, 0, 0], [0, 0, -2.7498, 3.5000, 0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, -1.0500, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, -1.1000, -2.0000, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 2.5000, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -
0.8571, -1.1429], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 5.0000, 0]]):
```

$$A := \begin{bmatrix} -2.2146 & 2.8188 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.7498 & 3.5000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.0500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.1000 & -2.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.5000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.8571 & -1.1429 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

```
> # матрица B
> B:=matrix([[0,0],[0,0],[0,0],[0,0],[1,0],[0,0],[0,1],[0,0]]):
```

$$B := \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

```
> # матрица C
> C:=matrix([[0, 0], [0, 0], [0, 0], [0, 0], [1, 1], [0, 0], [0, 0], [0, 0]]):
```

$$C := \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

```

> diagbeta:=( [0,0],[0,0]):
> C1T:=matrix(m,m,0):C2T:=matrix(m,m,0):C3T:=matrix(m,m,0):
> An:=matrix(n*n,n*n,0):
> Gd := matrix(n*n,1,0):
> Gdr := matrix(n*n,1,0):
> # n - размерность системы,m - размерность вектора нелинейностей,m1-размерность вектора
управления
> # анализ системы dx/dt=Ax+BPhi(sigma)
> AT:= matrix([ [0,0,0],[0,0,0],[0,0,0]]):
> P := matrix([ [1, 0, 0], [0, 1, 0], [0, 0, 1]]):
> # исходные параметры
> diagbetaN:=matrix([ [1,0], [0,1]]):
> # рабочие параметры
> diagbeta:=matrix([ [0,0], [0,0]]):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do diagbeta[i,j]:=diagbetaN[i,j] od od:
> beti:=matrix([ [0,0], [0,0]]):
> phi := matrix([ [0], [0]]):
> sigma1:=0: sigma2:=0:
> # векторная нелин.phi(sigma)
> #sigma1:=3:sigma2:=3:
> phi:=<sigma1^3,sigma2^3>:
> # рабочие параметры
> G:= matrix(n,n,0):Gi:= matrix(n,n,0):
> # исходные параметры
> GN:=matrix([ [-1000,0,0,0,0,0,0,0],[0,-1000,0,0,0,0,0,0],[0,0,-1000,0,0,0,0,0],[0,0,0,-1000,0,0,0,0],[0,0,0,0,-1000,0,0,0],
-1000,0,0,0,0,-1000,0,0],[0,0,0,0,0,-1000,0,0],[0,0,0,0,0,0,-1000,0],[0,0,0,0,0,0,0,-1000]]):
> # рабочие параметры
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do G[i,j]:=GN[i,j] od od:
> print(G):
> # транспонир. матр A
> AT := transpose(A):
> R1 := matrix(n,n,0):
> R2 := matrix(n,n,0):
> #Rm3 := matrix(n,n,0):
> Q := matrix(n,n,0):
> G1 := matrix(n,n,0):
> G1i:= matrix(n,n,0):
> Q1 := matrix(n,n,0):
> D1:= matrix(n,n,0):
> E2:= matrix(n,n,0):
> Bt:= matrix(m,n,0):
> W:= matrix(m,n,0):
> X:= matrix(m,n,0):
> S1:= matrix(n,n,0):
> Dr:= matrix(n,n,0):
> Z:= matrix(m,n,0):

```

```

> Z1:= matrix(m,n,0):
> Z2:= matrix(m,n,0):
> W1:= matrix(n,m,0):
> W2:= matrix(m,n,0):
> F:= matrix(n,m,0):
> F1:= matrix(m,n,0):
> F2:= matrix(m,n,0):
> F3:= matrix(n,m,0):
> X1:= matrix(n,n,0):
> X2:= matrix(n,n,0):
> B1 := matrix([[0], [1],[0]]):
> # решение матричного уравнения Ляпунова  $G=AT*P+PA$  без учета симметрии
> n1:=n*n:
> for i from 1 to n1 do for j from 1 to n1 do
> An[i,j] := 0 od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for j from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> i1 := k+(i-1)*n:
> i2 := k+(j-1)*n:
> An[i1,i2]:=A[j,i]:
> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> for L from 1 to n do
> i1:=k+(i-1)*n:
> i2:=L+(i-1)*n:
> An[i1,i2]:=An[i1,i2]+A[L,k]:
> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do i1 := j+(i-1)*n:
> Gd[i1,1]:=G[i,j]: od od:
> print(Gd):
> # решение системы линейных алгебраических уравнений
> Anr := inverse(An):
> AN:=multiply(An,Anr):
> Gdr:=multiply(Anr,Gd):
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do
> kq := j+(i-1)*n: P[i,j] := Gdr[kq,1]: od od:
> print(P):
> # P:
> rab:=matrix(n,n,0):rab1:=matrix(n,n,0):rab2:=matrix(n,n,0):
> # проверка_решения_матричного_уравнения
> rab:=multiply(AT,P):
> rab1:=multiply(P,A):
> print(rab):print(rab1):print(rab2):
> for ii from 1 to n do for jj from 1 to n do lll:=1:cccc:=rab[ii,jj]+rab1[ii,jj]:rab2[ii,jj]:=cccc: od od:
> print(rab2):
> print(rab):
> # завершение решения матричного уравнения Ляпунова
> # построение матриц C1T,C2T,C3T
> # построение матрицы C1T
> print(G):
> # Оращение матр.G
> G1:=inverse(G):

```

```

> # C*G1
> # Fr1:=multiply(C,G1):
> Q1:=multiply(C,G1):#m*n
> # транспонир.С
> Ct:=transpose(C):
> # Fr1*Ct
> # Fr2:=multiply(Fr1,Ct):
> C1T := multiply(Q1,Ct):
> # обращение C1T
> C1T:=inverse(C1T):
> # C1T=-C1T
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C1T[i,j] := -C1T[i,j] od od:
> print(C1T):
> # построение матрицы C2T
> # P*B
> R1:=multiply(P,B): At:=transpose(A):
> R2:=multiply(At,Ct):
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do
> R2[i,j] := R2[i,j]/2 od od:
> print(R2):
> R2:=multiply(R2,diagbeta):
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do
> R1[i,j] := R1[i,j]+R2[i,j] od od:
> print(R1):
> P1 := multiply(Q1,R1):
> #C2T:=multiply(P1,C1T):
> C2T:=multiply(C1T,P1):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C2T[i,j]:=2*C2T[i,j] od od:
> print(C2T):
> # построение матрицы C3T
P1T=matrix(n,m,0):DD1:=matrix(n,m,0):DD2:=matrix(m,n,0):DD3:=matrix(m,n,0):
> DD4:=matrix(m,m,0):DD5:=matrix(m,m,0):
> P1T:=transpose(P1):
> #DD1:=matrix(n,m,0):
> #DD2:=matrix(m,n,0):
> #DD3:=matrix(m,n,0):
> DD3:=multiply(C1T,C):
> #DD4:=matrix(m,m,0):
> #DD5:=matrix(m,m,0):
> print(P1T):
> print(DD3):
> print(P1T):
> DD4:=multiply(P1T,C1T):
> D5:=multiply(DD4,P1):
> DD6:=matrix(n,m,0):
> DD6:=multiply(G1,R1):
> R1T:=transpose(R1):
> DD7:=matrix(m,m,0):
> DD7:=multiply(R1T,DD6):
> DD8:=matrix(m,n,0):
> DD8:=multiply(C,B):
> DD9:=matrix(m,n,0):
> DD9 := matrix([[0, 0, 0], [0, 0, 0]]):
> DD9:=multiply(diagbeta,DD8):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do C3T[i,j]:=DD5[i,j]+DD7[i,j]-DD9[i,j]: od od:

```

```

> print(C3T):
> print(C1T):print(C2T):print(C3T):
> # Завершение построения матриц C1T,C2T,C3T
> # Построение области R на основе преобразования координат (поворотов)
> graph1:=matrix(inn,1):graph2:=matrix(inn,1):
> graph3:=matrix(inn,1):graph4:=matrix(inn,1):
> alpha1:=0:
> alpha2:=6.28:
> alpha:= alpha1:
> s := 0:
> #i:=3;j:=7:
> #J:=matrix[2,2,1]:
> #if i<>j then J[i,j]:=0 end if:
> #print(J):
> #текст для отладки алгоритма
> for i from 1 to inn do print(i);alpha:=alpha1:if alpha<alpha2 then pp:=cos(alpha) end if:if alpha<alpha2 then
qq := sin(alpha) end if;ff1:=C1T[1,1]*pp*pp-
(C1T[1,2]+C1T[2,1])*qq*pp+C1T[2,2]*qq*qq;ff2:=C2T[1,1]*rk1*pp^4-C1T[1,2]*rk1*qq*pp*pp*pp-
C2T[2,1]*rk2*qq*qq*qq*pp+C2T[2,2]*rk2*qq^4;ff3:=C3T[1,1]*rk1*pp^6-
(C3T[1,2]+C3T[2,1])*rk1*rk1*qq*qq*qq*pp*pp*pp+C3T[2,2]*rk2*rk2*qq^6:graph1[i,1]:=alpha:zz :=
ff2*ff2-4*ff1*ff3:ym:=0:ymm:=0:ymmm:=0:yq:=0:yp:=0:if zz<0 then graph2[i,1]:=0: i:=inn: end if:if(zz>0)
then yp:=(-ff2+sqrt(zz))/(2*ff3) end if:if(zz>0) then yq:=(-ff2-sqrt(zz))/(2*ff3) end if:if (yq<yp) then ym:=yq
end if:if (ym>0) then ymm:=ym end if:if (ym<0) then ymmm:=0 end if:if (yq>0) then ymmm:=yq end if:if
(yp<yq) then ym:=yp end if:if (ym>0) then ymm:=ym end if:if (ym<0) then ymmm:=0 end if:if (yq>0) then
ymmm:=yq end if:graph2[i,1] :=
ymmm:graph3[i,1]:=graph2[i,1]*cos(alpha):graph4[i,1]:=graph2[i,1]*sin(alpha):s :=
graph2[i,1]+s:alpha:=alpha+hrrr:od: # конец цикла inn
> #alpha1:=.628:# для отладки
> #alpha:=alpha1:
> #if alpha<alpha2 then pp:=cos(alpha) end if:
> #print(pp):
> #if alpha<alpha2 then qq := sin(alpha) end if:
> #print(qq):
> #ff1:=C1T[1,1]*pp*pp-(C1T[1,2]+C1T[2,1])*qq*pp+C1T[2,2]*qq*qq:
> #ff2:=C2T[1,1]*rk1*pp^4-C1T[1,2]*rk1*qq*pp*pp*pp-C2T[2,1]*rk2*qq*qq*qq*pp+C2T[2,2]*rk2*qq^4:
> #ff3:=C3T[1,1]*rk1*rk1*pp^6-
(C3T[1,2]+C3T[2,1])*rk1*rk1*qq*qq*qq*pp*pp*pp+C3T[2,2]*rk2*rk2*qq^6:
> #graph1[i,1]:=alpha:
> #zz := ff2*ff2-4*ff1*ff3:
> #ym:=0:ymm:=0:ymmm:=0:yq:=0:yp:=0:
> #if zz<0 then graph2[i,1]:=0: i:=inn: end if:
> #if(zz>0) then yp:=(-ff2+sqrt(zz))/(2*ff3) end if:
> #if(zz>0) then yq:=(-ff2-sqrt(zz))/(2*ff3) end if:
> #print(zz):print(ff1):print(ff2):print(ff3):
> #if (yq<yp) then ym:=yq end if:
> #print(ym):
> #if (ym>0) then ymm:=ym end if:
> #print(ymm):
> #if (ym<0) then ymmm:=0 end if:
> #print(ymmm):
> #if (yq>0) then ymmm:=yq end if:
> #print(ymmm):
> #####if (ym>0) then ymm:=ym else ym:=yp end if:
> #####if (ym>0) then ymm:=ym else i:=inn end if:
> #if (yp<yq) then ym:=yp end if:
> #print(ym):
> #if (ym>0) then ymm:=ym end if:

```

```

> #print(ymm):
> #if (ym<0) then ymmm:=0 end if:
> #print(ymmm):
> #if (yq>0) then ymmm:=yq end if:
> #print(ymmm):
> #####if (ym>0) then ymm:=ym else ym:=yp end if:
> #####if (ym>0) then ymm:=ym else i:=inn end if:
> #graph2[i,1] := ymmm:
> #graph3[i,1]:=graph2[i,1]*cos(alpha):
> #graph4[i,1]:=graph2[i,1]*sin(alpha):
> # формирование критерия оптимальности оценки ОП S
> #s := graph2[i,1]+s:
> #alpha:=alpha+hrrr:
> #print(alpha):
> #print(hrrr):
> #od: # конец цикла inn
> #print(graph1):
> #for i from 1 to inn do print(i):print(graph1(i,1)):print(graph2(i,1)):print(graph3(i,1)):print(graph4(i,1)): od:
> zzn:=s:
> # конец блока построения области R с формированием критерия s
> # Оптимизация оценки O
> ig:=n+m:
> xy:=matrix[ig]:yx:=matrix[ig]:yyx:=matrix[ig]:
> # алгоритм безусловной оптимизации
> ss := 0:
> for i from 1 to n3 do gr[i]:=0 od:
> for i from 1 to n do xy[i]:=G[i,i] od:
> for i from 1 to m do
> ii:=n+i: xy[ii] :=diagbeta[i,i] od:
> for i from 1 to n3 do yx[i]:=xy[i] od:
> # вычисление градиента
> # отладка вычисления градиента
> #for ig from 1 to n3 do yx[ig]:=xy[ig]+dx*xy[ig]
> for ii from 1 to n do Gi[ii,ii]:=yx[ii] od:
> for ii from 1 to m do i1:=n+ii: beti[ii,ii]:=xy[ii] od:
> for ii from 1 to n do G[ii,ii]:=Gi[ii,ii] od:
> for ii from 1 to m do diagbeta[ii,ii]:=beti[ii,ii] od:
> print(Gi):
> # решение матричного уравнения Ляпунова  $G=AT*P+PA$  без экономии памяти
> n1:=n*n:
> for i from 1 to n1 do for j from 1 to n1 do
> An[i,j] := 0 od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for j from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> i1 := k+(i-1)*n:
> i2 := k+(j-1)*n:
> An[i1,i2]:=A[j,i]:
> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> for L from 1 to n do
> i1:=k+(i-1)*n:
> i2:=L+(i-1)*n:
> An[i1,i2]:=An[i1,i2]+A[L,k]:

```

```

> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do i1 := j+(i-1)*n:
> Gd[i1,1]:=G[i,j]: od od:
> print(Gd):
> # решение системы линейных алгебраических уравнений
> Anr := inverse(An):
> N:=multiply(An,Anr):
> Gdr:=multiply(Anr,Gd):
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do
> kq := j+(i-1)*n: P[i,j] := Gdr[kq,1]: od od:
> print(P):
> # завершение решения матричного уравнения Ляпунова
> # построение матриц C1T,C2T,C3T
> # построение матрицы C1T
> # Обращение матр.G
> G1:=inverse(G):
> # C*G1
> # Fr1:=multiply(C,G1);
> Q1:=multiply(C,G1);#m*n
> # транспонир.C
> Ct:=transpose(C);
> # Fr1*Ct
> # Fr2:=multiply(Fr1,Ct);
> C1T := multiply(Q1,Ct);
> # обращение C1T
> C1T:=inverse(C1T);
> # C1T=-C1T
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C1T[i,j] := -C1T[i,j] od od;
> print(C1T);
> # построение матрицы C2T
> R1:=multiply(P,B); At:=transpose(A);
> R2:=multiply(At,Ct);
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do
> R2[i,j] := R2[i,j]/2 od od;
> print(R2);
> R2:=multiply(R2,diagbeta);
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do
> R1[i,j] := R1[i,j]+R2[i,j] od od;
> print(R1);
> P1 := multiply(Q1,R1);
> #C2T:=multiply(P1,C1T);
> C2T:=multiply(C1T,P1);
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C2T[i,j]:=2*C2T[i,j] od od;
> print(C2T);
> # построение матрицы C3T
P1T:=matrix(n,m,0);DD1:=matrix(n,m,0);DD2:=matrix(m,n,0);DD3:=matrix(m,n,0);
> DD4:=matrix(m,m,0);DD5:=matrix(m,m,0);
> P1T:=transpose(P1);
> #DD1:=matrix(n,m,0);
> #DD2:=matrix(m,n,0);
> #DD3:=matrix(m,n,0);
> DD3:=multiply(C1T,C);
> #DD4:=matrix(m,m,0);
> #DD5:=matrix(m,m,0);

```

```

> print(P1T);
> print(DD3);
> print(P1T);
> DD4:=multiply(P1T,C1T);
> D5:=multiply(DD4,P1);
> DD6:=matrix(n,m,0);
> DD6:=multiply(G1,R1);
> R1T:=transpose(R1);
> DD7:=matrix(m,m,0);
> DD7:=multiply(R1T,DD6);
> DD8:=matrix(m,n,0);
> DD8:=multiply(C,B);
> DD9:=matrix(m,n,0);
> DD9:=multiply(diagbeta,DD8);
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do C3T[i,j]:=DD5[i,j]+DD7[i,j]-DD9[i,j]; od od;
> print(C3T);
> print(C1T);print(C2T);print(C3T);
> # Завершение построения матриц C1T,C2T,C3T
> #построение области R на основе преобразования координат (поворотов)
> graph1:=matrix(inn,1);graph2:=matrix(inn,1);
> graph3:=matrix(inn,1);graph4:=matrix(inn,1);
> alpha1:=0;
> alpha2:=6.28;
> alpha:= alpha1;
> s := 0;
> for i from 1 to inn do print(i);alpha:=alpha1;if alpha<alpha2 then pp:=cos(alpha) end if;if alpha<alpha2 then
qq := sin(alpha) end if;ff1:=C1T[1,1]*pp*pp-
(C1T[1,2]+C1T[2,1])*qq*pp+C1T[2,2]*qq*qq;ff2:=C2T[1,1]*rk1*pp^4-C1T[1,2]*rk1*qq*pp*pp*pp-
C2T[2,1]*rk2*qq*qq*qq*pp+C2T[2,2]*rk2*qq^4;ff3:=C3T[1,1]*rk1*rk1*pp^6-
(C3T[1,2]+C3T[2,1])*rk1*rk1*qq*qq*qq*pp*pp*pp+C3T[2,2]*rk2*rk2*qq^6;graph1[i,1]:=alpha;zz :=
ff2*ff2-4*ff1*ff3;ym:=0;ymm:=0;ymmm:=0;yq:=0;yp:=0;if zz<0 then graph2[i,1]:=0; i:=inn; end if;if(zz>0)
then yp:=(-ff2+sqrt(zz))/(2*ff3) end if;if(zz>0) then yq:=(-ff2-sqrt(zz))/(2*ff3) end if;if (yq<yp) then ym:=yq
end if;if (ym>0) then ymm:=ym end if;if (ym<0) then ymmm:=0 end if;if (yq>0) then ymmm:=yq end if;if
(yp<yq) then ym:=yp end if;if (ym>0) then ymm:=ym end if;if (ym<0) then ymmm:=0 end if;if (yq>0) then
ymmm:=yq end if;graph2[i,1] :=
ymmm;graph3[i,1]:=graph2[i,1]*cos(alpha);graph4[i,1]:=graph2[i,1]*sin(alpha);s :=
graph2[i,1]+s;alpha:=alpha+hrtrr;od; # конец цикла inn
> # конец блока построения области R с формированием критерия s
> # формирование текущих значений критерия оптимальности
> gr[ig]:=(zzz-zzzn)/dx;
> ss:=ss+gr[ig]*gr[ig];
> yyx[ig]:=yx[ig]/(1+dx);
> yx[ig]:=yyx[ig];
> ss1:=sqrt(ss);
> ss := ss1;
> step := hh;
> eps:=.00000001;
> # выход из процесса оптимизации по нулевому градиенту
> # if(ss<eps) then print(выход из процесса оптимизации по нулевому градиенту) end if;
> if(ss>=eps) then
> ic:=0 end if;
> # *****
> # шаги в диалоговом режиме
> # шаги по градиенту
> ic:=0;
> for i from 1 to n3 do
> yx[i]:=yx[j]+step*gr[i] od;

```

```

> for ii from 1 to n do
> G[ii,ii]:=yx[ii] od;
> for ii from 1 to m do
> i1:=n+ii;diagbeta[ii]:=yx[i1] od;
> # решение матричного уравнения Ляпунова  $G=AT*P+PA$  без учета симметрии
> n1:=n*n;
> print(n1);
> for i from 1 to n1 do for j from 1 to n1 do An[i,j] := 0 od od:
> for i from 1 to n do
> for j from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> i1 := k+(i-1)*n;
> i2 := k+(j-1)*n;
> An[i1,i2]:=A[j,i];
> od od od:
> print(An);
> for i from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> for L from 1 to n do
> i1:=k+(i-1)*n;
> i2:=L+(i-1)*n;
> An[i1,i2]:=An[i1,i2]+A[L,k];
> od od od:
> print(An);
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do i1 := j+(i-1)*n;
> Gd[i1,1]:=G[i,j]; od od;
> print(Gd);
> # решение системы линейных алгебраических уравнений
> Anr := inverse(An);
> AN:=multiply(An,Anr);
> Gdr:=multiply(Anr,Gd);
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do
> kq := j+(i-1)*n; P[i,j] := Gdr[kq,1]; od od:
> print(P);
> rab:=matrix(n,n,0):rab1:=matrix(n,n,0):rab2:=matrix(n,n,0):
> # проверка_решения_матричного_уравнения
> rab:=multiply(AT,P);
> rab1:=multiply(P,A);
> print(rab):print(rab1):print(rab2):
> for ii from 1 to n do for jj from 1 to n do cccc:=rab[ii,jj]+rab1[ii,jj]:rab2[ii,jj]:=cccc; od od:
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do rab[i,j]:=rab2[i,j]-G[i,j]; od od:
> print(rab):
> # завершение решения матричного уравнения Ляпунова
> # построение матриц C1T,C2T,C3T
> # построение матрицы C1T
> G1:=inverse(G):
> Q1:=multiply(C,G1):#m*n
> Ct:=transpose(C):
> C1T := multiply(Q1,Ct):
> C1T:=inverse(C1T):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C1T[i,j] := -C1T[i,j] od od:
> print(C1T):
> # построение матрицы C2T
> R1:=multiply(P,B): At:=transpose(A):
> R2:=multiply(At,Ct):
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do

```

```

> R2[i,j] := R2[i,j]/2 od od:
> print(R2):
> R2:=multiply(R2,diagbeta):
> for i from 1 to n do for j from 1 to m do
> R1[i,j] := R1[i,j]+R2[i,j] od od:
> print(R1):
> P1 := multiply(Q1,R1):
> #C2T:=multiply(P1,C1T):
> C2T:=multiply(C1T,P1):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do
> C2T[i,j]:=2*C2T[i,j] od od:
> print(C2T):
> # построение матрицы C3T
P1T=matrix(n,m,0):DD1:=matrix(n,m,0):DD2:=matrix(m,n,0):DD3:=matrix(m,n,0):
> DD4:=matrix(m,m,0):DD5:=matrix(m,m,0):
> P1T:=transpose(P1):
> #DD1:=matrix(n,m,0);
> #DD2:=matrix(m,n,0);
> #DD3:=matrix(m,n,0);
> DD3:=multiply(C1T,C):
> #DD4:=matrix(m,m,0);
> #DD5:=matrix(m,m,0);
> print(P1T):
> print(DD3):
> print(P1T):
> DD4:=multiply(P1T,C1T):
> D5:=multiply(DD4,P1):
> DD6:=matrix(n,m,0):
> DD6:=multiply(G1,R1):
> R1T:=transpose(R1):
> DD7:=matrix(m,m,0):
> DD7:=multiply(R1T,DD6):
> DD8:=matrix(m,n,0):
> DD8:=multiply(C,B):
> DD9:=matrix(m,n,0):
> DD9:=multiply(diagbeta,DD8):
> for i from 1 to m do for j from 1 to m do C3T[i,j]:=DD5[i,j]+DD7[i,j]-DD9[i,j] od od:
> print(C3T):
> print(C1T):print(C2T):print(C3T):
> # Завершение построения матриц C1T,C2T,C3T
> # построение текущего критерия оптимальности s
> # Построение области R на основе преобразования координат (поворотов)
> graph1:=matrix(inn,1);graph2:=matrix(inn,1);
> graph3:=matrix(inn,1);graph4:=matrix(inn,1);
> alpha1:=0;
> alpha2:=6.28;
> alpha:= alpha1;
> s := 0;
> #for i from 1 to inn do if alpha<alpha2 then pp:=cos(alpha) end if; print(pp);if alpha<alpha2 then qq :=
sin(alpha) end if;print(qq);ff1:=C1T[1,1]*pp*pp-(C1T[1,2]+C1T[2,1])*qq*pp+C1T[2,2]*qq*qq;
ff2:=C2T[1,1]*rk1*pp^4-C1T[1,2]*rk1*qq*pp*pp*pp-
C2T[2,1]*rk2*qq*qq*qq*pp+C2T[2,2]*rk2*qq^4;ff3:=C3T[1,1]*rk1*pp^6-
(C3T[1,2]+C3T[2,1])*rk1*rk1*qq*qq*qq*pp*pp*pp+C3T[2,2]*rk2*rk2*qq^6;graph1[i,1]:=alpha;zz :=
ff2*ff2-4*ff1*ff3;if zz<0 then graph1[i,2]:=0 else i:=inn end if;if(zz>=0) then yp:=(-ff2+sqrt(zz))/(2*ff3) end
if;ym := (-ff2-sqrt(zz))/(2*ff3);yp:=0;od;
> #i:=3;j:=7;
> #J:=matrix[2,2,1];

```

```

> #if i<>j then J[i,j]:=0 end if;
> #print(J);
> for i from 1 to inn do print(i):alpha:=alpha1;if alpha<alpha2 then pp:=cos(alpha) end if;if alpha<alpha2 then
qq := sin(alpha) end if;ff1:=C1T[1,1]*pp*pp-
(C1T[1,2]+C1T[2,1])*qq*pp+C1T[2,2]*qq*qq:ff2:=C2T[1,1]*rk1*pp^4-C1T[1,2]*rk1*qq*pp*pp*pp-
C2T[2,1]*rk2*qq*qq*qq*pp+C2T[2,2]*rk2*qq^4:ff3:=C3T[1,1]*rk1*rk1*pp^6-
(C3T[1,2]+C3T[2,1])*rk1*rk1*qq*qq*qq*pp*pp*pp+C3T[2,2]*rk2*rk2*qq^6;graph1[i,1]:=alpha:zz :=
ff2*ff2-4*ff1*ff3:ym:=0:ymm:=0:ymmm:=0:yq:=0:yp:=0;if zz<0 then graph2[i,1]:=0: i:=inn: end if;if(zz>0)
then yp:=(-ff2+sqrt(zz))/(2*ff3) end if;if(zz>0) then yq:=(-ff2-sqrt(zz))/(2*ff3) end if;if (yq<yp) then ym:=yq
end if;if (ym>0) then ymm:=ym end if;if (ym<0) then ymmm:=0 end if;if (yq>0) then ymmm:=yq end if;if
(yp<yq) then ym:=yp end if;if (ym>0) then ymm:=ym end if;if (ym<0) then ymmm:=0 end if;if (yq>0) then
ymmm:=yq end if;graph2[i,1] :=
ymmm;graph3[i,1]:=graph2[i,1]*cos(alpha);graph4[i,1]:=graph2[i,1]*sin(alpha):s :=
graph2[i,1]+s:alpha:=alpha+hrrr:od: # конец цикла inn
> zzz:=s;
> # конец блока построения области R с формированием критерия s
> if abs(zzz-zzzn)>0 then
> icc:=icc+1 end if;print(icc);
> if icc>ig then print(1,1,1,1,1,1,1,1,1) end if;
> print(icc);
> if icc<ig then
> zzzn:=zzz end if;print(zzz);
> for i from 1 to n3 do
> xy[i]:=yx[i] od;
> step:=step*.35;
> if step<eps then i:=0 end if;
> print(zzz);
> print(yx):
> # пошаговый результат
> for i from 1 to n do g(i,i):=yx(i) od:
> for i from 1 to m do diagbeta(i,i):=yx(n+i):od:
> print(G):
> print(diagbeta):
> # решение матричного уравнения Ляпунова G=AT*P+PA без экономии памяти
> n1:=n*n:
> for i from 1 to n1 do for j from 1 to n1 do
> An[i,j] := 0 od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for j from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> i1 := k+(i-1)*n:
> i2 := k+(j-1)*n:
> An[i1,i2]:=A[j,i]:
> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do
> for k from 1 to n do
> for L from 1 to n do
> i1:=k+(i-1)*n:
> i2:=L+(i-1)*n:
> An[i1,i2]:=An[i1,i2]+A[L,k]:
> od od od:
> print(An):
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do i1 := j+(i-1)*n:
> Gd[i1,1]:=G[i,j]: od od:
> print(Gd):

```

```

> # решение системы линейных алгебраических уравнений
> Anr := inverse(An);
> N:=multiply(An,Anr);
> Gdr:=multiply(Anr,Gd);
> for i from 1 to n do for j from 1 to n do
> kq := j+(i-1)*n; P[i,j] := Gdr[kq,1]; od od;
> print(P);

```

$$\begin{bmatrix} 225.7744062 & 209.3738966 & 0. \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```

> # завершение решения матричного уравнения Ляпунова
> # конец оптимизации
> # *****

```

Алгоритмическая реализация блока на закрытие задвижки для подачи пара в змеевики емкостей

E_1 и E_2

Данный процесс представляет собой некоторый алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких условий или предпосылок с использованием понятий нечеткой логики. Этот процесс соединяет в себе все основные концепции теории нечетких множеств: функции принадлежности, лингвистические переменные, нечеткие логические операции, методы нечеткой импликации и нечеткой композиции. Четыре основных этапа:

1. Блок фаззификации (БФЗ) (рис. П.1.6).
2. Блок знаний (БЗ). (рис. П.1.9).
3. Обработка правил. (рис. П.1.10).
4. Блок дефаззификация (БДФ) и вычисление выходного показателя (рис. П.1.11).

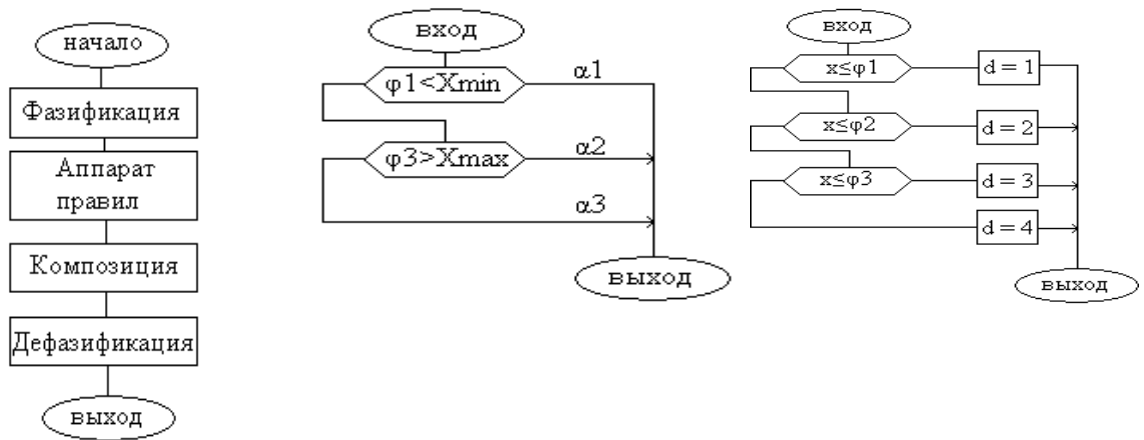


Рисунок П.1.6

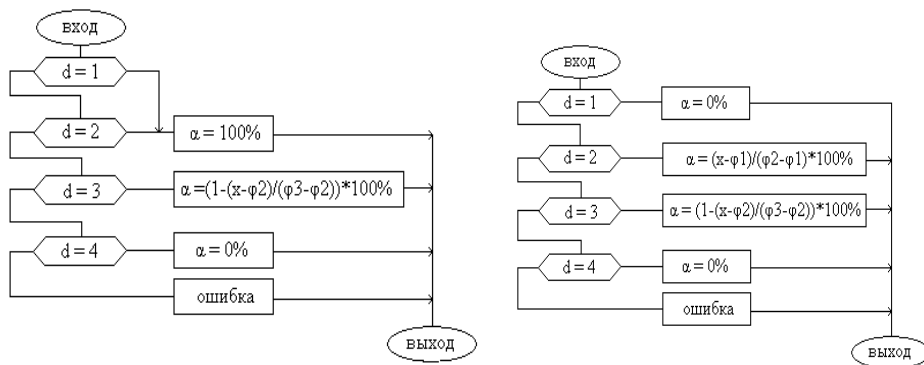


Рисунок П.1.7

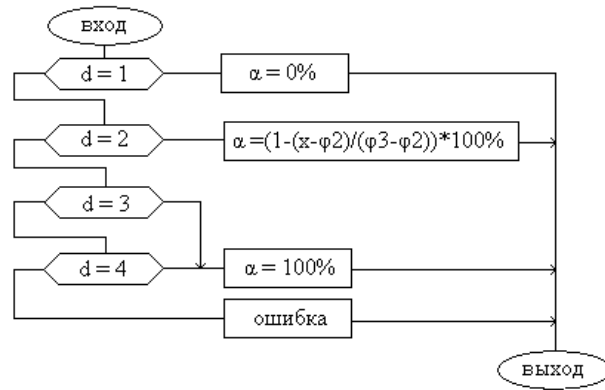


Рисунок П.1.8



Рисунок П.1.9

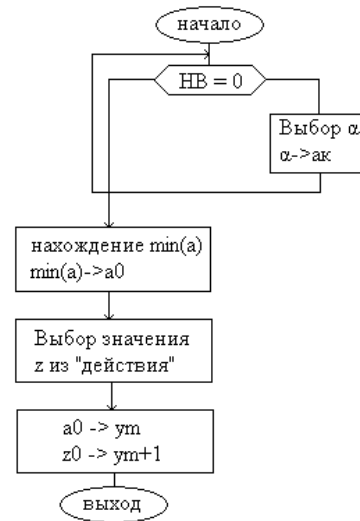


Рисунок П.1.10

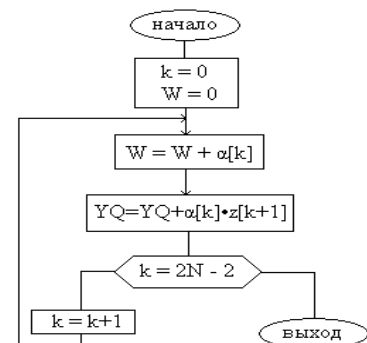
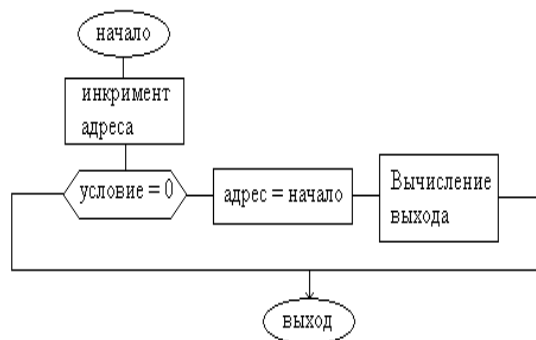


Рисунок П.1.11

Продолжение приложения 4

Нечеткий алгоритм регулирования температуры потоков нефти с соответствующими правилами и лингвистическими переменными представлен в программе:

```
[System]
Name='tempUPSVN'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=8
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
[Input1]
Name='temp'
Range=[0 20]
NumMFs=3
MF1='ZR':'gaussmf',[3.398 0]
MF2='NB':'gaussmf',[3.398 10]
MF3='PB':'gaussmf',[3.398 20]
[Input2]
Name='rate'
Range=[-10 10]
NumMFs=3
MF1='ZR':'gaussmf',[3.397 -10]
MF2='NB':'gaussmf',[3.397 -0.05291]
MF3='PB':'gaussmf',[3.397 10]
[Input3]
Name='On/Off'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Off':'gaussmf',[0.17 0.723]
MF2='On':'gaussmf',[0.17 0.217]
[Output1]
Name='y'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='NB':'trimf',[-1 -0.862405200433369 -0.75]
MF2='NM':'trimf',[-0.65 -0.5 -0.35]
MF3='ZR':'trimf',[-0.15 0 0.15]
MF4='PM':'trimf',[0.35 0.5 0.6]
MF5='PB':'trimf',[0.75 0.854 1]
[Rules]
1 1 0, 1 (1) : 1
3 0 0, 5 (1) : 1
2 0 0, 1 (1) : 1
1 3 0, 2 (1) : 1
1 2 0, 4 (1) : 1
-1 1 1, 4 (1) : 1
-1 1 2, 4 (1) : 1
-1 2 2, 2 (1) : 1
```

«ТАТНЕФТЬ» ААЖ



ОАО «ТАТНЕФТЬ»

«НОРЛАТНЕФТЬ»
НЕФТЬ-ГАЗ
ЧЫГАРУ ИДАРӘСЕНЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЕ
УПРАВЛЕНИЕ
«НУРЛАТНЕФТЬ»Советская ур., 100, Норлат шәһәре,
Татарстан Республикасы, 423040ул. Советская, 100, г. Нурлат,
Республика Татарстан, 423040

Телефон: 8(4345) 2-32-84, факс: 8(4345) 9-00-55
 р/с 40702810100000000700 в Акционерном банке «Девон-Кредит» г. Альметьевск БИК 049202792,
 к/с 30101810400000000792 в РКЦ г. Альметьевска, БИК 04920200, ИНН 1644003838

« 28 » 05 2015 г. № 11198/ЮнСм(120)

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер – первый заместитель
 начальника управления по производству
 НГДУ «Нурлатнефть»



Р.Н. Ахмадиев

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Горшковой Кристины Леонидовны «Системный анализ и автоматическое управление процессом транспортировки вязкой нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, которые были использованы при совершенствовании системы управления температурным режимом технологического процесса предварительной подготовки сверхвязкой нефти в НГДУ «Нурлатнефть».

В результате натурных исследований технологического процесса изменения температурного режима при предварительной подготовке сверхвязкой нефти были получены зависимости изменения вязкости от температуры сверхвязкой нефти и изменения потребляемой мощности насоса от плотности потока перекачиваемой нефти. На основе полученных результатов экспериментальных исследований разрабатывалась стратегия дальнейшего совершенствования технологического процесса предварительной подготовки сверхвязкой нефти.

Практическая реализация представленной работы заключается в снижении количества пара на обогрев емкостей при предварительной подготовке сверхвязкой нефти, и электроэнергии на транспортировку сверхвязкой нефти за счет использования рациональной системы управления технологического процесса и его алгоритма управления с нечеткой логикой.

Руководство НГДУ «Нурлатнефть» отмечает целесообразность дальнейшего развития и использования положений, разработок и практической рекомендации кандидатской диссертации Горшковой К.Л. в структурных предприятиях ОАО «Татнефть».

Начальник технического отдела

А.Ф. Шигапов

Продолжение приложения 5

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ГБОУ ВПО «Альметьевский
государственный нефтяной институт»

док.соц.наук., профессор


 А.А. Емекеев

« 24 » октября 2014 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
ассистента кафедры автоматизации и информационных технологий АГНИ
Горшковой Кристины Леонидовны

**«Системный анализ и автоматическое управление процессом
транспортировки вязкой нефти»**, представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Акт подтверждает, что результаты, полученные Горшковой К.Л., по исследованию нечеткого алгоритма для объектов подготовки и транспортировки нефти используются в учебном процессе (лекционные, лабораторные, практические занятия и дипломное проектирование) АГНИ при работе со студентами специальностей 15.03.04 (220700) «Автоматизация технологических процессов и производств» и 27.03.04 (220400) «Управление в технических системах». В учебный процесс внедрены разработанные автором функционально-ориентированная модель, алгоритмы управления и идентификации температурой потока смешанной нефти, программное обеспечение теплового процесса подготовки потока вязкой нефти, что способствовало повышению качества подготовки студентов, изучающих автоматизацию теплотехнических процессов.

Проректор по научной работе,
к.г.-м.н., доцент



Р.Н. Бурханов

Заведующий кафедрой автоматизации
и информационных технологий,
к.э.н.



Р.Р. Ахметзянов