Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Информационные системы»
Специальность «Информационные системы»

Допущен к защите
Зав. кафедрой ИС
Имангалиев Ш.И.
«____»_____2014 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

Тема « Разработка и исследование автоматизированных информационных систем процесса подготовки пара»

Магистрант Мусабекова Ж.А.

Руководитель диссертации Имангалиев Ш.И.

Рецензент

Алматы, 2014 г.

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет «Информационные технологии»
Специальность «Информационные системы»
Кафедра «Информационные системы»

ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Мусабековой Жадре Адилбековне.

Тема диссертации «Разработка и исследование автоматизированных информационных систем процесса подготовки пара»
утверждена Ученым советом университета №___ от «___»_____
Срок сдачи законченной диссертации «___»_____

Цель исследования а) создание единой методики управления динамическими процессами в паровом котле основанной на методах оптимального управления;

б) создание динамических математических моделей элементов котельного агрегата и модели котла в целом, которые могут быть использованы для решения задач оптимизации динамических процессов в котле;

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

Данная диссертационная работа состоит из 4-х разделов. В первом разделе диссертационной работы показан анализ автоматизации процессов управления технологическими процессами барабанного котла ТЭЦ.

Во втором разделе представлено описание системы автоматизации барабанного котла, на основании стабилизации параметров, выявленных в первом разделе, описано применяемое оборудование, и программное обеспечение для реализации системы автоматизации.

В третьем разделе приведено исследование контура регулирования температурой перегретого пара.

В четвертом разделе были представлены эскизы написанной программы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка литературы, содержащего 31 наименование. Общий объем работы 71 страницы. Работа содержит 35 рисунка.

Рекомендуемая основная литература:

1. Мадоян А.А., Моргунова В.А. Повышение эффективности использования котлов, работающих на углях марки АШ в режимах переменных нагрузок. Теплоэнергетика. - 2002. - №4. - С. 21 - 24.
2. Автоматическое управление теплоэнергетическими установками электростанций (техническая кибернетика в теплоэнергетике), М.: Энергия, 1968.-91с.
3. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики: Учебное пособие . Липатников Г.А., Гузеев М.С. 2007 г. - 136 с.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
В первой главе данной работы приведены основные этапы развития теории автоматического управления и теории решения задач оптимального управления. Во второй главе представлены описания моделей элементов котла	10.10.2013 год	
	08.12.2013 год	
В третьей главе описано создание единых методов управления динамическими процессами в паровом котле, основанной на методах оптимального управления.	03.03.2014 год	
В четвертой главе рассмотрены примеры применения разработанных методов для динамического процесса изменения нагрузки парового котла ТГМ-84	10.05.2014 год	

Дата выдачи задания_____

Заведующий кафедрой_____(_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации_____(_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению
магистрант _____(_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Аңдатпа

Берілген диссертациялық жұмыс 4 бөлімнен тұрады. Дипломдық жұмысының бірінші бөлімінде ЖЭО-ның барабанды қазанның технологиялық процестерін басқарудың автоматтандыру процесінің талдауы көрсетілген.

Жұмыстың екінші бөлімінде барабанды қазанның автоматтандыру жүйесінің жазбасы ұсынылған, автоматтандыру жүйесін іске асыру үшін бағдаралмалаумен қамтамасыз ету және контроллерді құрылғының қолдануы сипатталады.

Үшінші бөлімде қыздырылған будың температура жобасы реттеуінің зерттеуі берілген.

Төртінші бөлімде қарастырылған бағдарламаның сұлбалары көрсетілген.

Аннотация

Данная диссертационная работа состоит из 4-х разделов. В первом разделе диссертационной работы показан анализ автоматизации процессов управления технологическими процессами барабанного котла ТЭЦ.

Во втором разделе представлено описание системы автоматизации барабанного котла, на основании стабилизации параметров, выявленных в первом разделе, описано применяемое оборудование, и программное обеспечение для реализации системы автоматизации.

В третьем разделе приведено исследование контура регулирования температурой перегретого пара.

В четвертом разделе были представлены эскизы написанной программы.

Annotation

This thesis consists of 4 sections. The first section of the thesis shows the analysis of process automation process control drum boiler CHP.

The second section describes the automation system of the boiler drum based on stabilization of the parameters identified in the first section describes the equipment used, and software for the implementation of the automation system.

In the third section provides research loop temperature of the superheated steam.

Содержание

Введение 6
1 Основные этапы развития теории автоматического управления
1.1 Теории решения задач оптимального управления 9
1.2 Классификация систем автоматического управления регуляторов 12
1.3 Технологические схемы систем автоматического регулирования парового котла 13
1.4 Методы математического моделирования элементов котельных агрегатов 19
2 Математические модели элементов парового котла
2.1 Описание процесса получения пара 24
2.2 Системы автоматического регулирования барабанных котлов 26
2.2.1 Система регулирования качества горения топлива 26
2.2.2 Система регулирования разрежения в топке котла 28
2.2.3 Система регулирования в барабане котла 29
2.3 Математическая модель трубчатого воздухоподогревателя 30
3 Методика математического моделирования процесса получения пара
3.1 Постановка задачи оптимального управления процессом изменения нагрузки котла 32
3.2 Сведение задачи оптимального управления к задаче нелинейной программирования 34
3.3 Переход к задаче линейного программирования 36
4 Использование методиками управления динамическими процессами изменения нагрузки парового котла ТП-81
4.1 Общая характеристика математической модели котла ТП-81 39
4.2 Разработка программного обеспечения нижнего уровня парового котла 41
4.3 Разработка программного обеспечения верхнего уровня парового котла 53
4.3.1 Расчет цифрового регулятора инженерным методом для выбранного объекта по его характеристикам 53
4.3.2 Снятие графиков зависимостей поведения объекта от настроек регулятора 55
Заключение 59
Список литературы 60

Введение

Автоматизация играет решающую роль при организации промышленного производства по принципу: выпуск заданного количества продукции при минимуме материальных затрат и затрат ручного труда. В особенности актуальной автоматизация становится в отраслях промышленности, конечная продукция которых находит массовый спрос у потребителя и используется практически во всех производственных процессах. К таким отраслям в полной мере относится энергетика.

Трудоемкие процессы, связанные с производством и распределением тепловой и электрической энергии на современных ТЭЦ, в основном механизированы, и труд человека состоит в том, чтобы управлять машинами, механизмами и установками и наблюдать за их работой непосредственно или по измерительным приборам.

Автоматизацией механизированного производства называют управление машинами, механизмами и установками, а также контроль за их работой с помощью специальных устройств при ограниченном участии человека или без него. Теплоэнергетика, отличающаяся широкой механизацией технологических процессов, высокими параметрами рабочей среды, требованиями к точности их регулирования, а также наличием собственного источника энергии, является той же областью науки и техники, где постоянно находят приложение методы теории и средства автоматического управления.

Применительно к регуляторам тепловых процессов разрабатываются новые методы расчета настроек, находящие затем широкое применение при внедрении автоматических систем общепромышленного назначения.

Автоматизация ТЭЦ осуществляется на основе комплекса технических средств, позволявших выполнять дистанционное управление регулирующими и запорными органами, автоматическое регулирование, контроль и сигнализацию технологических параметров, удаленную визуализацию технологического процесса, а также автоматическую защиту теплового оборудования.

В Казахстане, как и в большинстве стран мира, определяющую роль в структуре производства электроэнергии (примерно 70 %) и тепла играют тепловые электростанции на органическом топливе, в том числе использующие твердое топливо [1]. В настоящее время в Казахстане актуальна проблема обеспечения качества электроэнергии и повышения маневренности ТЭС, улучшения надежности работы оборудования в нестационарных режимах.

В процессе эксплуатации происходит изменение режимов работы оборудования ТЭС. Это связано с изменением тепловых и электрических нагрузок, изменением температуры наружного воздуха, изменением состава сжигаемого топлива (особенно для угольных ТЭС), изменением состава работающего оборудования в связи с аварийными отказами и рядом других причин. Топливная и экономическая эффективность ТЭС, отдельных ее

элементов, а так же их надежность во многом зависит от эффективности управления динамическими процессами в энергетическом оборудовании. Были разработаны принципы автоматического управления и созданы автоматические регуляторы, обеспечивающие управление динамическими процессами в широком диапазоне нагрузок. Вместе с тем, используемые методы регулирования процессов в паровых энергетических котлах имеют существенные недостатки.

Это связано с тем, что формирование управляющих воздействий для изменения нагрузки и поддержания требуемых параметров котла осуществляется с помощью системы регуляторов, работающих по заранее заданным, достаточно простым законам регулирования [3,4,5]. Использование таких регуляторов не позволяет осуществлять принцип оптимального управления, так как при этом не учитывается совместное влияние всех параметров состояния котла, динамика изменения температуры металла, не обеспечивается минимальный расход топлива в переходном процессе и нахождение всех параметров котла в допустимых пределах. Переход на более эффективные методы управления динамическими процессами в энергооборудовании, основанные на методах оптимального управления, был невозможен из-за недостаточных вычислительных ресурсов компьютерной техники для решения задачи в реальном времени [6]. В последние годы производительность вычислительной техники значительно выросла и появилась возможность решения таких задач. В настоящее время проблема состоит в практически полном отсутствии методических, алгоритмических и программных разработок, реализующих методы оптимального управления для объектов теплоэнергетики. Этим обусловлена актуальность, научная новизна и практическая значимость предлагаемой работы.

Целью данной диссертационной работы является:

а) создание единой методики управления динамическими процессами в паровом котле основанной на методах оптимального управления;

б) создание динамических математических моделей элементов котельного агрегата и модели котла в целом, которые могут быть использованы для решения задач оптимизации динамических процессов в котле;

в) иллюстрация применения созданной методики на примерах оптимизации динамических процессов в реальном котле.

Научная новизна работы состоит в получении впервые и вынесении на защиту следующих результатов работы:

а) постановка задачи оптимального управления динамическими процессами в котельном агрегате, базирующаяся на сочетании его нелинейных и линейных математических моделей, создание динамической математической модели котельного агрегата для решения задачи оптимизации переходных процессов, трансформация задачи оптимального управления процессом изменения нагрузки котла к задаче нелинейного программирования с последующей линеаризацией этой задачи (что значительно сокращает время

ее решения);

б) разработка методики коррекции результатов линейной оптимизации динамического процесса с использованием подробной (нелинейной) модели котла и с использованием замеров регулируемых параметров на объекте управления;

в) иллюстрация разработанной методики оптимального управления динамическими процессами на примере котла ТП-81; сравнение качества управления работой котла при использовании для формирования управляющих воздействий системы ПИД регуляторов и разработанной методики.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный подход, эффективные алгоритмы и программы дают возможность использовать методику оптимизации динамических процессов в паровом котле, для управления объектом в режиме реального времени, что позволяет сократить расход топлива в динамических процессах, организовать динамический процесс таким образом, чтобы в ходе этого процесса параметры всех элементов котла находились в допустимых пределах, что повышает надежность работы и долговечность его элементов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка литературы, содержащего 31 наименование. Общий объем работы 71 страницы. Работа содержит 35 рисунка.

В *первой главе* данной работы приведены основные этапы развития теории автоматического управления и теории решения задач оптимального управления. Рассмотрены разновидности систем автоматического управления и различные виды регуляторов, используемых в настоящее время. Представлены схемы систем автоматического регулирования парового котла. Приведен исторический обзор методов математического моделирования элементов котельных агрегатов, как для статических, так и для динамических режимов.

Во *второй главе* представлены описания моделей элементов котла (конвективные, полурадиационные и радиационные теплообменники, барабан-сепаратор, воздухоподогреватель).

В *третьей главе* описано создание единой методики управления динамическими процессами в паровом котле, основанной на методах оптимального управления. Методика состоит из нескольких этапов. На первом этапе приводится математическая постановка задачи оптимального управления переходными процессами. На втором – сведения задачи оптимального управления к задаче нелинейного программирования.

В *четвертой главе* рассмотрены примеры применения разработанной методики для динамического процесса изменения нагрузки парового котла ТП-81. Предложена схема применения методики в качестве блока управления для процесса подготовки пара.

1 Основные этапы развития теории автоматического управления

1.1 Теории решения задач оптимального управления

При расчетах по управлению сложными техническими системами, в частности энергетическими установками, широкое применение находит теория автоматического управления (ТАУ) – совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющая спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ), связывающую технологические показатели работы оборудования и отвечающую заданным требованиям его работы. Системой автоматического управления является совокупность подлежащего регулированию агрегата или машины, то есть объекта управления и технических средств для управления регулируемым параметром, где вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специальных технических устройств: автоматического регулятора, программируемого контроллера или управляющей вычислительной машины, получающих входную информацию непосредственно от объекта управления в виде сигналов той или иной физической природы и немедленно реализующих результирующие воздействия на объекте [7,8].

Одними из первых работ по ТАУ были труды Д. Максвелла, И.А. Вышнеградского, где доказано, что исследование устойчивости работы машины, снабженной регулятором, можно свести к исследованию корней характерстического уравнения ее малых колебаний. А. Стодола распространил результаты работ И.А. Вышнеградского на регуляторы непрямого действия, где передвижение исполнительного механизма регулятора не сам чувствительный элемент, а особый двигатель – сервомотор, имеющий самостоятельный источник энергии [9]. Значительно более сложная проблема устойчивости нелинейных систем получила решающий сдвиг в результате исследований А.М. Ляпунова [10]. Им был опубликован метод исследования устойчивости движения. Сущность метода состоит в построении специального вида функций переменных состояния, получивших название функции Ляпунова.

Паровые котлы и турбины электрических станций характеризуются большим числом параметров, определяющих технологический процесс, и относятся к многомерным системам. При этом следует учитывать, что любое воздействие на реальный объект с целью изменения одного из его параметров можно вызвать изменение других. Так, изменение расхода топлива приведет к изменению практически всех регулируемых параметров. Объекты рассмотренного типа обычно представляют в виде динамических звеньев особой структуры, разделяющейся на основные каналы и перекрестные связи между ними. Основные каналы структуры объекта управления определяют функциональную связь входных сигналов объекта (сигналов управления) со своими выходными сигналами. Выбор отдельных функциональных связей в

качестве основных каналов носит в известной мере произвольный характер, не влияющий на последующий синтез, и зависит от конкретных технологических особенностей объекта. Так, например, канал связи между изменением расхода топлива и изменением давления свежего пара по смыслу относят к основным, изменение же температуры пара и уровня воды в барабане (для барабанных парогенераторов) под действием того же расхода топлива относят к его дополнительным влияниям и функциональные связи между этими параметрами считаются перекрестными. Одна из важных проблем таких систем – проблема автономности – была впервые исследована И.Н. Вознесенским [11]. Он предложил один из фундаментальных принципов проектирования многомерных систем управления, который обеспечивает автономность регулируемых переменных. Суть принципа заключается в установлении отдельными регуляторами многомерного объекта специально подобранных связей так, чтобы были скомпенсированы внутренние связи в объекте между регулируемыми величинами. В итоге многомерную систему регулирования можно рассматривать как некоторое число независимых одномерных систем. Принцип автономности успешно развивается в исследования М.В. Меерова [12], В.Т. Морозовского [13].

Важным этапом в развитии автоматического управления и прикладной математики стало применение оптимальных программ управления. Первые оптимальные программы управления тягой ракет были рассчитаны Гамелем в 1927 году. Задачи оптимального управления относятся к теории экстремальных задач. Развитие этой теории привело в XX веке к созданию линейного программирования, выпуклого анализа, математического программирования, теории минимакса и некоторых иных разделов, одним из которых является теория оптимального управления. Эта теория подобна другим направлениям теории экстремальных задач, возникла в связи с актуальными задачами автоматического регулирования в конце 40-х годов с возникновением задач, значительно отличавшихся от традиционных задач автоматического управления. В работе Б.Л. Давыдова [17] рассчитана наивыгоднейшая программа подъема грузов из рудников. Эти задачи – существенно нестационарные, поскольку время протекания процесса относительно мало. Выдающуюся роль в развитие теории оптимального управления сыграли Л.С. Понтрягин [18], который сформулировал принцип максимума, позволяющий с помощью множителей Лагранжа свести задачу оптимального управления к некоторой специальной краевой задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений. В связи со значительными трудностями построения аналитического решения задач оптимального управления, исключительное значение приобрели различные приближенные и численные методы их исследования. В зависимости от алгоритмической основы метода, он может быть отнесен к той или иной группе. В основе первой группы методов лежит возможность сведения задачи оптимального управления к краевой задаче для системы дифференциальных уравнений с помощью принципа максимума с последующим использованием различных

алгоритмов задания недостающих начальных условий. Ко второй группе численных методов относятся те , в которых ищется оптимальное управление с помощью итерационных процедур в пространстве управлений. При этом используются формулы для приращений критерия качества при вариации управления, приводящие либо к методам градиентного типа в пространстве управлений, либо к процедурам последовательных приближений. Третью группу составляют численные процедуры , основанные на переборе в пространстве траектории или методе динамического программирования. Кроме того, имеются методы, эффективные для конкретных классов систем , например для линейных, а также методы, основанные на сведении исходной задачи оптимального управления к задаче математического программирования. Сейчас теория оптимального управления переживает период бурного развития в связи с наличием трудных и интересных математических проблем в областях экономики, биологии, химии и др. [19,20].

1.2 Классификация систем автоматического управления регуляторов

Системы автоматического управления различают между собой как по сложности и свойствам объектов регулирования, так и по разновидности применяемых в них регуляторов. По принципу действия различают САУ по отклонению и САУ по возмущению и комбинированные САУ.САУ по отклонению – первая система управления уровнем воды в баке паровой машины, предложенная И.И. Ползуновым, функционально – структурная схема представлена на рисунке 1.1., где обозначено АР – автоматический регулятор, ОР – объект регулирования, g – задающее воздействие, *u* – управляющее воздействие на объект, *y* – выходная величина, являющаяся регулируемой величиной ОР.

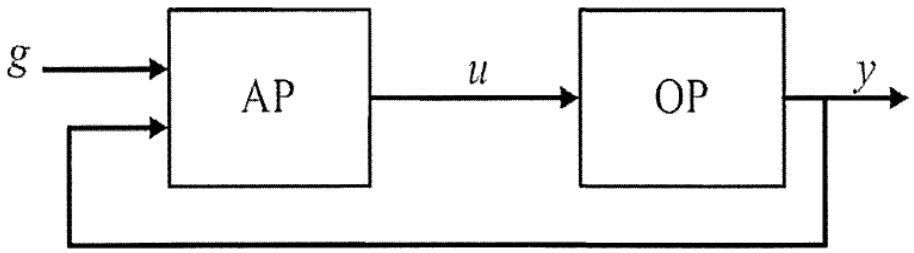


Рисунок 1.1 - САУ по отклонению.

В настоящее время данное схемное решение используется в 80…90 % промышленных САУ, т.к. позволяет компенсировать любое возмущающее воздействие, которое вызвало отклонение регулируемой величины, изменением через цепь отрицательной обратной связи значение входного сигнала. Недостатком такой САУ является сравнительно медленная реакция

на возмущение и возможность нарушения устойчивости даже при всех устойчивых элементах системы. САУ по возмущению – первая система управления по нагрузке на валу паровой турбины, предложенная Ж. Понселе [21], функционально - структурная схема представлена на рисунке 1.2:

где АР – автоматический регулятор;

ОР – объект регулирования;

g – задающее воздействие;

u – управляющее воздействие на объект;

y – выходная величина, являющаяся регулируемой величиной ОР;

v- возмущающее воздействие.

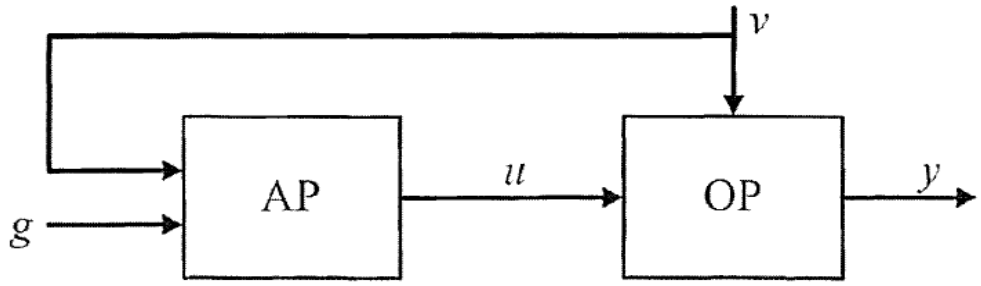


Рисунок 1.2 - САУ по возмущению

Достоинствам данной системы являются высокое быстродействие и устойчивость, недостатком – способность компенсировать только контролируемое возмущение, все остальные беспрепятственно влияют на регулируемую величину. Комбинированные САУ лишены многих недостатков предыдущих схем.

Автоматические регуляторы классифицируются по назначению, принципу действия, конструктивным особенностям, виду используемой энергии, характеру изменения регулирующего воздействия и т.п. По принципу действия они подразделяются на регуляторы прямого и непрямого действия. Регуляторы прямого действия не используют внешнюю энергию для процессов управления, а используют энергию самого объекта управления (регулируемой среды). Примером таких регуляторов являются регуляторы давления. В автоматических регуляторах непрямого действия для его работы требуется внешний источник энергии. По роду действия регуляторы делятся на непрерывные и дискретные. Дискретные регуляторы, в свою очередь, подразделяются на релейные, цифровые и импульсные. Главной особенностью цифровых регуляторов, с позиции влияния на процессы управления, является дискретный характер сигналов с которыми они оперируют. Это значит, что непрерывные сигналы поступающие с объекта управления, перед поступление в вычислитель квантуются по времени. Интервал квантования по уровню в современных вычислителях обычно оказывается ничтожно малым и его влиянием можно пренебречь. По виду используемой энергии регуляторы

подразделяются на электронные, пневматические, гидравлические, механические и комбинированные. Выбор регулятора по виду используемой энергии определяется характером объекта регулирования и особенностями автоматической системы. По закону регулирования , они делятся на двух- и трехпозиционные регуляторы (дискретные), типовые регуляторы (интегральные, пропорциональные, пропорционально-дифференциальные, пропорционально-интегральные и пропорционально – интегрально-дифференциальные регуляторы – сокращенно И-, П-, ПД- и ПИД-регуляторы), адаптивные и оптимальные регуляторы. Двухпозиционные регуляторы нашли широкое распространение благодаря своей простоте и малой стоимости. В системах автоматического регулирования могут использоваться самые различные типы регуляторов, однако доминирующее значение заняли П-, ПИ- и ПИД – регуляторы, алгоритмы работы которых определяются формулами:

$$\mu = -S_1\sigma \tag{1.1}$$

$$\mu = -S_1(\sigma + \frac{S_0}{S_1}\int_{\tau_0}^{\tau_s}\sigma d\tau) \tag{1.2}$$

$$\mu = -S_1(\sigma + \frac{S_0}{S_1}\int_{\tau_0}^{\tau_s}\sigma d\tau + \frac{S_2}{S_1}\sigma') \tag{1.3}$$

где μ - управляющее воздействие;

σ - относительное отклонение регулируемой величины S_0, S_1, S_2 - коэффициенты пропорциональности.

По виду выполняемых функций регуляторы подразделяются на регуляторы автоматической стабилизации, программные, корректирующие, регуляторы соотношения параметров и другие.

С повышением мощности установок по производству тепловой и электрической энергии быстро увеличивается количество регулируемых параметров и операций технологического цикла на ТЭС. Качественная работа всех агрегатов ТЭС не может быть обеспечена без контроля и автоматизации производства. Поэтому наряду с традиционными средствами контроля и автоматизации ТЭС все шире применяют управляющие вычислительные комплексы, основным элементом которых являются электронные вычислительные машины, микропроцессоры [22].

1.3 Технологические схемы систем автоматического регулирования парового котла

Основная цель управления котлом в эксплуатационных режимах состоит в выработке в каждый момент времени требуемого количества пара, определяемого режимом работы оборудования (паровые турбины и другие). Организация регулирования рабочих процессов в котле зависит от схемы станции и типа котла. Если произошло нарушение баланса в выработке пара и его потребления, то давление в магистрали и барабане котлов начнет изменяться. Скорость изменения давления в барабане котла зависит от

глубины небаланса и величины аккумулирующей способности котла. В соответствии с изменением давления регулирующие органы котла должны восстановить давление в магистрали путем соответствующего изменения тепловыделения в топке. При падении давления надо увеличить тепловую нагрузку топки, и при его росте – уменьшить. Импульсом для регулирования служит величина давления пара в магистрали, измеряемого чувствительным манометром М, который передается на регулятор топлива РТ (рисунок 1.3.).

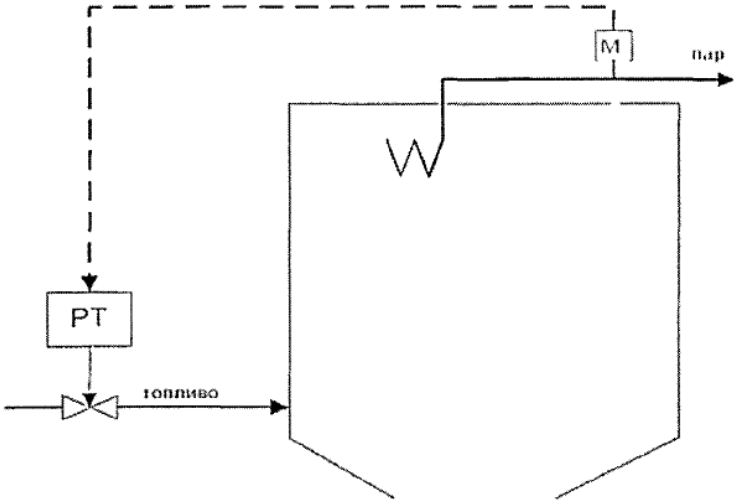


Рисунок 1.3 - Схема управления нагрузкой котла.

Конструкционные особенности барабанных паровых котлов позволяют расчленить многомерную систему регулирования их режимов на несколько относительно независимых систем, таких как: система регулирования качества процесса горения топлива, система стабилизации, уровня воды в барабане и система регулирования температуры перегретого пара.

Значение системы регулирования качества процесса горения топлива, заключается в поддержании необходимого избытка кислорода в конце топки и правильном распределении воздуха по отдельным горелкам. Величина оптимального избытка воздуха (кислорода) предварительно определяется специальными испытаниями котлоагрегата. Наиболее простой схемой реализации этой системы является подача воздуха в определенном соотношении с количеством химически связанного тепла топлива, вводимого в топку. Для газового и жидкого топлива это условие обеспечивается , если воздух подавать в количестве , пропорциональном расходу топлива. При использовании твердого топлива с этой целью используется импульс по «теплу». Такая схема регулирования заключается в поддержании соотношения «тепло - воздух». На регулятор воздуха РВ воздействуют импульсы по расходу пара П и скорости изменения давления М. В соответствии со значениями сигналов от этих импульсов регулятор воздуха переставляет регулирующие органы дутьевого вентилятора ДВ. Обратная связь

осуществляется по расходу воздуха , проходящего через воздухоподогреватель В. Таким образом, регулятор воздуха поддерживает заданное соотношение между тепловыделением в топке и подачей воздуха таким, чтобы обеспечить определенный избыток кислорода. При изменении свойств топлива регулятор настраивается на поддержание нового оптимального соотношения «тепло - воздух». Системой регулирования качества горения топлива тесно связана система регулирования разрежения . Система выполняется обычно как простая одноконтурная. Регулятор разряжения РР получает сигнал по разрежению в верхней части топки и воздействует непосредственно на изменение положения направляющих аппаратов дымососа ДС (рисунок 1.4.). Для устранения влияние регулятора подачи воздуха на разряжение в топки , регулирующее воздействие следует подавать не только на направляющий аппарат вентилятора, но и регулятора разряжения. Изменение положения направляющих аппаратов вентиляторов немедленно приводит в движение направляющие аппараты дымососов, так что разрежение в топке практически остается неизменными.

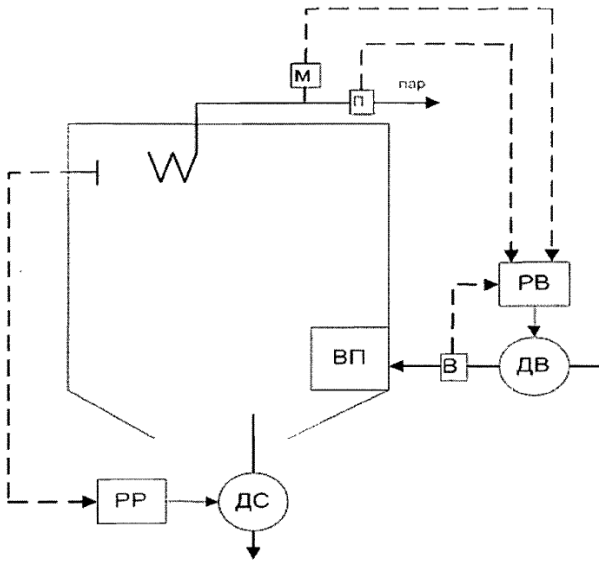


Рисунок 1.4 - Системы регулирования качества процесса горения топлива по принципу «тепло - воздух» и разряжения в топке

Другой схемой реализации, получивший название «топливо - воздух» , заключается в том, что на вход регулятора воздуха подается разность между действительным расходом воздуха и его заданным значением, которое вырабатывается в командном блоке в зависимости от расхода топлива по заранее составленной режимной карте. Другой вариант реализации подобной схемы использует существующую закономерность между качеством горения топлива и содержанием кислорода в уходящих газах, где главным регулятором является регулятор содержания кислорода, который воздействует на вспомогательный регулятор в составе схемы «топливо - воздух» (рисунок 1.5.).

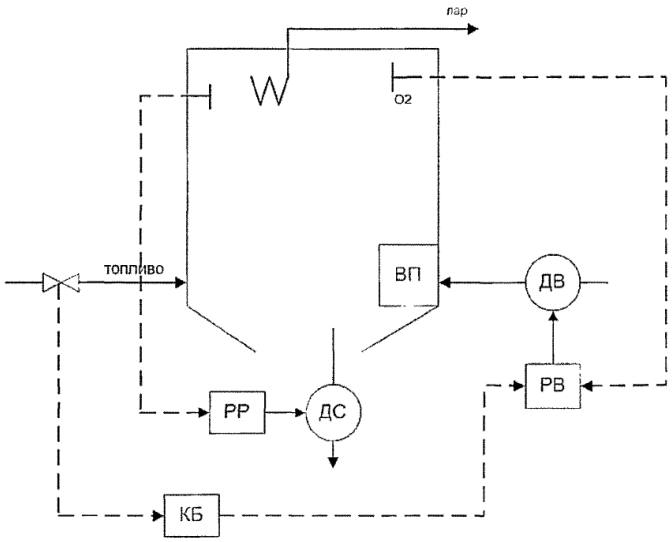


Рисунок 1.5 – Системы регулирования качества процесса горения топлива по принципу «топливо - воздух» и разряжения в топке

Система регулирования температуры перегретого пара. В барабанном котле температура пара изменяется вследствие перераспределения тепловосприятия между радиационными и конвективными поверхностями нагрева. Это имеет место при изменениях нагрузки, избытке воздуха и пр. Кроме того, температура пара может отклониться от среднего значения при резком изменении давления, так как соотношение между тепловосприятием и расходом пара при этом меняется. Основным средством регулирования перегрева служит пароохладитель ПО. В схеме системы регулирования температуры перегретого пара регулирующим воздействием является изменение положения клапана подачи охлаждающей воды на пароохладитель (рисунок 1.6.). Вспомогательной регулируемой величиной – температура пара непосредственно за пароохладителем Тпо, использование которой позволяет изолировать основную регулируемую величину Топ от возмущений, идущих от пароохладителя (самопроизвольные изменение расхода охлаждающей воды, изменение температуры пара на входе в пароохладитель). В проточном котле для поддержания температуры пара на заданном уровне надо выдержать определенное соотношение между тепловыделением в топке и расходом питательной воды. При нарушении этого соотношения, что имеет место обычно со стороны топлива, температура начнет изменяться. Для восстановления температуры перегретого пара надо или восстановить тепловыделение в топке, или изменить подачу воды соответственно новому значению тепловыделения.

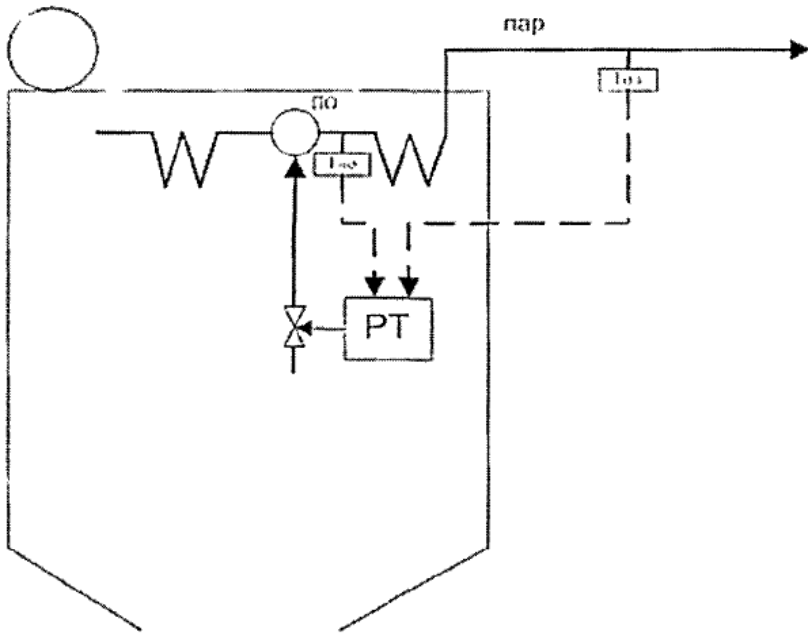


Рисунок 1.6 – Система регулирования температуры перегретого пара.

Система стабилизации уровня воды в барабане основана на использовании трех импульсов: уровня воды в барабане (основная регулируемая величина) Ур, расхода питательной воды (вспомогательная регулируемая величина) ПВ и расхода острого пара (возмущающее воздействие) П (рисунок 1.7.). Назначение сигнала от вспомогательной регулируемой величины состоит в устранении влияния возмущений, идущих со стороны питательного клапана (самопроизвольного изменения расхода питательной воды, обусловленного изменением давления воды и питательной магистрали), назначение сигнала от возмущения – устранение влияния на паровую нагрузку котла. Необходимость применения сравнительно сложной системы регулирования обусловлена наличием в современных котлах высокого давления своеобразного эффекта «вскипания» уровня. Сущность этого явления состоит в следующем. Пусть в какой-то момент времени происходит увеличение расхода перегретого пара от котла. Это должно было бы привести к падению уровня воды в барабане котла, однако в действительности сначала уровень воды в барабане котла, однако в действительности сначала уровень быстро возрастает «вскипает» и лишь спустя некоторое время начинает меняться в «правильном» направлении (уменьшаться). Объясняется это тем, что в экранных трубах и барабанах котлов высокого давления находится не вода, а пароводяная смесь, объем которой зависит от давления. Увеличение открытия клапана турбины приводит к немедленному падению давления над поверхностью испарения в барабане, объем пароводяной смеси увеличивается, что проявляется во временном увеличении уровня. Аналогичное явление, но в другом направлении при уменьшении расхода перегретого пара. Таким образом,

эффект «вскипания» уровня при отсутствии в системе регулирования сигнала по расходу пара привел бы к включению регулятора уровня в ложном направлении (при увеличении нагрузки он начал бы уменьшать подвод питательной воды в котел и , наоборот приуменьшении нагрузки - увеличивать); и хотя спустя некоторое время после исчезновения эффекта «вскипания», он начал бы работать в правильном направлении, исправить последствия начальной неправильной работы уже не удалось бы. Введение компенсирующего сигнала по расходу пара устраняет возможность ложных действий регулятора.

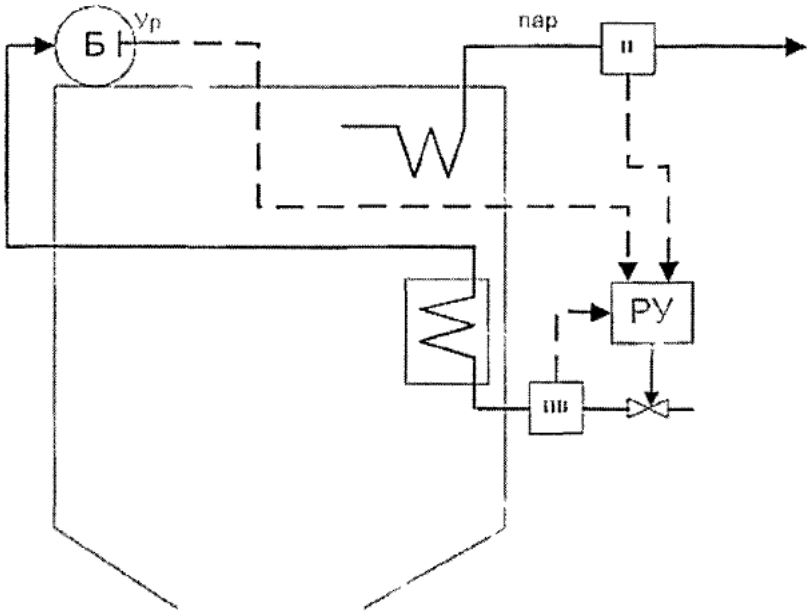


Рисунок 1.7 - Система стабилизации уровня воды в барабане котла.

В настоящее время для управления котельными агрегатами широкое применение находят автоматизированные системы управления на основе свободно программируемых и объектно-ориентированных или специализированных контроллеров [23]. На практике , как правило , задача управления контроллера расчленяется на два соподчиненных блока:

а) регулирующий, осуществляющий функции регулирования , т.е. устранение вредного влияние на достижение цели управления неконтролируемых возмущение, действующих на объект:

б) командный, вырабатывающий командное воздействие на регулятор таким образом, чтобы была достигнута цель управления [24]. Такие контроллеры реализуют позиционные , либо типовые законы регулирования и фактически не требует использования математических моделей объекта регулирования , т.е. они реализует традиционные принципы регулирования на современной элементной базе [26].

1.4 Методы математического моделирования элементов котельных агрегатов

Работы по созданию и применению как статических, так и динамических моделей ведутся на протяжении нескольких десятилетий. Основными стадиями математического моделирования являются создание математической модели – описания, достаточно полно и точно отражающей физические процессы как в отдельных звеньях, так и в объекте целом, и реализация этой модели в виде алгоритма функционирования моделирующей системы [25]. В настоящее время можно выделить следующие основные области применения математических моделей : при аналитических исследованиях динамических свойств вновь создаваемых агрегатов в период их конструирования; при анализе и синтезе систем автоматического управления агрегатов; как составная часть алгоритма контроля и регулирования в системах автоматического управления с информационными и управляющими вычислительными машинами [26].

В области разработки статических математических моделей энергетического оборудования с использованием нормативных методик определения параметров энергетических установок необходимо отметить работу Ф.А. Вульмана [27], где автором предложен подход построения математических моделей теплоэнергетических установок на основе модульного программирования. Вопросам динамики котлоагрегатов посвящено много работ различных авторов. Аналитические методы построения вычислительных процедур разрабатывались в работах З.Я. Бейхера [31] при этом теплообменники рассматривались как динамические объекты с сосредоточенными параметрами. В таких моделях получение аналитической временной зависимости изменения технологических параметров в переходном процессе относительно несложно. При этом не учитывается реальная протяженность элементов парогенератора и связанная с ней зависимость параметров от координат.

В связи с широким распространение вычислительных машин возникла возможность осуществлять прямое численное интегрирование уравнений с частными производными, описывающими динамические процессы в энергоустоновках. Возможный путь построения нелинейной модели распределенного теплообменника заключается в замене исходных нелинейных уравнений в частных производных , описывающих теплообменник, конечными разностями. Что физически соответствует разбиению теплообменника на дискретные элементы, каждый из которых можно рассматривать, как сосредоточенный. Такому преобразованию, в работе В.М. Рущинского [30], подвергаются уравнения, записанные в отклонениях переменных и рассматривается возможность решения полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений при помощи аналоговой вычислительной техники. В работе А.С. Рубашкина [31] нелинейная модель

распределенного теплообменника построена путем представления системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих теплообменник как совокупность сосредоточенных элементов, в виде структурной схемы из решающих операторов, которая затем кодируется и решается на вычислительной машине при помощи специализированного машинного языка. Вопросы создания быстродействующих динамических моделей , пригодных для использования в масштабе реального времени освещены в работы И.И. Букштейна [22], В.М. Рущинского, К.Я. Давиденко [23].

Парогенератор представляет собой сложную, большую по размерности техническую систему непрерывного действия с переплетающимися материальными и энергетическими потоками. В его элементах протекают процессы горения, тепломассообмена, течения газов, пара, жидкости, парожидкостной смеси и др. По пароводяному и газовоздушному трактам парогенератор разбивается на отдельные взаимосвязанные звенья – теплообменники. В теплообменниках происходит передача тепла между средами, омывающими разделяющую стеку. По характеру теплообмена их можно разделить на конвективные с прямо- или противоточным движением сред, радиационные теплообменники , экранирующие топку, с тепловым потоком, практически не зависящим от температуры рабочей среды, конвективно-радиационные теплообменники, в которых рабочая среда получает часть тепла радиацией из топки, а часть за счет конвективного теплообмена.

Математические модели котла делятся на статические , предназначенные для расчетов установившихся режимов и динамические, предназначенные для моделирования динамических процессов. Статические модели включает систему нелинейных алгебраических трансцендентных уравнений, описывающих стационарное состояние котла. Динамические процессы в котле протекают с различными скоростями - гидродинамические и аэродинамические процессы быстро, а процессы тепломассообмена гораздо медленнее. Для задач управления динамическими процессами первая группа процессов может рассматриваться в любой момент времени как стационарные, а вторая группа как нестационарные. Для описания первой группы могут использоваться алгебраические и трансцендентные уравнения, которые соблюдаются в любой момент времени, а для второй группы дифференциальные уравнения. Исходя из этого динамическая модель котла сводится к решению алгебро-дифференциальных систем уравнений. Вопросы разработки стиля моделей котлов м других элементов ТЭУ представлены в работах [26].

Парогенерирующие каналы в общем случае состоят из трех подсистем: оболочки и двух теплоносителей, омывающих ее. В свою очередь каждая подсистема может быть представлена в виде различных моделей, отличающихся набором принятых допущений. Наличие трех подсистем большое количество частных моделей оболочек и потоков двух теплоносителей обеспечивает большое разнообразие моделей

теплообменников. Все эти модели можно разбить на три группы: распределенные, сосредоточенные , комбинированные.

Для разных задач математической модели котлоагрегата или его динамического участка предъявляются различные требования. Например, степень детализации какого-либо отдельного участка при составлении его математической модели должна быть различной в зависимости от того , какая ставится задача: проводится ли тщательное исследование влияния конструктивных особенностей участка на его динамические свойства, исследуется ли контур регулирования, включающий этот участок, или же исследуется схема регулирования , включающий этот участок , или же исследуется схема регулирования всего агрегата, в которой участок входит как составная часть. Наиболее высокая степень достоверности математической модели требуется при использовании ее непостредственно в системе контроля и управления агрегата.

В различных типах котлов , из-за различного принципа работы этих котлов, при переходных процессах изменение параметров работы происходит различно.

В барабанных котлах имеется фиксированная граница между парообразующими и перегревательными поверхностями. Эта граница находиться в барабане, уровень которого отделяет перегревательные поверхности от парообразующих. При любых режимах а пароперегреватель поступает практически сухой насыщенный пар. Изменением расхода питательной воды уровень в барабане поддерживается на определенном заданном значении, при этом паропроизводительность парогенератора практически не изменяется, поскольку она определяется в основном тепловой нагрузкой. В прямоточном котле нет конструктивно фиксированных границ между водоподогревательными , испарительными и пароперегревательными поверхностями нагрева. Основным показателем нарушение баланса между тепловыделением и подачей питательной воды в прямоточный котел будет изменение температуры пара. Тепловая энергия аккумулируется в объеме теплоносителя и металле поверхностей нагрева. Количество теплоты , содержащееся в объеме теплоносителя, определяется массой последнего, распределением температуры теплоносителя и давлением. Масса перегретого пара по сравнению с массой металла ничтожно мало. В соответствии с этим и количество теплоты, содержащееся в паре, невелико. Поэтому в расчетах его обычно не учитывают. По той же причине пренебрегают аккумуляцией теплоты в насыщенном паре. Таким образом, тепловая энергия сосредоточена в основном в воде и металле всех поверхностей нагрева [16]. Аккумулирующая емкость металла поверхностей нагрева зависит от их размера и толщины стенки трубок. У прямоточных котлов она меньше вследствие применения более тонких стенок в трубках меньшего диаметра.

Производство электроэнергии на ГЭС проходит две основные стадии: сжигание топлива в котле, в результате чего образуется пар заданного давления и температуры, и последующее преобразование энергии пара в

электрическую энергию в турбогенераторе. В настоящее время котел и турбогенератор обычно конструктивно объединяются в единый агрегат, который называется энергоблоком «котел-турбина». Принципиальная технологическая схема барабанного котла представлена на рисунке 1.1.

Топливо поступает через горелочные устройства в топку 1, где его сжигают обычно факельным способом. Для поддержания процесса горения в топку подают воздух в количестве Q_B. Его нагревают с помощью вентилятора ДВ и предварительно нагревают в воздухоподогревателе 9.

Образовавшиеся в процессе горения дымовые газы $Q_Г$, отсасывают из топки дымососом ДС. Попутно они проходят через поверхности нагрева пароперегревателей 5, 6, водяного экономайзера 8, воздухоподогревателя 9 и удаляются через дымовую трубу в атмосферу.

Процесс парообразования протекает в подъемных трубах циркуляционного контура 2, экранирующих камерную топку и снабжаемых водой из опускных труб 3. Насыщенный пар $D_Б$ из барабана 4 поступает в пароперегреватель, где нагревается до установленной температуры за счет радиации факела и конвективного обогрева топочными газами. При этом температуру перегрева пара регулируют в пароохладителе 7 с помощью впрыска воды $D_{ВПР}$.

Основными регулируемыми величинами котла служат расход перегретого пара $D_{П.П}$, его давление $p_{П.П}$ и температура $t_{П.П}$. Расход пара является переменной величиной, а его давление и температуру поддерживают вблизи постоянных значений в пределах допустимых отклонений, что обусловлено требованиями заданного режима работы турбины или иного потребителя тепловой энергии.

Кроме того, следует поддерживать в пределах допустимых отклонений значения следующих величин:

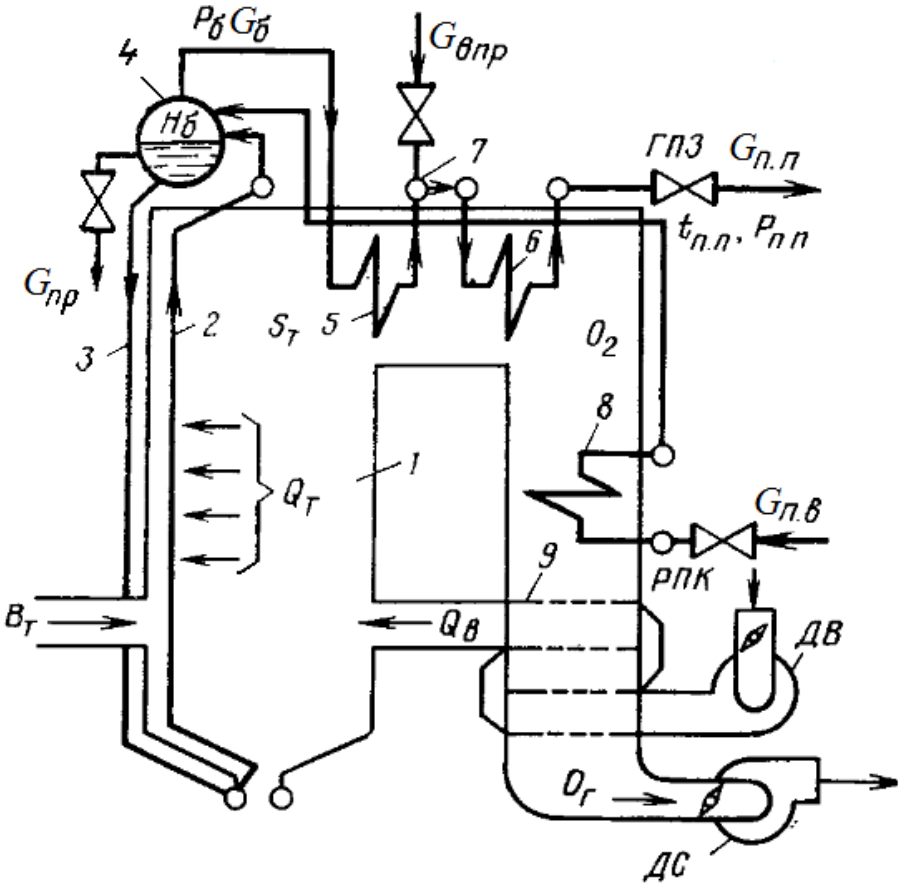
а) уровня воды в барабане $H_Б$ — регулируют изменением подачи питательной воды $D_{П.В}$;

б) разрежения в верхней части топки S_T — регулируют изменением подачи дымососов, отсасывающих дымовые газы из топки;

в) оптимального избытка воздуха за пароперегревателем $a(O_2)$ — регулируют изменением подачи дутьевых вентиляторов, .нагнетающих воздух в топку;

г) концентрации оксидов азота в дымовых газах (C_{NOx}) — регулируют, например, подачей вентиляторов рециркуляции газов в топку;

д) солесодержания котловой воды (в пересчете на NaCL) — регулируют изменением расхода воды $D_{П.Р}$, выпускаемой из барабана в расширитель непрерывной продувки.



ГПЗ - главная паровая задвижка; *РНК* - регулирующий питательный клапан; *1* - топка; *2* - циркуляционный контур; *3* - опускные трубы; *4* - барабан; *5,6* - пароперегреватели; *7* -пароохладитель; *8* - экономайзер; *9*- воздухоподогреватель.

Рисунок 1.8 - Принципиальная технологическая схема барабанного котла:

Перечисленные величины изменяются в результате регулирующих воздействий и под действием внешних и внутренних возмущений, носящих детерминированный или случайный характер. Котел в целом, например по каналу *топливо — расход* или *давление пара,* считают системой направленного действия.

Однако выходные регулируемые величины некоторых участков служат одновременно входными по отношению, к другим. Например, расход перегретого пара $D_{П.П}$, являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива B_T, служит входным воздействием по отношению к давлению и температуре перегретого пара, а давление пара в барабане $p_Б$, являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива, служит также одним из входных воздействий участка регулирования уровня воды в барабане $H_Б$.

2 Математические модели элементов парового котла

2.1 Описание процесса получение пара

Конвективный теплообменников представляет собой пучок параллельно работающих труб, снаружи омываемых греющими газами, а внутри течет теплоноситель. Общепринятым является представление о процессах в теплообменнике как распределенных относительно времени и одной пространственной координаты [19]. Течение считаем одномерным, а перенос тепла в разделяющей потоки теплопроводной стенки в продольном направлении считается пренебрежимо малым по сравнению с радиальным, а течение считается одномерным. Уравнение теплопроводности стенки заменяется уравнением теплового баланса. При разработке модели полагается, что различиями в работе параллельных труб теплообменника можно пренебречь как при стационарных , так и при переходных режимах. Теплообменник по ходу нагреваемого теплоносителя разбивается на n участков, при этом температура металла на каждом из участков принимается одинаковой по всей длине участка, что соответствует переходу от пространственно-распределенной модели к совокупности пространственно – сосредоточенных моделей [11]. Зная температуру участка в каждый момент времени, считается небаланс между внешним теплоподводом и количеством тепла, отбираемого от внутренней теплообменной поверхности [17].

$$Q_1(\tau) = \left(t_{\text{г}}^{\text{вх}}(\tau) - t_{\text{ст}}^{\text{нар}}(\tau)\right) \text{C}_2(\tau)(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_1(\tau)\pi d_1 l}{C_{\text{г}}(\tau)}}), \quad (2.1)$$

$$Q_2(\tau) = \left(t_{\text{ст}}^{\text{вн}}(\tau) - t_{\text{п}}^{\text{вх}}(\tau)\right)\text{C}_n(\tau)(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_2(\tau)\pi d_2 l}{C_n(\tau)}}), \quad (2.2)$$

$Q_2(\tau) = \frac{l\pi(t_{\text{ст}}^{\text{вн}}(\tau) - tn(\tau))}{R(\tau)}$, при теплообмене в области насыщения (2.3)

$$R(\tau) = \frac{1}{2\lambda} ln \frac{d_2 + \delta}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2(\tau) d_2}, \quad (2.4)$$

$$t_{\text{ст}}^{\text{нар}}(\tau) = \frac{C_{\text{г}}(\tau)\left(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_1(\tau)\pi d_1 l}{C_{\text{г}}(\tau)}}\right) t_{\text{г}}^{\text{вх}}(\tau) + \frac{2\pi\lambda l}{\ln\left(\frac{d_1}{d_1 - \delta}\right)} t_{\text{ст}}^{\text{ср}}(\tau)}{\text{C}_{\text{г}}(\tau)\left(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_1(\tau)\pi d_1 l}{C_{\text{г}}(\tau)}}\right) + \frac{2\pi\lambda l}{\ln\left(\frac{d_1}{d_1 - \delta}\right)}}, \quad (2.5)$$

$$t_{\text{ст}}^{\text{вн}}(\tau) = \frac{C_n(\tau)\left(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_2(\tau)\pi d_2 l}{C_n(\tau)}}\right) t_n^{\text{вх}}(\tau) + \frac{2\pi\lambda l}{\ln\left(\frac{d_2}{d_2 - \delta}\right)} t_{\text{ст}}^{\text{ср}}(\tau)}{\text{C}_n(\tau)\left(1 - \text{e}^{-\frac{\alpha_2(\tau)\pi d_2 l}{C_n(\tau)}}\right) + \frac{2\pi\lambda l}{\ln\left(\frac{d_2}{d_2 - \delta}\right)}}, \quad (2.6)$$

$$C_{\text{г}}(\tau) = C_{\text{г}}(\tau) G_{\text{г}}^{\text{уч}}(\tau), \quad (2.7)$$

$$C_n(\tau) = c_n(\tau) G_n^{\text{уч}}(\tau), \quad (2.8)$$

$$P_{\text{г}}^{\text{вых}}(\tau) = \text{P}_{\text{г}}^{\text{вых}}(\tau) - DP_{\text{г}}(\tau), \quad (2.9)$$

$$P_n^{\text{вых}}(\tau) = \text{P}_n^{\text{вых}}(\tau) - DP_n(\tau), \quad (2.10)$$

где $t_{г}^{вх}(\tau)$— температура газа на входе в участок в момент времени , К;

$t_{п}^{вх}(\tau)$— температура воды(пара) на входе в участок в момент времени , К;

$t_{ст}^{нар}(\tau)$ - температура наружной стенки трубы в момент времени , К;

$t_{ст}^{вн}(\tau)$- температура внутренней стенки трубы в момент времени , К;

$t_{ст}^{ср}(\tau)$ - температура середины стенки трубы в момент времени , К;

d_1 — наружный диаметр трубы, м;

d_2- внутренний диаметр трубы, м;

δ — толщина стенки трубы, м;

l — длина участка трубы, м;

$C_г( )$— теплоемкость массового расхода газа в момент времени , Вт/К;

$C_п( )$— теплоемкость массового расхода воды/пара в момент времени , Вт/К;

$c_г( )$— удельная массовая теплоемкость газа в момент времени , Дж/(кг*к);

$c_п( )$— удельная массовая теплоемкость воды(пара) в момент времени , Дж/(кг*к);

$G_{г}^{уч}(\tau)$ - массовый расход газа через участок в момент времени , кг/с; $G_{п}^{уч}(\tau)$ - массовый расход воды (пара) через участок в момент

$\alpha_1(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи от газа к разделяющей стенке в момент времени , Вт/(м^2*К);

$\alpha_2(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи от разделяющей стенки к воде(пару) в момент времени , Вт/(м^2*К);

- коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м*К);

$tn(\tau)$ — температура насыщения в момент времени , К;

$R(\tau)$ - термическое сопротивление теплопередачи в момент времени *т,* (м^2*К)/Вт;

$P_г^{вых}(\tau)$ - давление газа на входе в теплообменник в момент времени , кгс/см^2;

$P_г^{вых}(m)$ — давление газа на выходе из теплообменника в момент времени , кгс/см ;

$DP_г(\tau)$ - аэродинамическое сопротивление теплообменника в момент времени , кгс/см^2;

$P_г^{вх}(\tau)$ - давление воды(пара) на входе в теплообменник в момент времени , кгс/см^2;

$P_n^{вых}(\tau)$ - давление воды (пара) на выходе из теплообменника в момент времени , кгс/см^2*D;*

$DP_n(\tau)$ — гидравлическое сопротивление теплообменника в момент времени .

Исходя из этого, вычисляется производная температуры металла участка по времени

$$\frac{dT}{d\tau}(\tau) = \frac{\Delta Q(\tau)}{C_M m}, \tag{2.11}$$

$$\Delta Q(\tau) = Q_1(\tau) - Q_2(\tau), \tag{2.12}$$

где $\Delta Q(\tau)$ - небаланс между внешним теплоподводом и количеством тепла, отбираемого от внутренней теплообменной поверхности момент времени , Вт;

$Q_1(\tau)$ - внешний теплоподвод в момент времени , Вт;

$Q_2(\tau)$ - количество тепла отводимое от внутренней поверхности трубы в момент , Вт;

При расчете теплообменника задаются конструктивные характеристики теплообменника (площадь поверхности нагрева, шаги, диаметры труб, ширина и глубина газохода), расходы теплоносителей, их входное давление, входная температура продуктов сгорания, входная энтальпия нагреваемого теплоносителя. Определяются выходная энтальпия нагреваемого теплоносителя, выходная температура газа, выходное давление, производные температуры металла участков теплообменника по времени и действующее механическое напряжение. Для расчета коэффициентов теплоотдачи, гидравлического и аэродинамического сопротивлений теплообменника используется ранее разработанная модель для поверочного расчета в

статических режимах, в основе которой состоит подход использующий две математические модели теплообменника: упрощенная (с фиксированными коэффициентами теплопередачи, гидравлического и аэродинамического сопротивления) и подробная, где эти коэффициенты уточняются. Расчет в такой модели итерационный, двухуровневый. В основе расчета процессов теплообмена, гидродинамики и аэродинамики лежат нормативные методы теплового, гидравлического и аэродинамического расчетов котельных агрегатов [20].

2.2 Системы автоматического регулирования барабанных котлов

Конструкционные особенности барабанных паровых котлов позволяют расчленить многомерную систему регулирования их режимов на несколько относительно независимых систем, среди которых главное значение принадлежит системам оптимизации качества процесса горения топлива, стабилизации, уровня воды в барабане и температуры перегретого пара.

2.2.1 Система регулирования качества горения топлива.

Показателем качества функционирования этой системы является удельный расход топлива, который должен быть минимально возможным. Однако непосредственное оперативное управление этим показателем не представляется возможным, так как его вычисление связано с достаточно длительным интегрированием расхода топлива и нагрузки энергоблока. Поэтому предпринимались многочисленные поиски косвенной регулируемой величины, поддержание которой на том или ином уровне гарантировало бы достаточно приемлемую близость удельного расхода к минимуму.

Известно, что высокое качество сгорания топливо возможно только при вполне определенном подводе воздуха в топку. На рисунке 2.1 представлена схема САР, получившая название «топливо - воздух», которая решает задачу. Регулятор подачи воздуха в топку РВ воздействует на регулирующий орган подачи воздуха. На его выход подается разность между действительным расходом воздуха G_B и его заданным значением $G_B^З$, которое вырабатывается в командном блоке КВ в зависимости от изменения расхода топлива G_T по заранее составленной режимной карте. Режимная карта может быть скорректирована подачей воздействия а.

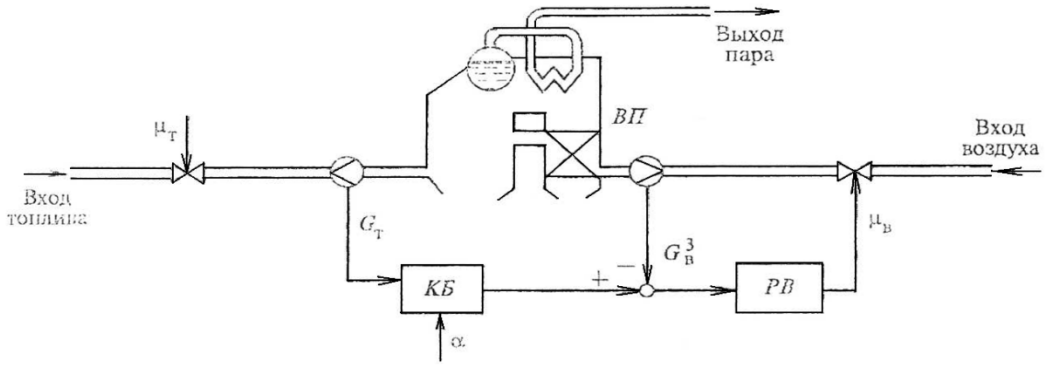


Рисунок 2.1 - Схема САР «Топливо-воздух»

Заметим, что, поскольку расход топлива меняется регулятором давления пара, приведенную схему следует рассматривать как часть автономной двумерной системы, управляющей одновременно давлением пара и качеством сгорания топлива.

Другой вариант схемы регулирования качества горения топлива используют существующую закономерность между качеством горения топлива и содержанием кислорода в уходящих газах. Схема такой системы представлена на рисунке 2.2. Это каскадная схема, главным регулятором в которой является регулятор содержания кислорода PO_2 , который воздействует на вспомогательный регулятор расхода воздуха РВ в составе системы «топливо - воздух» . Заданный расход воздуха зависит от расхода топлива. Сигнал от расхода топлива подается на вход регулятора воздуха РВ через командный блок КБ. Необходимость использования каскадной схемы обусловлена относительно большим запаздыванием, которым обладают существующие приборы – анализаторы содержания кислорода в уходящих газах.

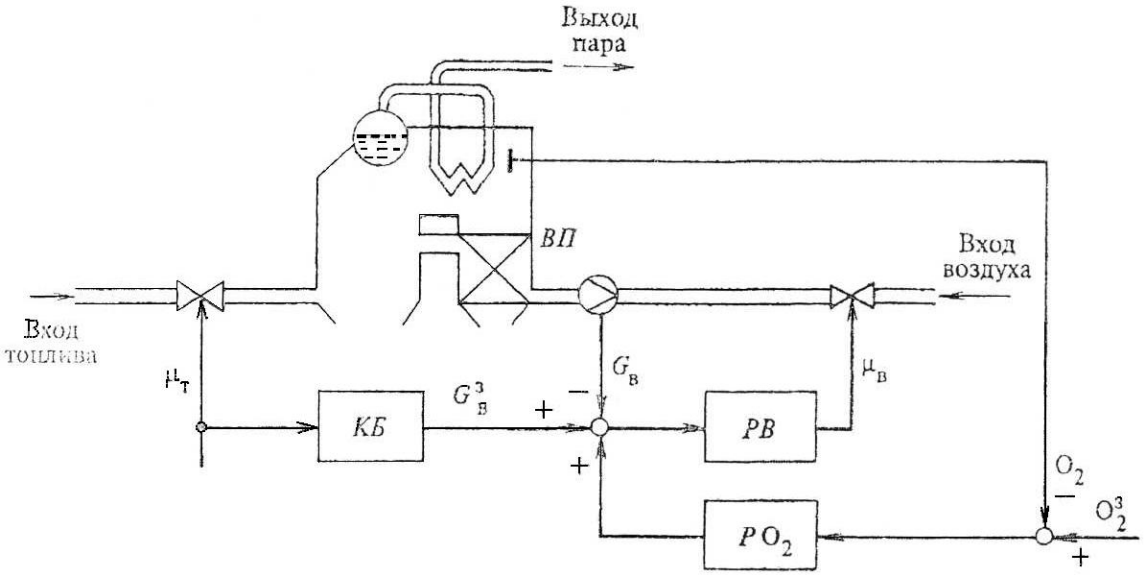


Рисунок 2.2 – Схема САР качества горения топлива

2.2.2 Система регулирования разряжения в топке котла.

С системой регулирования качества горения топлива тесно связана системами регулирования разряжения $p_{ТП}$ в топке котла (рисунок 2.3). Объект регулирования в этой системе обладает хорошими регулировочными свойствами, так что система выполняется обычно как простая одноконтурная – регулятор разряжения РР получает сигнал по разрежению в верхней части топки и воздействует непосредственно на изменение $\mu_{ДС}$ положения направляющих аппаратов дымососов.

Основным возмущением для системы регулирования разрежения является изменение расхода воздуха, осуществляемого системой регулирования качества сгорания топлива. Для устранения влияния действия регулятора подачи воздуха *РВ* на разрежение в топке регулирующее воздействие этого регулятора следует подать не только на направляющий аппарат вентилятора, но и на вход *РР*, предварительно преобразовав его соответствующим образом в подобранном блоке компенсации возмущения *КВ*. Изменение положения направляющих аппаратов вентиляторов в этой схеме немедленно приводит в движение направляющие аппараты дымососов, так что разрежение в топке практически остается неизменным.

Чтобы сигнал от блока КВ не искажал заданного значения разрежения в установившихся режимах, он должен иметь исчезающий характер.

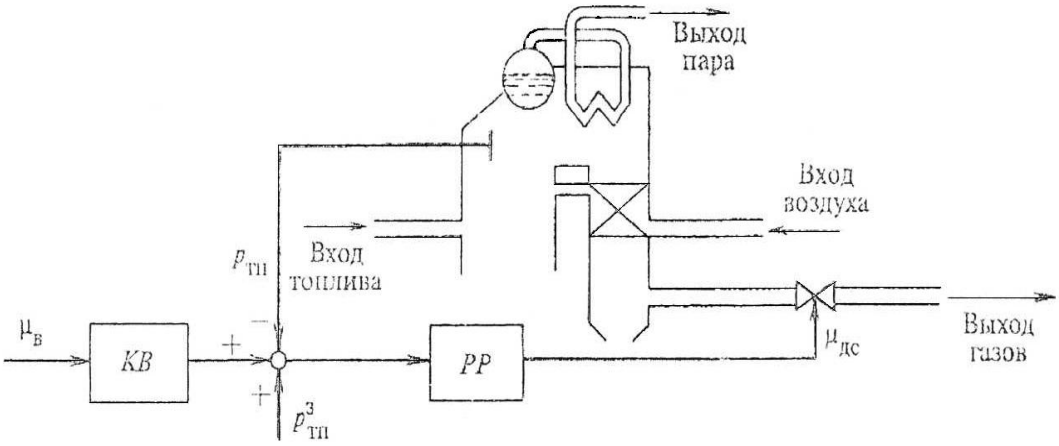


Рисунок 2.3 – Схема САР разряжения в топке котла

2.2.3 Система регулирования уровня в барабане котла.

Применяемая в настоящее время схема регулирования уровня в барабанах котла, приведена на рисунке 2.4,а. На вход регулятора уровня РУ подается взвешанная сумма сигналов, определяющих текущие значения уровня в барабане $h_Б(t)$, расхода питательной воды $G_{ПВ}(t)$ и расхода перегретого пара из котла $G_{ПП}(t)$. Таким образом информационная структура

(рисунок 2.4, б) рассмотренной системы регулирования сочетает в себе структуру системы регулирования со вспомогательной регулируемой величиной и системы с компенсацией возмущения. Назначение сигнала от вспомогательной регулируемой величины состоит в устранении влияния возмущений, идущих со стороны питательного клапана, питательного клапана , назначение сигнала от вспомогательной регулируемой величины состоит в устранении влияния возмущений, идущих со стороны питательного клапана , назначение сигнала от возмущения – устранение влияния на паровую нагрузку котла.

Для того чтобы система работала без остаточной неравномерности, весовые коэффициенты БФ и КВ подбираются таким образом, чтобы в установившихся режимах, когда $G_{ПВ} = G_{ПП}$, их сигналы взаимно компенсировались.

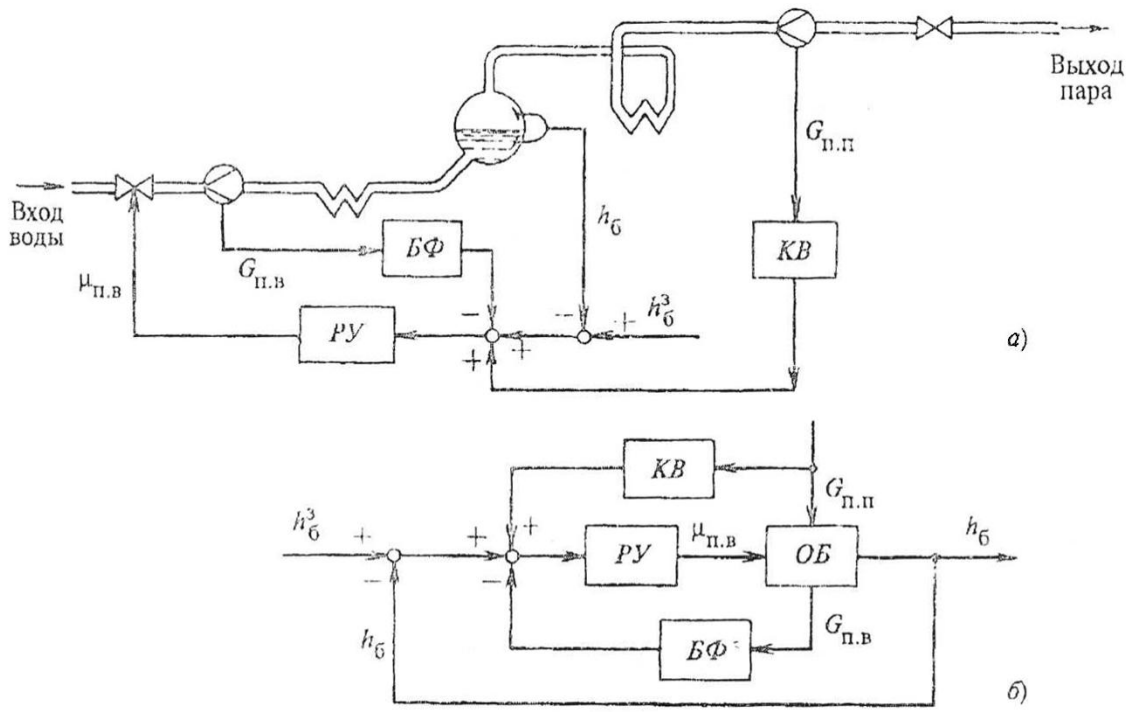


Рисунок 2.4 – Схема САР уровня в барабанных котлах

Необходимость применения сравнительно сложной системы регулирования обусловлена наличием в современных котлах высокого давления, своеобразного эффекта «вскипания» уровня. Сущность этого явления состоит в следующем.

Пусть в какой-то момент времени регулятор турбины открывает клапан подвода пара к турбине, увеличивая расход перегретого пара из котла $G_{ПП}$. Это должно было бы привести к падению уровня воды в барабане котла , однако в действительности сначала уровень быстро возрастает и лишь спустя некоторое время начинает меняться в «правильном» направлении. Объясняется это тем, что в экранных трубах и барабанах котлов высокого

давления находится не вода, а пароводяная смесь, объем которой зависит от давления. Увеличение открытия клапана турбины приводит к немедленному падению давления над поверхностью испарения в барабане, объем пароводяной смеси увеличивается , что проявляется во временном увеличении уровня.

2.3 Математическая модель парового котла

В основе методов автоматизации математического моделирования схем ТЭУ, лежит представление систем нелинейных и трансцендентных уравнений, описывающих ТЭУ, в виде двудольного (бихроматического) графа, имеющего два вида вершин. Одному виду в соответствие ставится уравнение, а другому— переменные. Наличие связи между черной и белой вершинами показывает, что данная переменная входит в соответствующее уравнение. Если связь ориентирована от белой вершины к черной, то данная переменная определяется из соответствующего уравнения. Если же связь ориентирована от черной вершины к белой, то переменная для этого уравнения является информационно входной. С использованием алгоритмов теории графов решаются задачи назначения для каждого уравнения переменной, которая из него определяется, проводится выбор итерационно вычисляемых переменных (для которых задаются начальные приближения) и определяется последовательность расположения уравнений в программе расчета установки.

Динамические процессы характеризуются изменением температуры металла труб теплообменных поверхностей нагрева, давления и массы рабочего тела сосредоточенного в барабане и других элементах котла. При этом как уже отмечено процессы гидродинамики (изменения расходов и давлений) протекают гораздо быстрее, чем процессы аккумулирования тепла и массы рабочего тела. При совместном рассмотрении первую группу процессов можно считать установившейся в любой момент времени и описывать подсистемой алгебраических и трансцендентных уравнений. Процессы второй группы представляются как динамические и описываются подсистемой дифференциальных уравнений [23]. Задача автора состояла в подборе такого сочетания этих описаний, при котором с одной стороны обеспечивалась удовлетворительная точность определения динамики изменяющихся параметров, а с другой - приемлемое время расчета.

Решение алгебраических и трансцендентных систем уравнений описывающих процессы стационарные в любой момент времени осуществляется с помощью метода Зейделя или Ньютона. А параметры описываемые дифференциальными уравнениями в момент времени $\tau + \Delta\tau$ определяются из выражения:

$$X(\tau + \Delta\tau) = X(\tau) + \frac{dX}{d\tau} * \Delta\tau, \quad (2.13)$$

где $X(\tau + \Delta\tau)$ - параметр в момент времени $\tau + \Delta\tau$, $X(\tau)$ - параметр в момент времени τ.

3 Методика математического моделирования процесса получения пара

3.1 Постановка задачи оптимального управления процессом изменения нагрузки котла

Оптимальной называется наилучшая в некотором технико-экономическом смысле система, основной особенностью которой является наличие двух целей управления, которые она решает автоматически. Первая цель – цель управления, то есть поддержание управляемых величин на заданном значении и устранение возникающих отклонений. Вторая цель – цель оптимизации, то есть обеспечение наилучшего качества управления, определяемого по достижению экстремального значения некоторого технико-экономического показателя (критерия оптимальности) [23].

Изменение нагрузки и поддержание требуемых параметров котла на выходе обеспечивается соответственно изменениями расхода топлива, расхода воздуха, расхода питательной воды и различным соотношением расходов собственного конденсата на впрыски пароохладителей. Данные параметры являются управляющими. Задавая значения управляющих параметров в каждый момент времени, можно осуществить переход от одного стационарного режима с неизменной нагрузкой к другому. Величины следует подбирать таким образом, чтобы соблюдались все ограничения на параметры работы котла. Контролируемые параметры в конце процесса должны находиться в заданных интервалах. Кроме того, в общем случае должны быть ограничены скорости изменения (то есть производные по времени) параметров котла, а функционал, оценивающий качество переходного процесса (суммарный расход топлива в течение перехода с одного уровня нагрузки на другой), был бы минимальным [24]. Данная задача оптимизации динамического режима относится к задаче оптимального управления вида:

$$B = \int_{\tau_0}^{\tau_s} U_l(\tau)d\tau \to min\,, \tag{3.1}$$

$$H\big(u(\tau), y(\tau), z(\tau)\big) = 0\,, \tag{3.2}$$

$$G\big(u(\tau), y(\tau), z(\tau)\big) \geq 0\,, \tag{3.3}$$

$$z'(\tau) = \varphi(u(\tau), y(\tau), z(\tau)) \tag{3.4}$$

$$u^{min} \leq u \leq u^{max}\,, \tag{3.5}$$

$$u'_{min} \leq u' \leq u'_{max}\,, \tag{3.6}$$

$$y'_{min} \leq y' \leq y'_{max}\,, \tag{3.7}$$

$$z'_{min} \leq z \leq z'_{max}\,, \tag{3.8}$$

$$-\varepsilon \leq z'(\tau_s) \leq \varepsilon\,, \tag{3.9}$$

$$z_p^{min} \leq z_p(\tau_s) \leq z_p^{max}, p\epsilon D\,, \tag{3.10}$$

$$y_h^{min} \leq y_h(\tau_s) \leq y_h^{max}, h\epsilon V\,, \tag{3.11}$$

$$z(\tau_0) = z^0\,, \tag{3.12}$$

где B – суммарный расход топлива за время переходного процесса;

u — n - мерный вектор управляющих параметров (расходов топлива в топку котла, воды в барабан и др., причем расходу топлива отвечает l-ая компонента этого вектора);

H – m-мерная векторная функция ограничений-равенств заданная алгебраическими и трансцендентными уравнениями;

y – m-мерный вектор параметров (температур, давлений, расходов теплоносителей по пароводяному и газовоздушному трактам котла) определяемых из системы уравнений *H;*

G – k-мерная векторная функция ограничений-неравенств;

τ_0 — начальный момент времени переходного процесса;

τ_s – конечный момент переходного процесса;

z - r-мерный вектор интегрируемых переменных (температуры в элементах котла, уровень воды и давление в барабане и другие);

u' - вектор производных u по времени; u'_{max} - вектор максимальных значений компонент вектора u';

u'_{min} - вектор минимальных значений компонент вектора u';

z' - вектор производных z по времени, z'_{max} - вектор максимальных значений компонент вектора z', z'_{min} - вектор минимальных значений компонент вектора z';

ε - вектор с такими же параметрами, что при соблюдении условия (3.9) процесс в момент времени τ_s становится практически стационарным; y' - вектор производных y по времени; y'_{max} - вектор максимальных значений компонент вектора y';

y'_{min} - вектор минимальных значений компонент вектора y';

D – множество компонентов вектора z значения которых необходимо контролировать в конце переходного процесса;

V – множество компонентов вектора y значения которых необходимо контролировать в конце переходного процесса ;

y'_{max} - минимальные значения p-ого контролируемого параметра вектора z в конце переходного процесса;

y'_{min} - минимальное значение h-ого контролируемого параметра вектора y в конце переходного процесса ;

z^0 - значение вектора z в начальный момент времени τ_0.

Различные методы отыскания экстремума функции или функционала B(u) принято разделять на две большие группы: прямые и непрямые. К первой группе относятся все методы градиентного спуска. Они основываются на просмотре окрестности некоторой точки u_n, позволяющем найти другую точку u_{n+1}, в которой значение функции $B(u_n + i)$, будет меньше $B(u_n)$. Эти методы не используют (во всяком случае непосредственно) необходимых или достаточных условий экстремума. Непрямые методы направлены на отыскание функции, непосредственно удовлетворяющей

необходимым или достаточным условиям. Наибольшее значение имеют методы, использующие необходимые условия. Задача отыскания минимума функции с помощью необходимых условий сводится к задаче отыскания корней некоторой функции, а задача расчета оптимальной программы – к решению краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти методы в настоящее время получили широкое распространение. Они просты для программирования и позволяют использовать простые стандартные программы. В то же время они обладают и целым рядом недостатков. Один из них – это ограниченная область применимости. Задача становится практически неразрешимой, если необходимые условия формулируются относительно сложно. Другой недостаток состоит в том, что функция или точка, удовлетворяющая необходимым условиям, это всего лишь претендент на право называться решением. Для того чтобы убедиться в том, что найденная функция является искомым решением, надо еще проверить, удовлетворяет ли она достаточным условиям экстремума.

Появление электронной вычислительной техники сделало прямые методы очень важными с практической точки зрения, их реализации уделяется большое внимание.

3.2 Сведение задачи оптимального управления к задаче нелинейного программирования

Так как учитывать ограничения и значения управляющих параметров на всем несчетном множестве точек интервала $[\tau_0, \tau_s]$ не представляется возможным, разбиваем переходной процесс на q равных участков при помощи q+1 базовых точек с номерами 1,2,…, q+1. Число этих точек определяем исходя из необходимости получения требуемой точности решения оптимизационной задачи и приемлемого объема вычислений, причем первая базовая точка τ_1 совпадает с началом интервала времени τ_0 , последняя q+1 с его концами τ_s. Будем оптимизировать значения управляющих параметров, учитывать ограничения – неравенства только в этих точках, принимая что если векторы G и H не нарушаются в соседних базовых точках, то они не нарушаются и в любой промежуточный момент времени, расположенный между этими точками, кроме того полагаем, что управляющие параметры между соседними точками изменяются по линейному закону. В результате получаем задачу нелинейного программирования с дискретным временем:

$$\min_{u(r_1),\dots u(r_q+1)} B = \sum_{j=1}^{q+1} u_l(\tau_j), \tag{3.13}$$

$$u(\tau) = \left(\frac{u(\tau_i)-u(\tau_{i-1})}{\Delta\tau}\right)(\tau - \tau_{i-1}) + u(\tau_{i-1}),$$

I отвечает условию $\tau_i \geq \tau \geq \tau_{i-1}$, $i \in [2, \dots q+1]$, (3.14)

$$H\big(u(\tau), y(\tau), z(\tau)\big) = 0, \tag{3.15}$$

$$G\left(u(\tau_j), y(\tau_j), z(\tau_j)\right) \geq 0, j = 1, \dots, q+1, \quad (3.16)$$

$$z'(\tau) = \varphi(u(\tau), y(\tau), z(\tau)), \quad (3.17)$$

$$u^{min} \leq u(\tau_j) \leq u^{max}, \quad (3.18)$$

$$u'_{min} \leq u'_i = \frac{u(\tau_{i+1}) - u(\tau_i)}{\Delta\tau} \leq u'_{max}, \ i = 1, \dots, q, \quad (3.19)$$

$$y'_{min} \leq y'_i = \frac{y(\tau_{i+1}) - y(\tau_i)}{\Delta\tau} \leq y'_{max}, \ i = 1, \dots, q, \quad (3.20)$$

$$z'_{min} \leq z'_i = \frac{z(\tau_{i+1}) - z(\tau_i)}{\Delta\tau} \leq z'_{max}, \ i = 1, \dots, q, \quad (3.21)$$

$$-\varepsilon \leq z'_q = \frac{z(\tau_{q+1}) - z(\tau_q)}{\Delta\tau} \leq \varepsilon, \quad (3.22)$$

$$z_p^{min} \leq z_p(\tau_s) = z_p\left(\tau_{q+1}\right) \leq z_p^{max}, p \epsilon D, \quad (3.23)$$

$$y_p^{min} \leq y_h(\tau_s) = y_h\left(\tau_{q+1}\right) \leq z_h^{max}, h \epsilon V, \quad (3.24)$$

$$z(\tau_0) = z(\tau_1) = z^0, \quad (3.25)$$

Здесь $\Delta\tau = \frac{\tau_s - \tau_0}{q}, u(\tau_j)$ n-мерный вектор управляющих параметров в базовой точке j.

Результаты совместного решения системы алгебраических и дифференциальных уравнений (16,18) в различные моменты времени при заданных начальных условиях и управляющих воздействиях можно представить в виде векторных функций

$$y(\tau_j) = \psi(\tau_j, u(\tau_1), \dots, u(\tau_j), z^0), \quad (3.26)$$

$$z(\tau_j) = \Phi(\tau_j, u(\tau_1), \dots, u(\tau_j), z^0), \quad (3.27)$$

Определение векторов $y(\tau)$ и $z(\tau)$ может осуществляться численным методом.

Подставляя в (16-25) вместо $y(\tau)$ и $z(\tau)$ векторные функции (26), (27) имеем

$$\min_{u(r_1), \dots u(r_q+1)} B = \sum_{j=1}^{q+1} u_l(\tau_j) = M\left(u_1(\tau_1), \dots, u_l(\tau_{q+1})\right), \quad (3.28)$$

$$j = 1, \dots, q+1$$

$$u(\tau) = \left(\frac{u(\tau_i) - u(\tau_{i-1})}{\Delta\tau}\right)(\tau - \tau_{i-1}) + u(\tau_{i-1}), \quad (3.29)$$

где i отвечает условию $\tau_i \geq \tau \geq \tau_{i-1}$,

$$G(\tau_j, u(\tau_j)\Psi(\tau_j), u(\tau_1)) \quad (3.30)$$

где подстрочными индексами p и h обозначают соответствующие компоненты векторных функций Ф, Φ^{q+1}, Ψ, Ψ^{q+1}.

Методы решения задач нелинейного математического программирования в последние годы начинают все шире применятся для нахождения оптимальных управлений и траекторий, а для оптимизационных

исследований различных ТЭУ разрабатываются на протяжении длительного периода времени . Программа оптимизационного расчета схемы ТЭУ - представляет собой программу оптимизации, сформированную с помощью системы машинного построения программ для ПК . В процессе оптимизации методом градиентного спуска I порядка производится поиск оптимальной точки. При этом расчеты частных производных целевой функции и функций-ограничений производятся конечно-разностным методом. Также конечно-разностным методом определяются производные, необходимые для одномерной минимизации целевой функции вдоль выбранного направления спуска [31]. Решение задачи линейного программирования осуществляется методом безусловной минимизации логарифмической функции штрафа. Одномерная минимизация выполняется с использованием методов Ньютона и дихотомии. Основу алгоритма одномерной минимизации составляет быстро-сходящийся модифицированный метод Ньютона. Решение данной задачи требует больших затрат машинного времени, поэтому использование этого подхода для формирования управляющих воздействий в режиме реального времени весьма затруднительно.

3.3 Переход к задаче линейного программирования

Многократного ускорения процесса решения задачи нелинейного программирования можно достичь сведением к задаче линейного программирования [20].

Нелинейные функции цели B и ограничений G раскладывают в ряд Тейлора до членов первого порядка в окрестности точки линеаризации $\tilde{u}(\tau_j), \tilde{z}^0, j = 1, \dots, q+1$ что позволяет аппроксимировать их линейными функциями и свести общую задачу нелинейного программирования к задаче линейного программирования:

$$\min\left(\sum_{j=1}^{q+1}\sum_{a=1}^{n}\frac{dM}{du_a(\tau_j)}\left(u_a(\tau_j)-\tilde{u}_a(\tau_j)\right)+\sum_{a=1}^{r}\frac{dM}{dz_a^0}(z_a^0-\tilde{z}_a^0)\right) \quad (3.40)$$

$$\bar{G}_j\left(\tilde{u}(\tau_1),\dots,\tilde{u}(\tau_j),\tilde{z}^0\right)+\sum_{c=1}^{j}\sum_{a=1}^{n}\frac{d\bar{G}_j}{du_a(\tau_c)}\left(u_a(\tau_c)-\tilde{u}_a(\tau_c)\right)+\sum_{a=1}^{r}\frac{d\bar{G}_j}{dz_a^0}(z_a^0-\tilde{z}_a^0)\geq 0 \quad (3.40)$$

$$u^{min}\leq u(\tau_j)\leq u^{max}, j=1,\dots,q+1, \quad (3.41)$$

$$u'_{min}\leq\frac{u(\tau_{i+1})-u(\tau_i)}{\Delta\tau}\leq u'_{max},\ i=1,\dots,q \quad (3.42)$$

$$y'_{min}\leq\bar{\Psi}_i(\tilde{u}(\tau_1),\dots,\tilde{u}(\tau_{i+1}),\tilde{z}^0)+\sum_{c=1}^{i+1}\sum_{a=1}^{n}\frac{d\bar{\Psi}_i}{du_a(\tau_c)}\left(u_a(\tau_c)-\tilde{u}_a(\tau_c)\right)+$$
$$+\sum_{a=1}^{r}\frac{d\bar{\Psi}_i}{dz_a^0}(z_a^0-\tilde{z}_a^0)\leq y'_{max}, \quad (3.43)$$

$$z'_{min} \le \overline{\Phi_i}\,(u(\tau_1),\dots,u(\tau_{i+1}),z^0) + \sum_{c=1}^{j+1}\sum_{a=1}^{n}\frac{d\bar{\Phi}_i}{du_a(\tau_c)}\left(u_a(\tau_c)-\tilde{u}_a(\tau_c)\right) + \sum_{a=1}^{r}\frac{d\bar{\Phi}_i}{dz_a^0}(z_a^0-\tilde{z}_a^0) \le z'_{max},$$

$$i=1,\dots,q-1 \qquad (3.44)$$

$$-\varepsilon \le \overline{\Phi_i}\,(u(\tau_1),\dots,u(\tau_{i+1}),z^0) + \sum_{c=1}^{i+1}\sum_{a=1}^{n}\frac{d\bar{\Phi}_q}{du_a(\tau_c)}\left(u_a(\tau_c)-\tilde{u}_a(\tau_c)\right) + + \sum_{a=1}^{r}\frac{d\bar{\Phi}_q}{dz_a^0}(z_a^0-\tilde{z}_a^0), \qquad (3.45)$$

Наиболее распространенным способом решения задач линейного программирования является симплекс-метод. Другим широким классом решения таких задач является класс алгоритмов внутренних точек. В отличие от симплекс-метода, перебирающего угловые точки многогранника допустимых решений, вычислительный процесс в алгоритмах внутренних точек происходит в относительной внутренности допустимого множества, что дает сокращение времени расчета при задачах большой размерности. Идея, лежащая в основе метода внутренних точек, состоит в том, что функция, подлежащая минимизации при наличии ряда ограничений равенств заменяется семейством функции, зависящих от параметра и обладающих следующими свойствами: 1) в большей части допустимой области, определяемой ограничениями, они близки к минимизируемой функции; 2) каждая из функций достаточно быстро возрастает либо при приближении к границе допустимой области, либо при выходе за ее пределы. Степень близости и рост зависят от параметра и по мере его изменения в соответствующую сторону возрастают [28].

Программная реализация процесса формирования задачи линейного программирования осуществлена в виде «Блока линеаризации», в котором происходит определении значений коэффициентов и свободных членов для функции цели B и ограничений G , что требует многократного обращения к нелинейной модели котла и значительных затрат машинного времени. В связи с этим, использование «Блока линеаризации» при каждом новом значении диапазона изменения нагрузки котла создает значительные сложности для применения предложенного подхода управления в режиме реального времени, а использование значений коэффициентов и свободных членов определенных для других диапазонов изменения нагрузки ведет к возрастанию рассогласования между линейной и нелинейной моделями. Определения значений коэффициентов и свободных членов для конкретного диапазона нагрузок работы котла производится интерполяцией между двумя ближайшими значениями нагрузок. Решение задачи линейного программирования осуществляется в «Блоке оптимизации». Определение невязок и соответственно новых значений свободных членов для задачи линейного программирования происходит в «Блоке сравнения» [21].

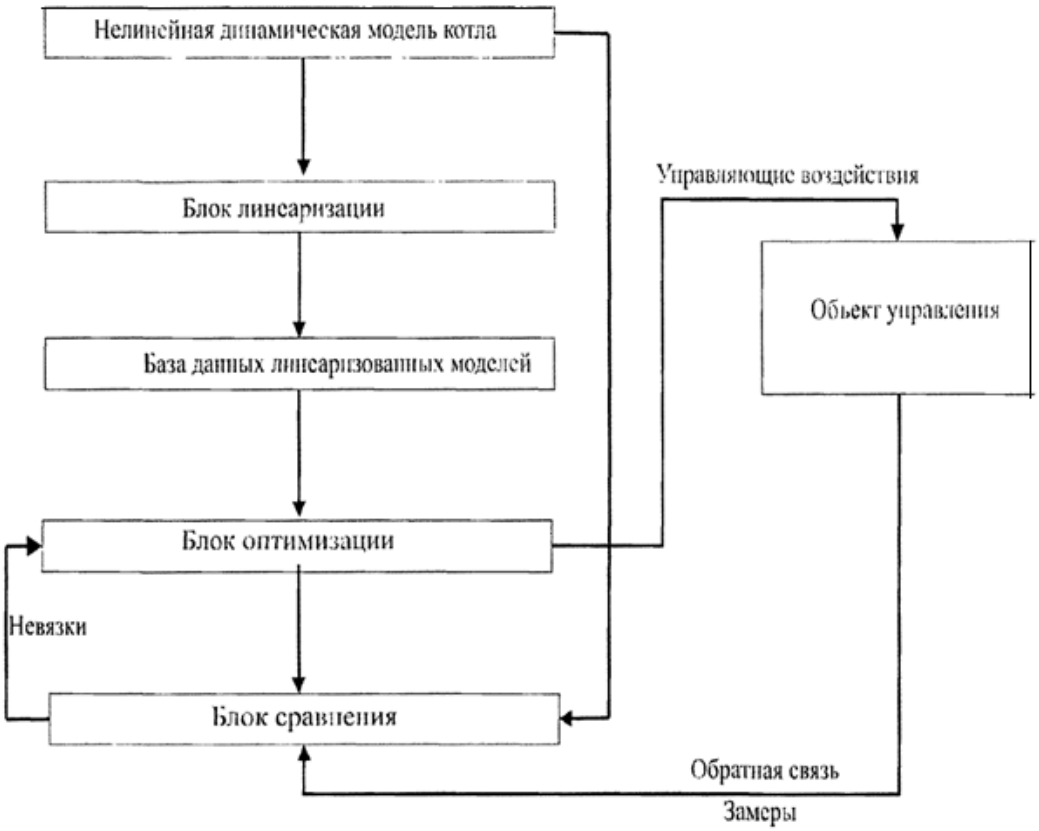


Рисунок 3.1 – Блок – схема программной реализации методики

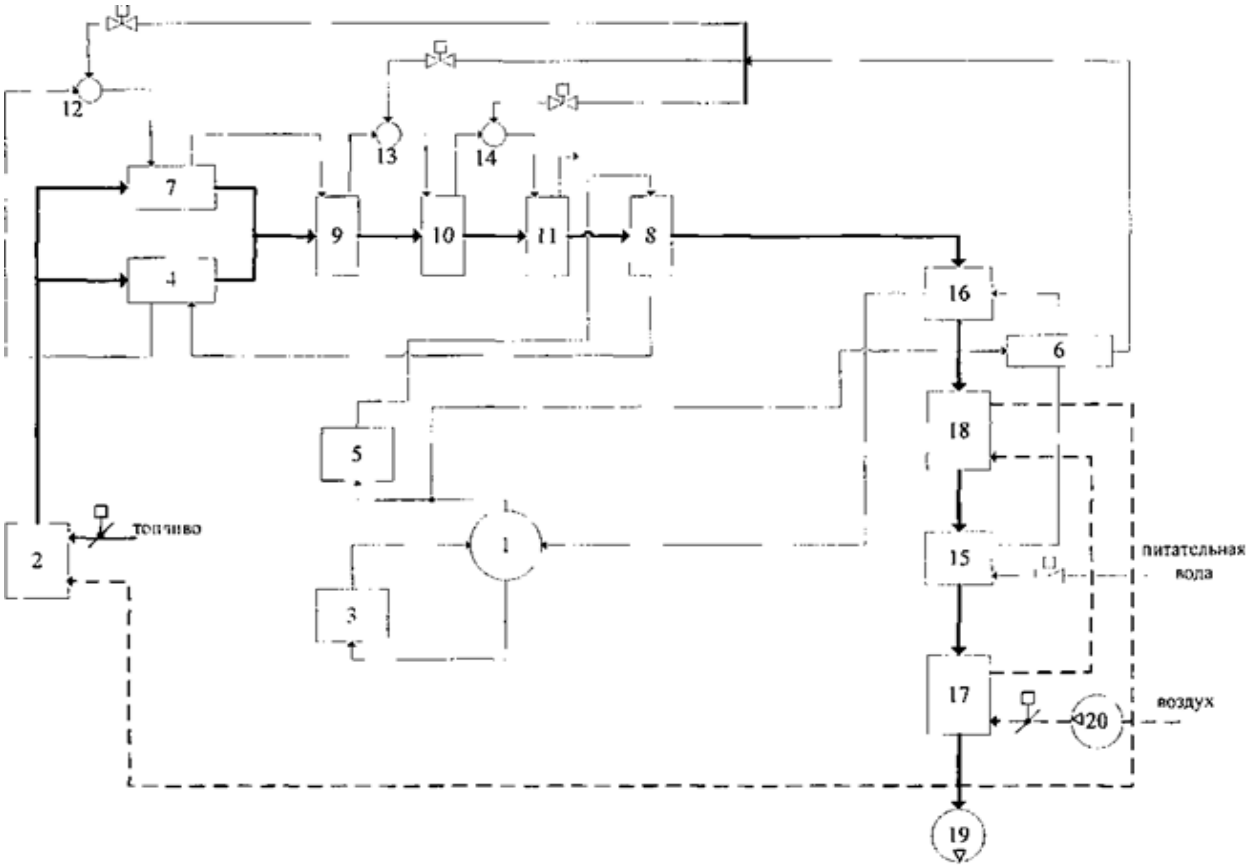
4 Использование методики управления динамическими процессами изменения нагрузки парового котла ТП-81

4.1 Общая характеристика математической модели котла ТП-81

В качестве примера применения изложенной методики оптимального управления динамическими процессами рассмотрим оптимизацию переходного процесса для парового энергетического котла ТП-81 Таганрогского котельного завода, барабанного типа, без промежуточного пароперегревателя, паропроизводительностью 420 т/ч, с давлением острого пара 13,72 МПа и температурой острого пара 550 °С [22]. Котельный агрегат имеет П-образную компоновку. Топка предназначена для работы с сухим шлакоудалением. Удаление шлака из топки производится через устье холодной воронки в четыре водяные ванны непрерывного механического шлакоудаления. Он состоит из топочной камеры являющейся восходящим газоходом, поворотной камеры и опускной конвективной шахты, разделенной по вертикали на два газохода. В верхней части топки расположен полурадиационный ширмовый пароперегреватель. В поворотной камере располагается конвективная часть пароперегревателя. В конвективной шахте размещены последовательно (по ходу газов) верхняя часть водяного экономайзера, верхняя часть трубчатого воздухоподогревателя, нижняя часть водяного экономайзера и нижняя часть трубчатого воздухоподогревателя. Пароперегреватель по характеру восприятия тепла разделяется на три части: радиационную, полурадиационную и конвективную. Радиационная часть состоит из потолочных труб, расположенных над потолочной камерой. Полурадиационная часть пароперегревателя состоит из 20 унифицированных ширм изготовленных из стали 12Х1МФ. Конвективная часть пароперегревателя выполнена из вертикальных змеевиков и состоит из четырех частей. I часть (по ходу пара) поверхность состоящая из сдвоенных змеевиков сталь 20, расположена в горизонтальном газоходе перед поворотной камерой и является продолжением потолочной части пароперегревателя. Остальные три части изготовлены из стали 12Х1МФ). Пароперегреватель имеет три ступени регулирования температуры пара. Первая ступень расположена в рассечке ширмовой части пароперегревателя, вторая - за пакетом второй части конвективного пароперегревателя и третья за пакетом третьей конвективной части. Схема движения пара по пароперегревателю следующая: насыщенный пар из барабана котла по 12- ти не обогреваемым паро-перепускным трубам подводится к потолочному пароперегревателю. Пройдя потолочные трубы пароперегревателя, прямоточные змеевики I-ой конвективной части и далее потолочные трубы над поворотной камерой пар возвращается по противоточным змеевикам I конвективной части, потолочным трубам к фронтовой стене топки; далее пар пройдя смешивающую камеру поступает в 10 средних ширм (по пять в каждом потоке). Из средних ширм пар направляется во входные

впрыскивающие пароохладители и после них через соединительные трубы перебрасывается в крайние ширмы (по 5 ширм в каждом потоке). Далее по 10 перепускным трубам пар поступает в пакеты II конвективной части пароперегревателя, пройдя которые поступает в промежуточные пароохладители. После промежуточных пароохладителей пар поступает в пакеты III-ей части конвективного пароперегревателя, пройдя которые, поступает в конечные пароохладители. После впрыскивающих пароохладителей пар поступает в IY ступень конвективного пароперегревателя. Пройдя IY ступень КПП, по 12-ти не обогреваемым пароперепускным трубам, перегретый пар поступает в общую паросборную камеру. Для регулирования температуры перегретого пара на котле применяется конденсат, получаемый из насыщенного пара этого же котла.

Насыщенный пар из барабана поступает в четыре конденсатора, расположенные на потолочном перекрытии котла, через которые пропускается питательная вода из рассечки водяного экономайзера. Из конденсаторов питательная вода отводится к входным коллекторам II ст. водяного экономайзера. Образовавшийся конденсат собирается в сборнике конденсата, а затем направляется к пароохладителям. Впрыскивается конденсат за счет перепада давлений конденсата в трубе Вентури (пароохладителях) и пара в месте впрыска. Расчетная схема котла представлена на рисунке 4.1.



и

средние ширмы, 5 - потолочный пароперегреватель, 6 - охладитель конденсата впрыска, 7 крайние ширмы, 8 - первая ступень конв

вторая ступень конве

третья ступень конве четвертая ступень конвект - впрыскивающие пароохладители, 15 - водяной экономайзер первой ступени, 16 - водяной

воздухопод

воздухоподогреватель вт - дутьевой вентилятор.

Рисунок 4.1. - Расчетная схема котла ТП – 81

Математическая модель котла ТП-81 включает 530 входных параметров, 626 выходных, для девятнадцати из которых требуется задать начальные приближения, 154 интегрируемых по времени параметров значения которых в начальный момент времени необходимо задавать, и их производных по времени.

Выбор количества участков на которые разбиваются теплообменные поверхности определялся путем проведения серии расчетов теплообменников с разным количеством участков, исходя из того, что расчет при увеличенном количестве участков оказывается близким к предыдущему. Значения параметров теплоносителей на входе в теплообменник были приняты из расчета статической модели котла, при этом температуры металла по участкам теплообменника принимались равными.

4.2 Разработка программного обеспечения нижнего уровня парового котла

При написании продукта был учтен анализ технологических процессов барабанного котла, проведенный в выше изложенных главах, по протеканию процессов составлен алгоритм, приведенный на рисунке 4.2, на основе которого на языке Step 7 мною написана программа, структурная схема которой представлена на рисунке 4.2. В программе предусмотрено управление исполнительными механизмами в ручном режиме, созданы блоки данных для структурного хранения используемых в программе величин, учтены аварийные сбои и экстренное завершение выполнения программы.

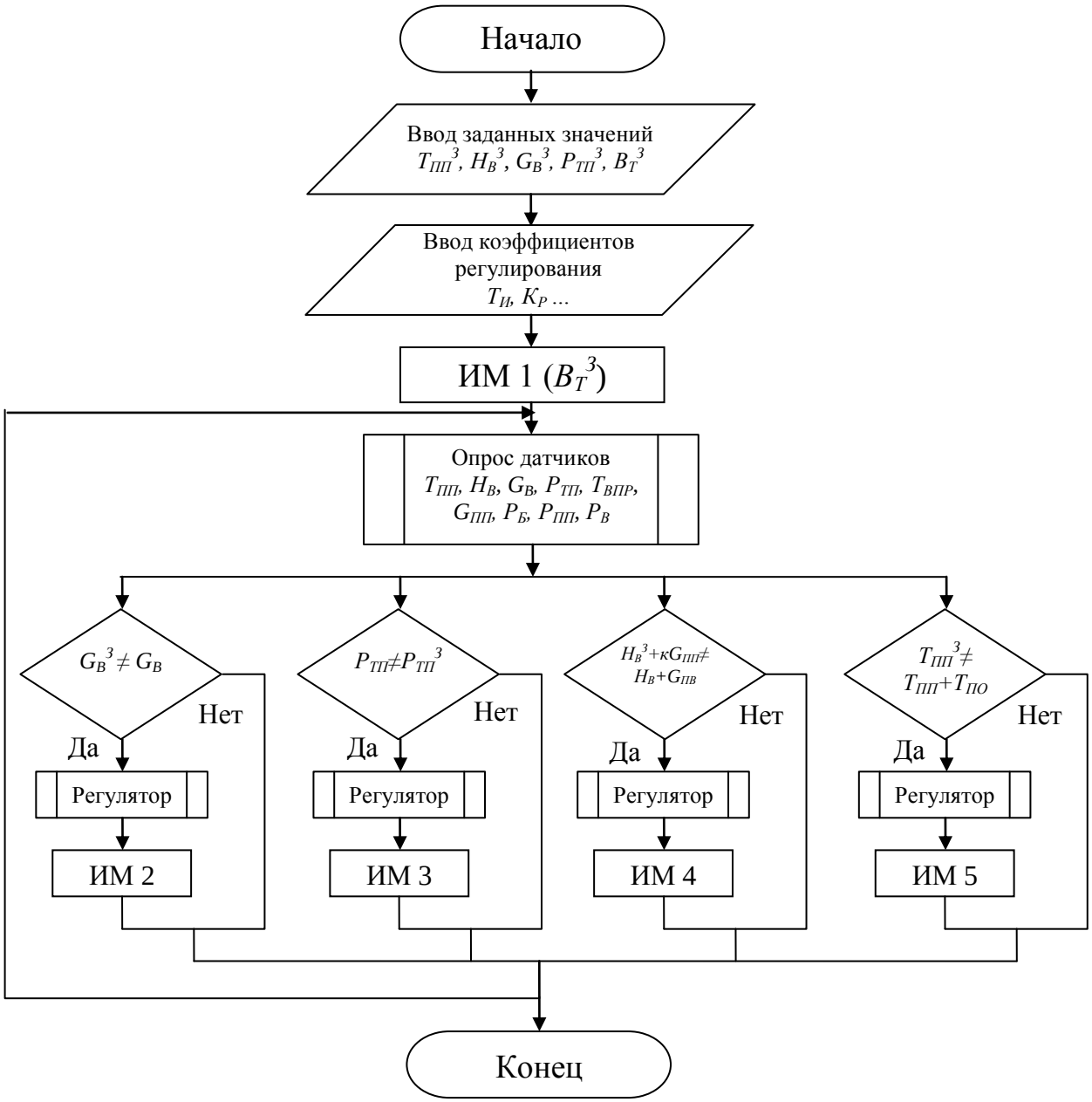


Рисунок 4.2 - Алгоритм выполнения программы

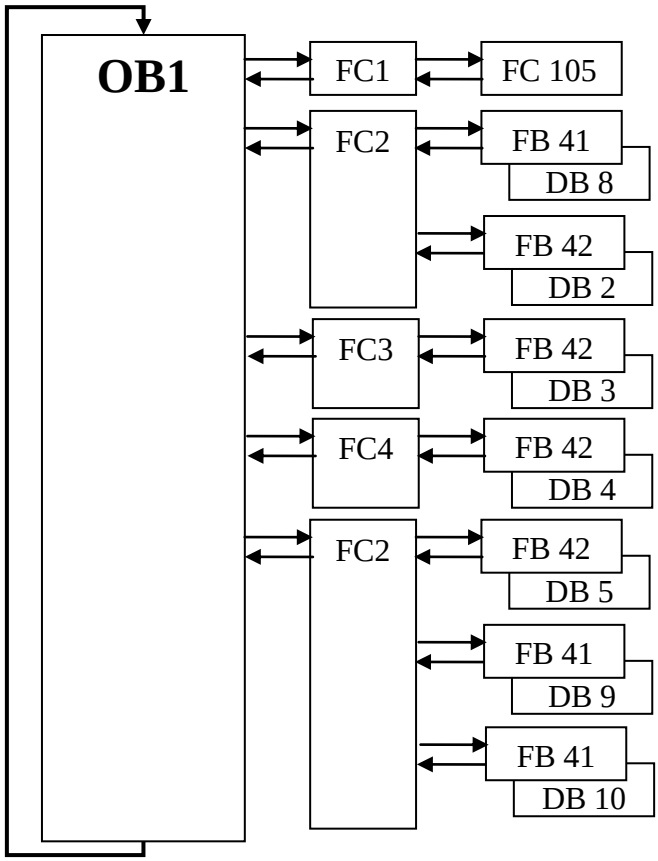


Рисунок 4.3 - Структурная схема программного обеспечения

Для программирования использовались язык список инструкций ассемблера Step7 – STL и язык контактного плана Step7 – LAD.

Таблица 4.1 – Символы, используемые в программе

Символ	Адрес	Тип	Комментарий
CONT_C	FB 41	FB 41	Continuous Control
CONT_S	FB 42	FB 42	Step Control
FC_Scale+Norm	FC 1	FC 1	Чтение аналогового сигнала + Нормирование
REG_T-p-p	FC 2	FC 2	САР температурой перегретого пара
REG_Kach-gor-topl	FC 3	FC 3	САР качества горения топлива
REG_Razr-v-topke	FC 4	FC 4	САР разряжения в топке котла
REG_Uroven-v-bar	FC 5	FC 5	САР уровня в барабане котла
FC6_DIF	FC 6	FC 6	Регулирование перегретым паром (Впрыск охл.воды)
TIM_S5TI	FC 40	FC 40	IEC Time to S5 Time
SCALE	FC 105	FC 105	Scaling Values
REST_REG	M 3.0	BOOL	Сброс всех регуляторов (Экстр.)

Продолжение таблицы 4.1

PIT_V_Ruch_BOL	M 11.0	BOOL	(Питательная вода) Ручной Больше
PIT_V_Ruch_MEN	M 11.1	BOOL	(Питательная вода) Ручной Меньше
PIT_V_Ruch_Avt	M 11.2	BOOL	(Питательная вода) Выбор ручного или автоматического режима (1-руч, 0-авт)
VoV_Ruch_BOL	M 12.0	BOOL	(Впр. Охл. Воды) Ручной Больше
VoV_Ruch_MEN	M 12.1	BOOL	(Впр. Охл. Воды) Ручной Меньше
VoV_Ruch_Avt	M 12.2	BOOL	(Впр. Охл. Воды) Выбор ручного или автоматического режима (1-руч, 0-авт)
TAGA_Ruch_BOL	M 13.0	BOOL	(ТЯГА) Ручной Больше
TAGA_Ruch_MEN	M 13.1	BOOL	(ТЯГА) Ручной Меньше
TAGA_Ruch_Avt	M 13.2	BOOL	(ТЯГА) Выбор ручного или автоматического режима (1-руч, 0-авт)
POD_V_Ruch_BOL	M 14.0	BOOL	(Подача воздуха) Ручной Больше
POD_V_Ruch_MEN	M 14.1	BOOL	(Подача воздуха) Ручной Меньше
POD_V_Ruch_Avt	M 14.2	BOOL	(Подача воздуха) Выбор ручного или автоматического режима (1-руч, 0-авт)
TOP_Ruch_BOL	M 15.0	BOOL	(Топливо) Ручной Больше
TOP_Ruch_MEN	M 15.1	BOOL	(Топливо) Ручной Меньше
TOP_Ruch_Avt	M 15.2	BOOL	(Топливо) Выбор ручного или автоматического режима (1-руч, 0-авт)
Uroven_v_Barabane	MD 50	REAL	Уровень в барабане (-315-0-315) мм.в.ст
T_Vpriska	MD 54	REAL	Температура впрыска (10-20) С
T_p_p	MD 58	REAL	Температура Перегретого пара (500-580)С
Rashod_vody	MD 62	REAL	Расход воды (0-160)т/ч
T_p_p_Zadanie	MD 100	REAL	(Температура перегретого пара) Заданное значение
VoV_Kp	MD 104	REAL	(Впр. Охл. Воды) Коэффициент пропорциональности
VoV_Ti	MD 108	TIME	(Впр. Охл. Воды) Время интегрирования
VoV_Puls?	MD 112	REAL	(Впр. Охл. Воды) Импульс на иполнительный механизм

Продолжение таблицы 4.1

Rash_para	MD 120	REAL	Расход пара ()т/ч
Davl_v_Barabane	MD 124	REAL	Давление в барабане ()
P_p_p	MD 128	REAL	Давление перегретого пара (0-160) бар(атм)
P_vozd	MD 132	REAL	Давление воздуха (0-300) мм.рт.ст
S_t	MD 136	REAL	Разряжение в топочной камере (-25-0+25) мм.рт.ст
TOP_Kp	MD 140	REAL	(Топливо) Коэффициент пропорциональности
TOP_Ti	MD 144	TIME	(Топливо) Время интегрирования
TOP_Puls?	MD 148	REAL	(Топливо) Импульс на иполнительный механизм
POD_V_Kp	MD 152	REAL	(Подача воздуха) Коэффициент пропорциональности
POD_V_Ti	MD 156	TIME	(Подача воздуха) Время интегрирования
POD_V_Puls?	MD 160	REAL	(Подача воздуха) Импульс на иполнительный механизм
TAGA_Kp	MD 164	REAL	(ТЯГА) Коэффициент пропорциональности
TAGA_Ti	MD 168	TIME	(ТЯГА) Время интегрирования
TAGA_Puls?	MD 172	REAL	(ТЯГА) Импульс на иполнительный механизм
PIT_V_Kp	MD 176	REAL	(Питательная вода) Коэффициент пропорциональности
PIT_V_Ti	MD 180	TIME	(Питательная вода) Время интегрирования
PIT_V_Puls?	MD 184	REAL	(Питательная вода) Импульс на иполнительный механизм
Urov_v_Bar_Zadanie	MD 188	REAL	(Уровень в барабане) Заданное значение
T_Vpriska_Zadanie	MD 192	REAL	(Температура впрыска) Заданное значение
Rashod_vody_Zadanie	MD 196	REAL	(Расход воды) Заданное значение
Rash_para_Zadanie	MD 200	REAL	(Расход пара) Заданное значение
Davl_v_Barabane_Zadanie	MD 204	REAL	(Давление в барабане) Заданное значение
P_p_p_Zadanie	MD 208	REAL	(Давление перегретого пара) Заданное значение

Продолжение таблицы 4.1

P_vozd_Zadanie	MD 212	REAL	(Давление воздуха) Зад значение
S_t_Zadanie	MD 216	REAL	(Разряжение в топочной камере) Заданное значение
AI_Uroven_v_Barabane	PIW 288	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Уровень в барабане)
AI_T_Vpriska	PIW 290	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Температура впрыска)
AI_T_p_p	PIW 304	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Температура Перегретого пара)
AI_Rashod_vody	PIW 306	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Расход воды)
AI_Rash_para	PIW 320	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Расход пара)
AI_Davl_v_Barabane	PIW 322	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Давление в барабане)
AI_P_p_p	PIW 336	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Давление перегретого пара)
AI_P_vozd	PIW 338	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Давление воздуха)
AI_S_t	PIW 352	INT	Аналоговый сигнал с ДАТЧИКА (Разряжение в топочной камере)
TOP_+	Q 4.0	BOOL	Сигнал на исп мех (Топливо) БОЛЬШЕ
TOP_-	Q 4.1	BOOL	Сигнал на исп мех (Топливо) МЕНЬШЕ
VoV_+	Q 4.2	BOOL	Сигнал на исп мех (Впр. Охл. Воды) БОЛЬШЕ
VoV_-	Q 4.3	BOOL	Сигнал на исп мех (Впр. Охл. Воды) МЕНЬШЕ
POD_V_+	Q 4.4	BOOL	Сигнал на исп мех (Подача воздуха) БОЛЬШЕ
POD_V_-	Q 4.5	BOOL	Сигнал на исп мех (Подача воздуха) МЕНЬШЕ
TAGA_+	Q 4.6	BOOL	Сигнал на исп мех (ТЯГА) БОЛЬШЕ
TAGA_-	Q 4.7	BOOL	Сигнал на исп мех (ТЯГА) БОЛЬШЕ
PIT_V_+	Q 5.0	BOOL	Сигнал на исп мех (Питательная вода) БОЛЬШЕ

Продолжение таблицы 4.1

PIT_V_-	Q 5.1	BOOL	Сигнал на исп мех (Питательная вода) МЕНЬШЕ
VAT_REG_T-p-p	VAT 1		Таблица изменения переменных во времени (САР температурой перегретого пара)
VAT_2_All_Process	VAT 2		Таблица изменения переменных во времени(Весь процесс)

Далее представлены эскизы написанной программы:

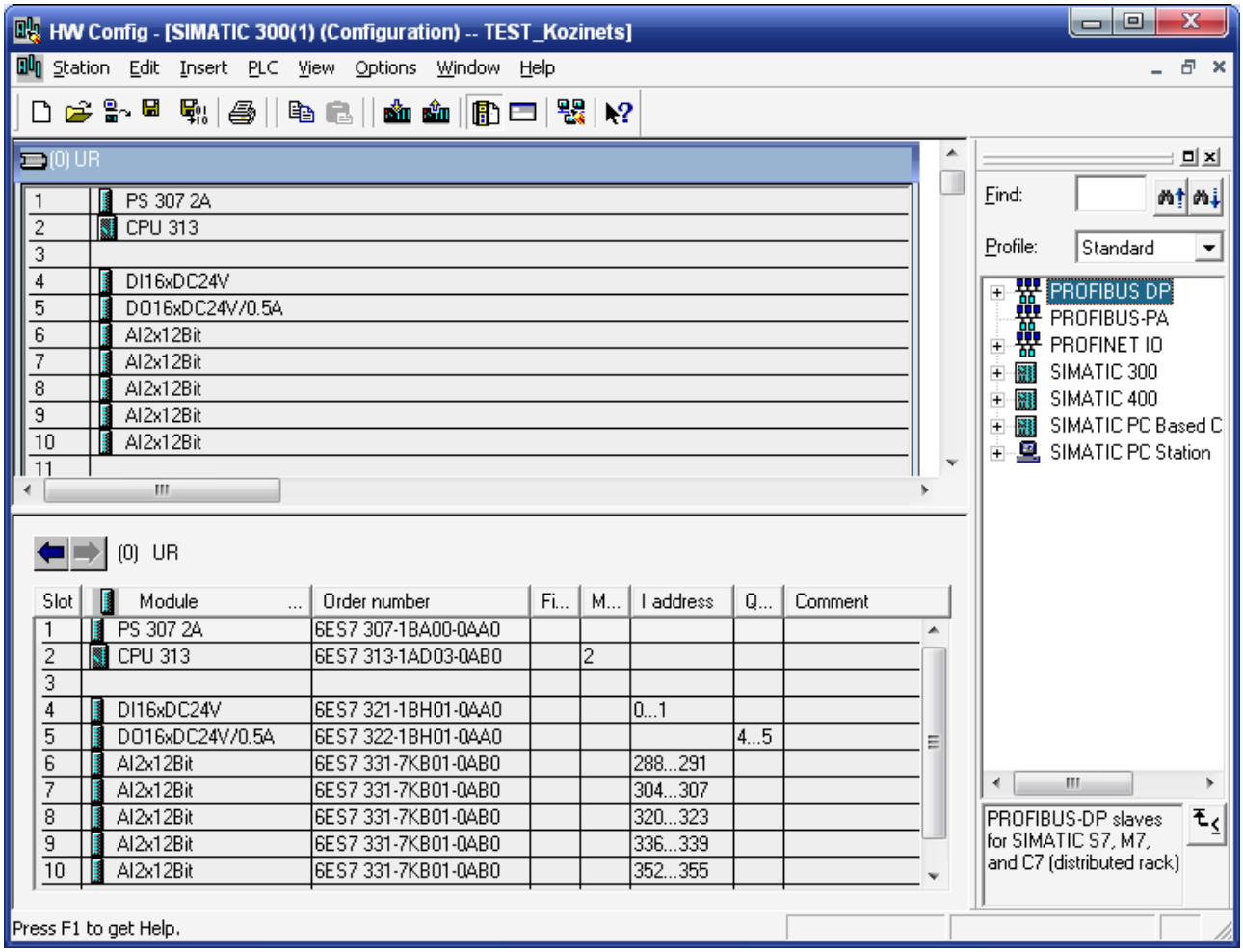


Рисунок 4.4 – Конфигурация выбранных модулей СПЛК

SIMATIC Manager - [TEST_Kozinets -- F:\Program Files\Siemens\Step7\S7Proj\TEST_Koz]

File Edit Insert PLC View Options Window Help

< No Filter >

TEST_Kozinets
SIMATIC 300(1)
CPU 313
S7 Program
Sources
Blocks

Object name	Symbolic name	Creat...	Size ...	Type
OB1		LAD	582	Organization Block
FB41	CONT_C	SCL	1462	Function Block
FB42	CONT_S	SCL	1734	Function Block
FC1	FC_Scale+Norm	LAD	216	Function
FC2	REG_T-p-p	LAD	418	Function
FC3	REG_Kach-gor-topl	LAD	278	Function
FC4	REG_Razr-v-topke	LAD	278	Function
FC5	REG_Uroven-v-bar	LAD	566	Function
FC40	TIM_S5TI	STL	158	Function
FC105	SCALE	STL	244	Function
DB2		DB	126	Instance data block for FB 42
DB3		DB	126	Instance data block for FB 42
DB4		DB	126	Instance data block for FB 42
DB5		DB	126	Instance data block for FB 42
DB8		DB	162	Instance data block for FB 41
DB9		DB	162	Instance data block for FB 41
DB10		DB	162	Instance data block for FB 41
VAT_2_All_Process	VAT_2_All_Process		---	Variable Table
VAT_REG_T-p-p	VAT_REG_T-p-p		---	Variable Table

Press F1 to get Help. TCP/IP -> Realtek PCIe GBE Famil...

Рисунок 4.5 – Структура программы

Var - [VAT_2_All_Process -- @TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\CPU 313\S7 Progra...

Table Edit Insert PLC Variable View Options Window Help

	Address	Symbol	Display format	Status value	Modify value
1	M 3.0	"REST_REG"	BOOL	false	false
2	M 15.0	"TOP_Ruch_BOL"	BOOL	false	false
3	M 15.1	"TOP_Ruch_MEN"	BOOL	false	false
4	M 15.2	"TOP_Ruch_Avt"	BOOL	false	false
5	M 14.0	"POD_V_Ruch_BOL"	BOOL	false	false
6	M 14.1	"POD_V_Ruch_MEN"	BOOL	false	false
7	M 14.2	"POD_V_Ruch_Avt"	BOOL	false	false
8	M 13.0	"TAGA_Ruch_BOL"	BOOL	false	false
9	M 13.1	"TAGA_Ruch_MEN"	BOOL	false	false
10	M 13.2	"TAGA_Ruch_Avt"	BOOL	false	false
11	M 12.0	"VoV_Ruch_BOL"	BOOL	false	false
12	M 12.1	"VoV_Ruch_MEN"	BOOL	false	false
13	M 12.2	"VoV_Ruch_Avt"	BOOL	false	false
14	M 11.0	"PIT_V_Ruch_BOL"	BOOL	false	false
15	M 11.1	"PIT_V_Ruch_MEN"	BOOL	false	false

TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\...\S7 Program RUN Abs < 5.2

Рисунок 4.6 – Таблица переменных величин 1

Var - [VAT_2_All_Process -- @TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\CPU 313\S7 Program ...

Table Edit Insert PLC Variable View Options Window Help

	Address	Symbol	Display format	Status value	Modify value
16	M 11.2	"PIT_V_Ruch_Avt"	BOOL	false	false
17	MD 50	"Uroven_v_Barabane"	FLOATING_POINT	-315.0	
18	MD 54	"T_Vpriska"	FLOATING_POINT	10.0	
19	MD 58	"T_p_p"	FLOATING_POINT	500.0	
20	MD 62	"Rashod_vody"	FLOATING_POINT	0.0	
21	MD 100	"T_p_p_Zadanie"	FLOATING_POINT	521.0	521.0
22	MD 104	"VoV_Kp"	FLOATING_POINT	0.6	0.6
23	MD 108	"VoV_Ti"	TIME	T#300ms	T#300ms
24	MD 112	"VoV_Puls?"	FLOATING_POINT	1.0	
25	MD 120	"Rash_para"	FLOATING_POINT	0.0	
26	MD 124	"Davl_v_Barabane"	FLOATING_POINT	0.0	
27	MD 128	"P_p_p"	FLOATING_POINT	0.0	
28	MD 132	"P_vozd"	FLOATING_POINT	0.0	
29	MD 136	"S_t"	FLOATING_POINT	-25.0	
30	MD 140	"TOP_Kp"	FLOATING_POINT	0.6	0.6
31	MD 144	"TOP_Ti"	TIME		T#300ms

TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\...\S7 Program RUN Abs < 5.2

Рисунок 4.7 - Таблица переменных величин 2

Var - [VAT_2_All_Process -- @TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\CPU 313\S7 Progra...

Table Edit Insert PLC Variable View Options Window Help

	Address	Symbol	Display format	Status value	Modify value
32	MD 148	"TOP_Puls?"	FLOATING_POINT	0.0	
33	MD 152	"POD_V_Kp"	FLOATING_POINT	0.6	0.6
34	MD 156	"POD_V_Ti"	TIME	T#300ms	T#300ms
35	MD 160	"POD_V_Puls?"	FLOATING_POINT	1.0	
36	MD 164	"TAGA_Kp"	FLOATING_POINT	0.6	0.6
37	MD 168	"TAGA_Ti"	TIME	T#300ms	T#300ms
38	MD 172	"TAGA_Puls?"	FLOATING_POINT	1.0	
39	MD 176	"PIT_V_Kp"	FLOATING_POINT	0.6	0.6
40	MD 180	"PIT_V_Ti"	TIME	T#300ms	T#300ms
41	MD 184	"PIT_V_Puls?"	FLOATING_POINT	1.0	
42	MD 188	"Urov_v_Bar_Zadanie"	FLOATING_POINT	261.0	261.0
43	MD 192	"T_Vpriska_Zadanie"	FLOATING_POINT	0.0	
44	MD 196	"Rashod_vody_Zadanie"	FLOATING_POINT	0.0	
45	MD 200	"Rash_para_Zadanie"	FLOATING_POINT	0.0	
46	MD 204	"Davl_v_Barabane_Zadanie"	FLOATING_POINT	0.0	
47	MD 208	"P_p_p_Zadanie"	FLOATING_POINT		

TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\...\S7 Program RUN Abs < 5.2

Рисунок 4.8 - Таблица переменных величин 3

Var - [VAT_2_All_Process -- @TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\CPU 313\S7 Progra...

Table Edit Insert PLC Variable View Options Window Help

	Address	Symbol	Display format	Status value	Modify value
48	MD 212	"P_vozd_Zadanie"	FLOATING_POINT	150.0	150.0
49	MD 216	"S_t_Zadanie"	FLOATING_POINT	-4.0	-4.0
50	Q 4.0	"TOP_+"	BOOL	false	
51	Q 4.1	"TOP_-"	BOOL	false	
52	Q 4.4	"POD_V_+"	BOOL	true	
53	Q 4.5	"POD_V_-"	BOOL	false	
54	Q 4.6	"TAGA_+"	BOOL	true	
55	Q 4.7	"TAGA_-"	BOOL	false	
56	Q 4.2	"VoV_+"	BOOL	true	
57	Q 4.3	"VoV_-"	BOOL	false	
58	Q 5.0	"PIT_V_+"	BOOL	true	
59	Q 5.1	"PIT_V_-"	BOOL	false	
60	PIW 288	"AI_Uroven_v_Barabane"	DEC	0	
61	PIW 290	"AI_T_Vpriska"	DEC	0	
62	PIW 304	"AI_T_p_p"	DEC	0	
63	PIW 306	"AI_Rashod_vody"	DEC	0	
64	PIW 320	"AI_Rash_para"	DEC	0	
65	PIW 322	"AI_Davl_v_Barabane"	DEC	0	
66	PIW 336	"AI_P_p_p"	DEC	0	
67	PIW 338	"AI_P_vozd"	DEC	0	
68	PIW 352	"AI_S_t"	DEC	0	
69					

TEST_Kozinets\SIMATIC 300(1)\...\S7 Program RUN Abs < 5.2

Рисунок 4.9 - Таблица переменных величин 4

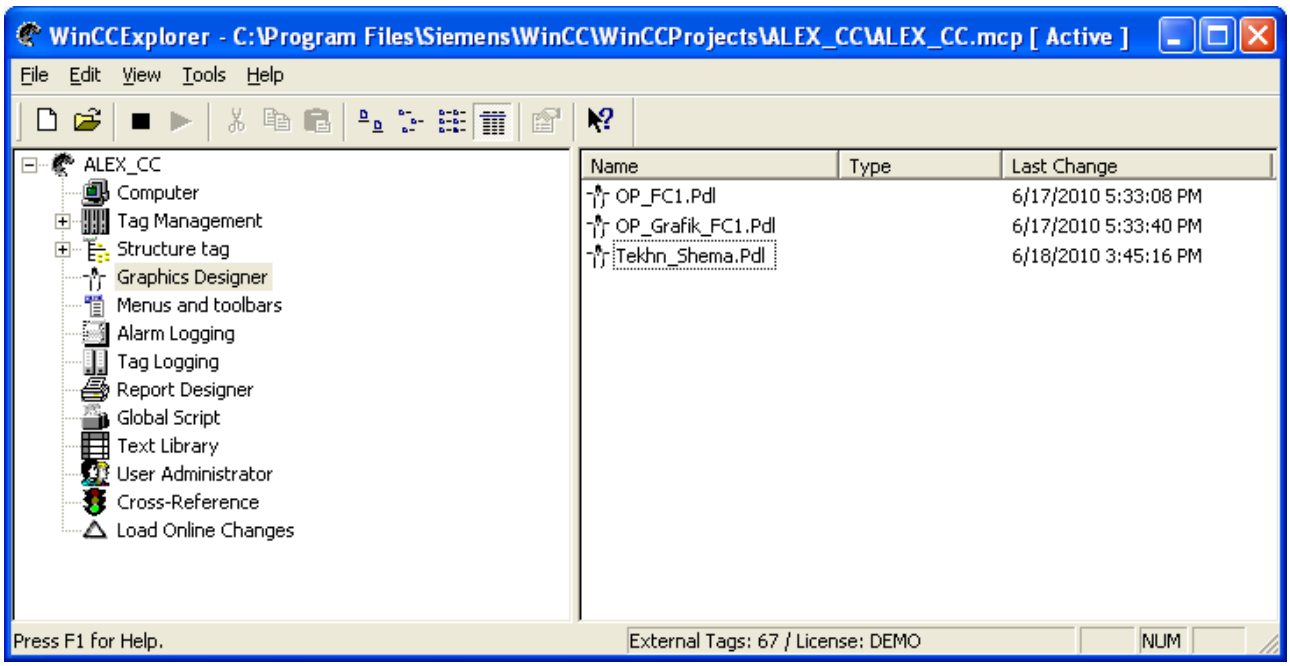


Рисунок 4.10 - Структура программы

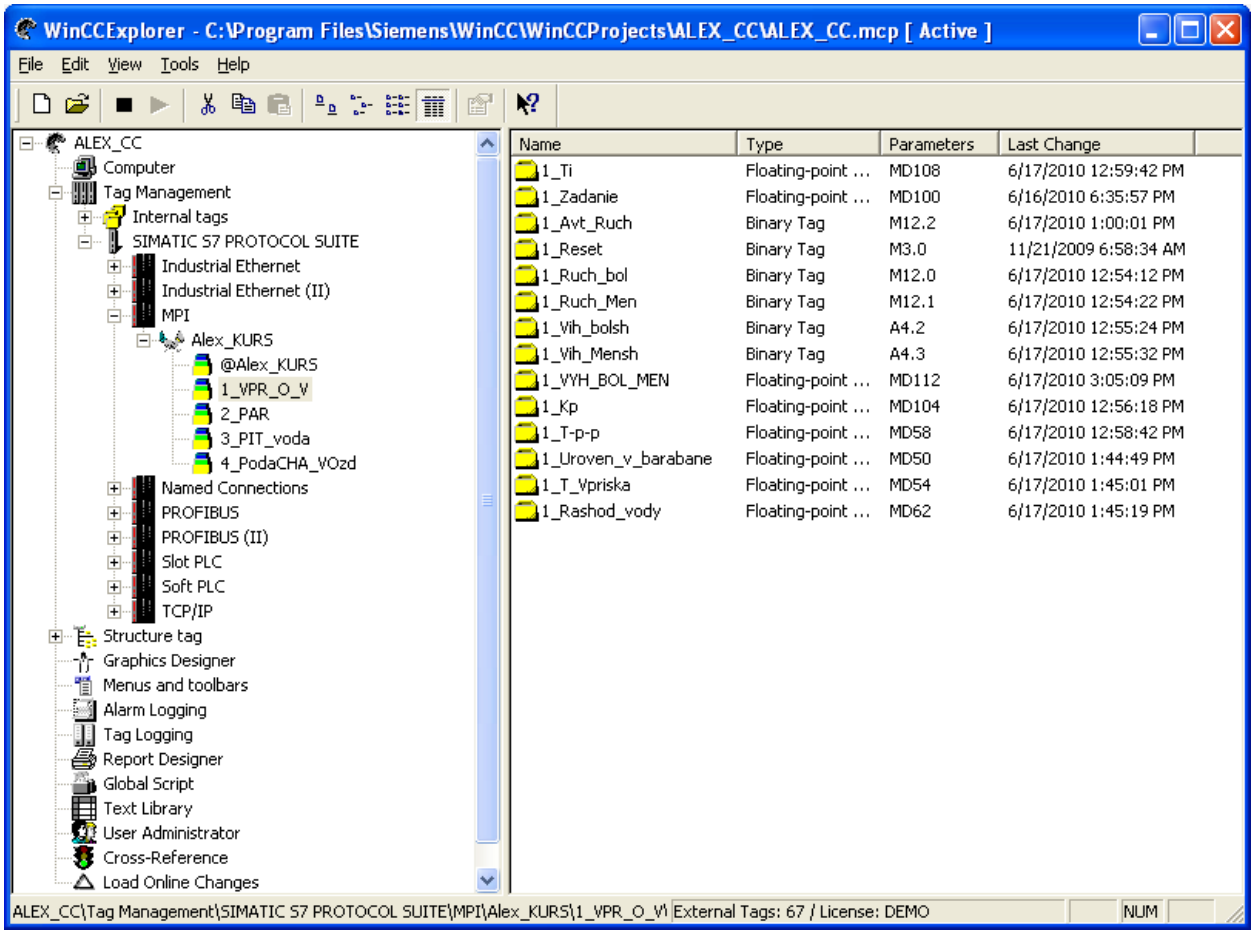


Рисунок 4.11 – Тэги, необходимые для вычислений

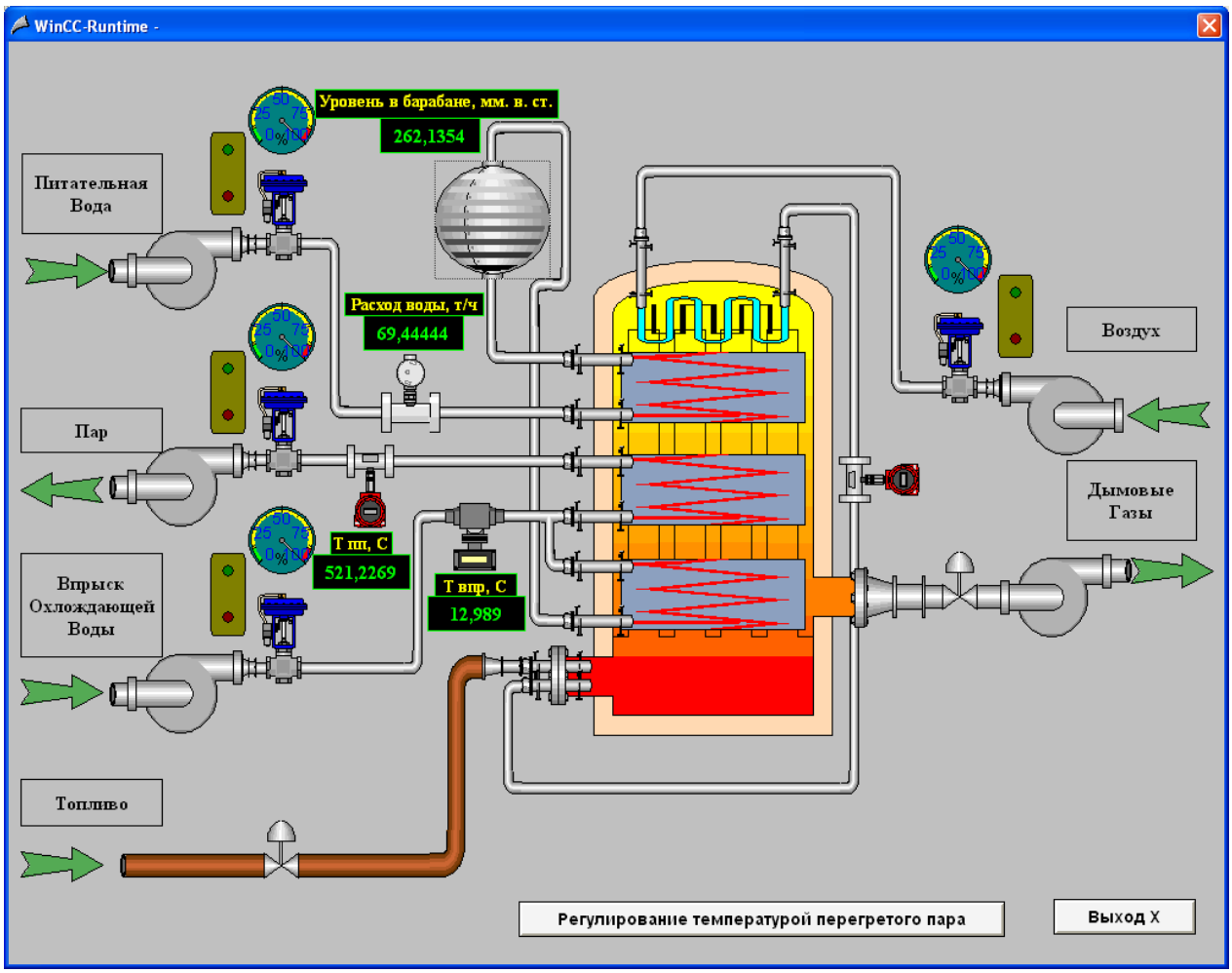


Рисунок 4.12 – Технологическая схема процесса барабанного котла с отображением исследуемых величин

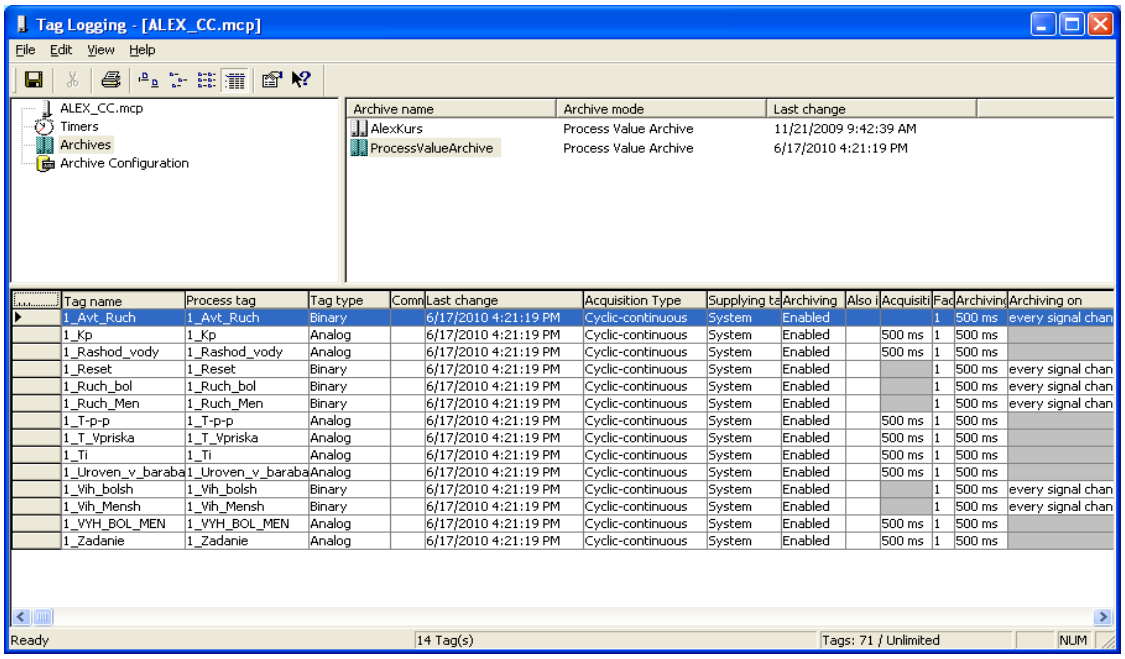


Рисунок 4.13 – Архивирование информации полученной в ходе наблюдения

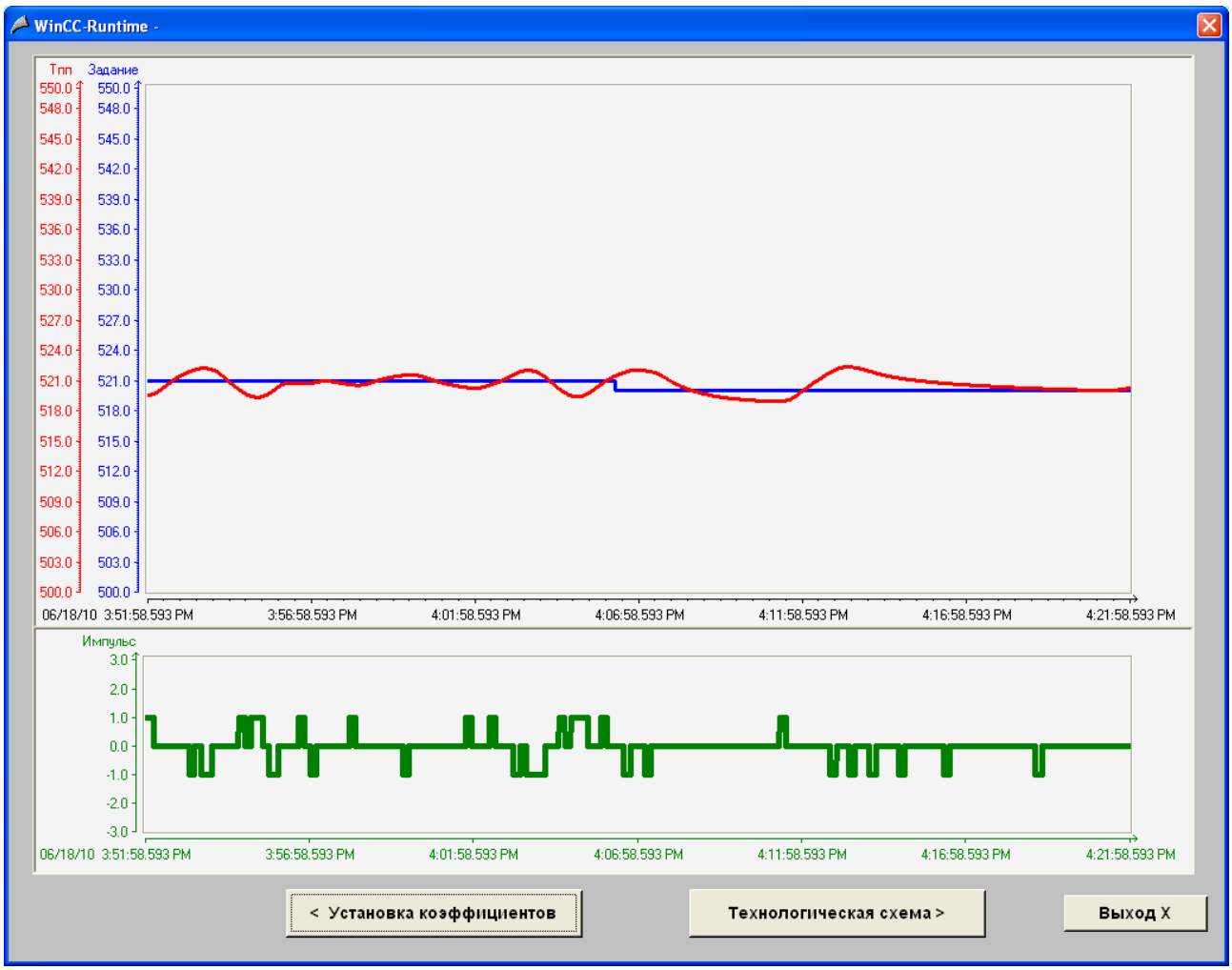


Рисунок 4.14 – График регулирования

4.3 Исследование контура регулирования температурой перегретого пара

Для проверки работоспособности и конкурентоспособности разработанного программного комплекса, провели исследование контура регулирования температурой перегретого пара в замкнутой системе.

Положение ИМ 1 «Топливо» - 40 %;
Положение ИМ 2 «Подача воздуха» - 20 %;
Положение ИМ 3 «Тяга» - 20 %;
Положение ИМ 5 «Питательная вода» - 35 %;

4.3.1. Расчет цифрового регулятора инженерным методом для выбранного объекта по его характеристикам.

Таблица 4.2 – Параметры объекта

Коб	Тоб	τоб	Тип объекта
0,5	5	1	Интегральный

В качестве метода расчета применим инженерный метод расчета:

Где τ/Т=1/5

$$k_p = \frac{0.244(\tau_{об}/T_{об}+0,4)}{k_0[\frac{\tau_{об}}{T_{об}}-0,7]}$$

$$T_i = 0.5 * T_{об}$$

K_p=2,25 – коэффициент пропорциональности

T_i=0.5*5=2,5с – постоянная времени интегрирования

$T_м=1/S_{им}=1/0,3=3,33$с

$t_{имп}= Тм /T_i=3,33/2,5=1,33$ с = $t_{пауз}$

Полученные инженерным методом значения применим для регулятора.

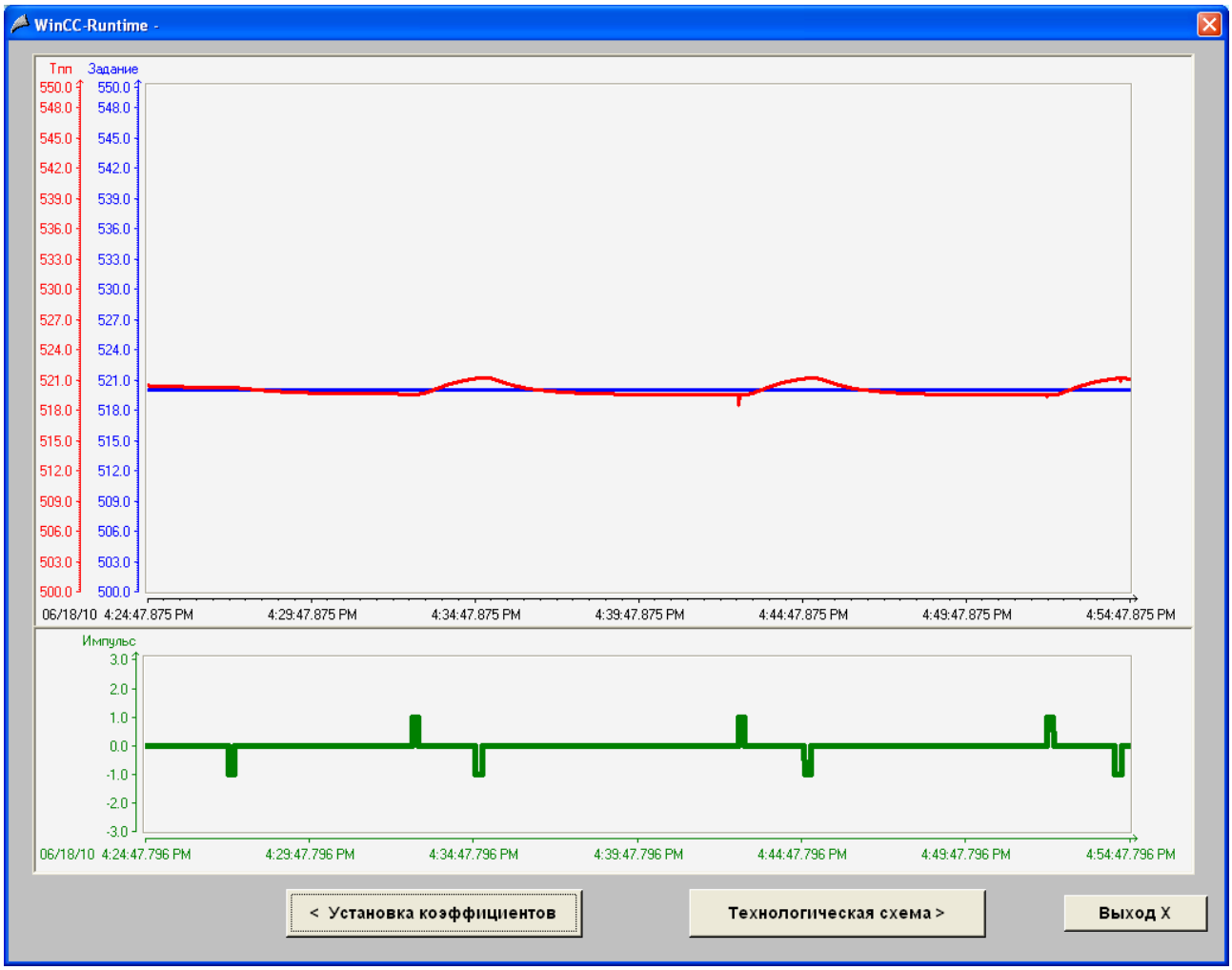


Рисунок 4.15 – График регулирования Тпп, при T_i=2.5 с, K_P=2.25

4.3.2. Снятие графиков зависимостей поведения объекта от настроек регулятора.

Теперь пробуем подбирать настройки регулятора:

1) T_{i1}= 300 ms, $T_{Д1}$=1 s, K_{p1}=0.6;
2) T_{i2}=0.5* T_{i1}= 150 ms;
3) T_{i3}=2* T_{i1}= 600 ms;
4) $T_{Д2}$=0.5* $T_{Д1}$=0,5 ms;
5) $T_{Д3}$=2* $T_{Д1}$=2 ms;
6) K_{P2}=0.5*K_{p1}=0.3.

Из полученных графиков видно при каких параметрах регулятора система устойчива (колебания затухающие), при каких не устойчива (расходящиеся) и при каких происходят автоколебания. Полученные результаты на графиках соответствуют данным из теории автоматического регулирования, следовательно, модель в комплекте с разработанным программным комплексом работоспособна и конкурентоспособна реальным САР на производстве!

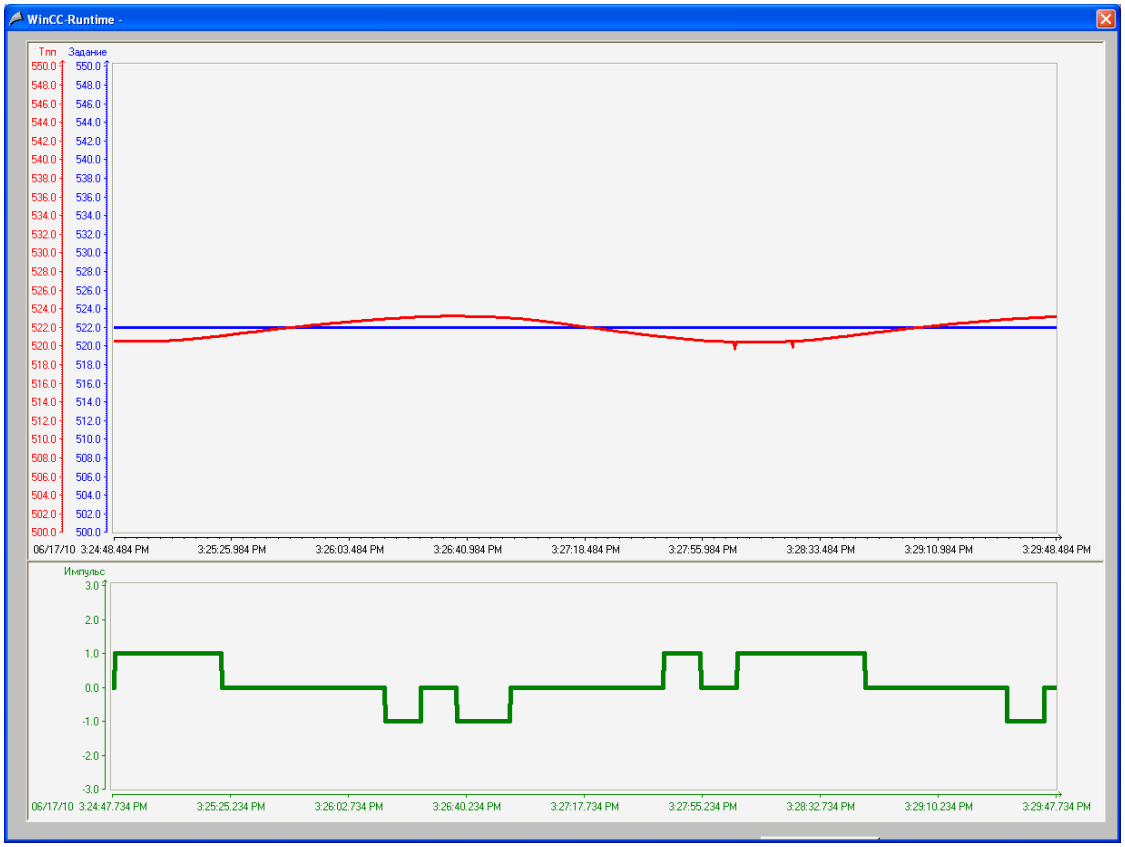


Рисунок 4.16 – График регулирования при T_i=300 ms и K_p=0,6

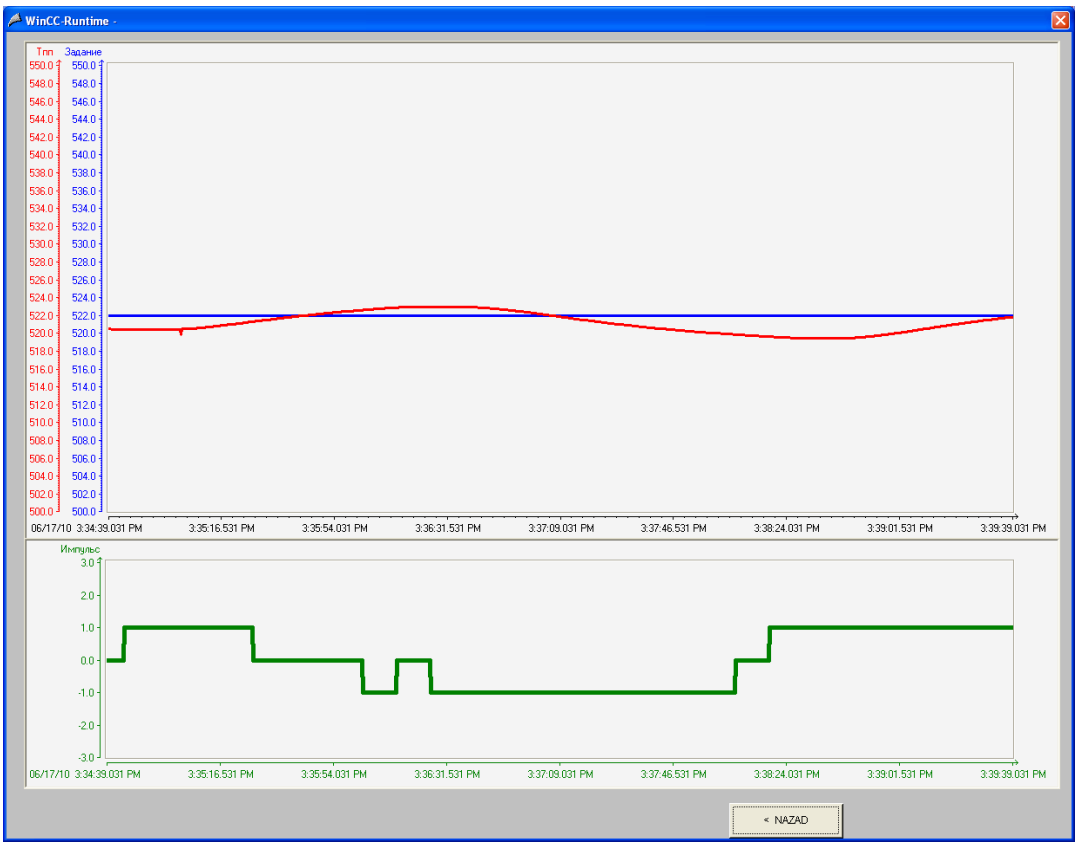


Рисунок 4.17 – График регулирования при T_i=*150 ms* и K_p=*0,6*

Рисунок 4.18 – График регулирования при T_i=*600 ms* и K_p=*0,6*

Рисунок 4.19 – График регулирования при T_i=500 *ms* и K_p=0,6

Рисунок 4.20 – График регулирования при $T_Д$=2 *ms* и K_p=0,6

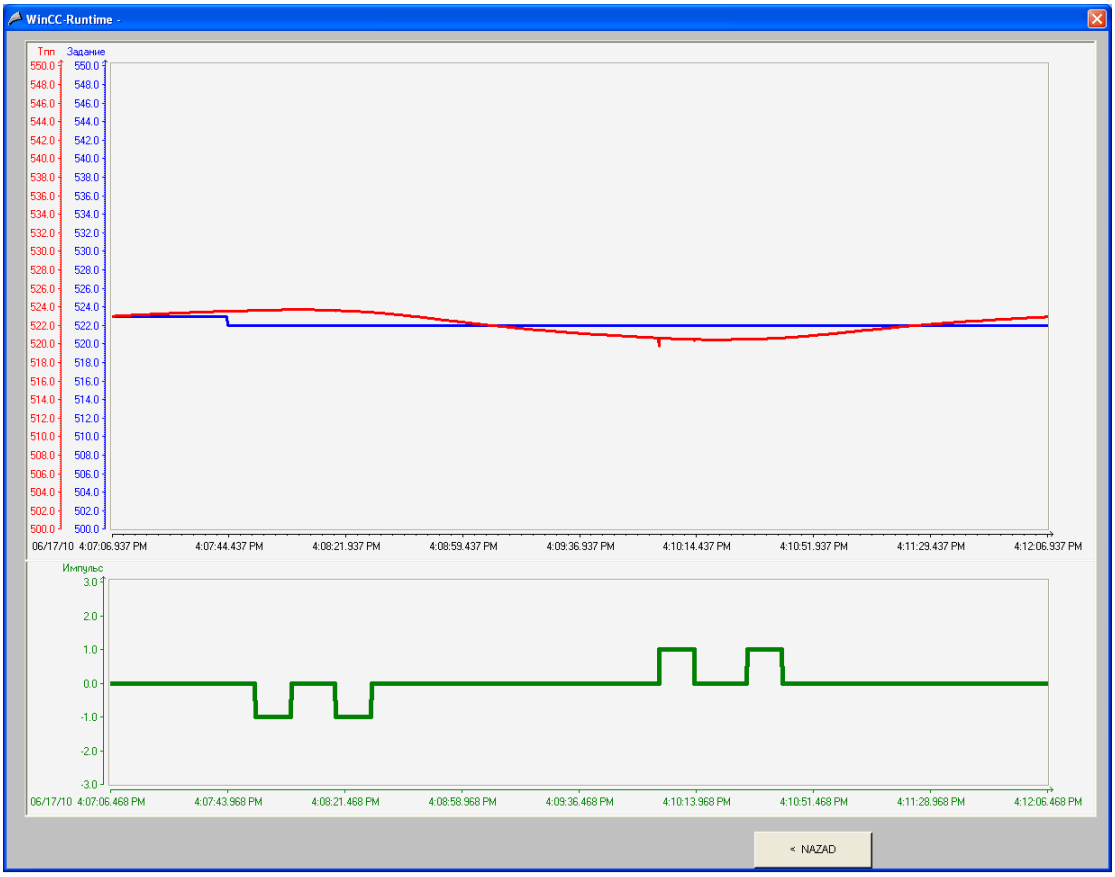


Рисунок 4.21 – График регулирования при K_P=0,3 ms и T_i=300 ms

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы был разработана единая методика управления динамическими процессами в паровом котле при подготовки пара основанная на сочетании его нелинейных и линейных математических моделей. Произведена трансформация задачи оптимального управления процессом изменения нагрузки котла к задаче нелинейного программирования. За счет последовательного использования линейных и нелинейных моделей котла достигнуто существенное ускорение решения задачи оптимального управления подготовки пара. Применение базы данных значений коэффициентов и свободных членов функции цели и ограничений, определенных для всего диапазона нагрузок работы котла, позволило сократить рассогласования между линейной и нелинейной моделями.

Разработана методика коррекции результатов линейной оптимизации динамического процесса с использованием подробной (нелинейной) модели котла и с использованием замеров регулируемых параметров на объекте управления.

Созданы динамические математические модели элементов котельного агрегата, и модели котла в целом, которые могут быть эффективно использованы для решения задач оптимизации подготовки пара в котле.

На примере математической модели парового энергетического котла ТП-81 показана эффективность использования методики при формировании управляющих воздействий для изменения нагрузки и поддержания требуемых параметров котла по сравнению с применением ПИД регуляторов. Разработанная методика обеспечила в ходе динамического процесса увеличение удельного отпуска тепловой энергии от котла.

В качестве регуляторов величин выбраны импульсные регуляторы, алгоритмы которых заложены в стандартных функциях языка Step7.

Для визуализации использовались понятные человеку, наглядные и удобные в управлении технологические объекты, воспроизводящие реальный технологический процесс. Для наблюдения за динамическими характеристиками, в системе созданы графики, отображающие изменение регулируемых величин в реальном времени. Для обращения к полученной ранее информации реализовано архивирование данных, а для удобства восприятия информации разработано несколько шаблонов отчетов.

Параметры регулятора рассчитаны инженерным методом и применены для экспериментов над контуром регулирования температуры перегретого пара.

Полученные результаты экспериментов (графики) соответствуют теоретическим данным из теории автоматического регулирования. В результате проведения экспериментов организована полная отчетная документация диспетчера.

Список литературы

1. Мадоян А.А., Моргунова В.А. Повышение эффективности использования котлов, работающих на углях марки АШ в режимах переменных нагрузок. Теплоэнергетика. - 2002. - №4. - С. 21 - 24.
2. Автоматическое управление теплоэнергетическими установками электростанций (техническая кибернетика в теплоэнергетике), М.: Энергия, 1968.-91с.
3. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики: Учебное пособие . Липатников Г.А., Гузеев М.С. 2007 г. - 136 с.
4. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. - М., 1975. - 528 с.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. - 488 с.
6. Петров Ю.П. Очерки истории теории управления. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 272 с.:ил.
7. Мухин В.С., Саков И.А. Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов: Учебное пособие для СПТУ. - М.: Высш. шк., 1988.-256 с.
1. Теория автоматического управления: учебник для вузов . В .Я. Ротач. - 4-е изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 400 с., ил.
2. Вульман Ф.А., Хорьков Н.С. Тепловые расчеты на ЭВМ теплоэнергетических установок. Под общ. ред. В.Я. Рыжкина. М.: Энергия, 1975. - 200 с.
3. Труды центрального научно-исследовательского института комплексной автоматизации .М.: Энергия, 1967. — вып. 16. - 312 с.
4. Вульман Ф.А., Хорьков Н.С., Куприянова Л.М. Применение модульного принципа для описания задач математического моделирования теплоэнергетических установок. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1978. - №4. - С.129 — 136.
5. Палагин А. А. Автоматизация проектирования теплосиловых схем турбоустановок. - Киев: Наукова думка, 1983. 160 с.
6. Палагин А. А. Логически-числовая модель турбоустановки . Проблемы машиностроения, 1975. - Вып. 2. - С. 103 - 106.
7. Палагин А.А. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. - Киев: Наук, думка, 1986. — 132с.
8. Шубенко-Шубин Л. А., Палагин А. А. Цели и основные принципы автоматизации проектирования турбин. -Харьков: ИПМАШ, 1970. - 40 с.
9. Методы математического моделирования и комплексной оптимизации при неопределенности исходной информации: Сб. работ . АН СССР Сиб. отд-ние. Сиб. энерг. инт-т; Под ред. Попырина JI.С. - Иркутск: Вост-Сиб. изд-во, 1977. - 192 с.
10. Методы оптимизации сложных энергетических установок . А.М.Клер, Н.П.Деканова, Т.П.Щеголева и др. - Новосибирск: ВО «Наука».

Сибирская издательская фирма, 1993. - 116 с.

11. Вознесенский И.Н. Автоматическое регулирование паровых котлов . Труды таучно-технической сессии по котлостроению. - 1948. - с. 194

12. Арманд А.А. Расчет переходных процессов в теплообменниках . Сборник «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях». - Госэнергоиздат, 1959

13. Шубенко-Шубин JL А., Косяк Ю. Ф. и др. Исследование некоторых маневренных характеристик турбоустановки К-300-240 ХТГЗ с помощью математической модели. — «Энергомашиностроение», 1971, № 5, с. 3—6.

14. Хорьков Н. С., Носков А. И. и др. Расчет на ЭЦВМ динамических характеристик прямоточного котла. — «Теплоэнергетика», 1970, № 7 с. 33—37.

15. Рушинский В, М., Смирнов В. Н. Цифровая модель котло-агрегата сверхкритических параметров. — «Теплоэнергетика», 1970, № 6, с. 61—68.

16. Теплопередача: Учебник для вузов . В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1981.

- 416 с., ил.

17. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под ред. Н.В.Кузнецова. М.: Энергия, 1973. - 296 с.

18. Гидравлический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1978. —255с.

19. Аэродинамический расчет котельных установок. Нормативный метод. Под ред. С.И.Молчана . JL: Энергия, 1977. - 256 с.

20. Клер А.М., Скрипкин С.К., Деканова Н.П., Автоматизация построения статических и динамических моделей теплоэнергетических установок. Изв. РАН. Энергетика. - 1996. - №3. - С. 78 - 84.

21. Пржиялковский М.М. Циркуляция воды при нестационарных режимах работы котлов. БТИ ОРГРЭС. М., 1961.

22. Жарков П.В. Применение оптимального управления для динамических процессов в паровом котле . Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2007. - №1(29) - С. 50.

23. Клер А.М., Жарков П.В. Оптимизация динамических процессов в котельном агрегате . Теплофизика и аэромеханика. — 2007 - том 14 — №3 . - С . 477 - 487.

24. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования . А.М. Клер, Н.П. Деканова, Э.А. Тюрина и др. - Новосибирск: Наука, 2005. — 236 с.